

ADICIÓN DE RESIDUOS DE CÁSCARA DE HUEVO COMO REEMPLAZO PARCIAL DE
10% DE CEMENTO EN LA ELABORACION DE MEZCLA DE CONCRETO HIDRÁULICO

JEIMY CAROLINA ROA GÓMEZ
MILER ANDRES ROCHAR SUAREZ

UNIVERSIDAD PILOTO DE COLOMBIA
SECCIONAL DEL ALTO MAGDALENA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA INGENIERÍA CIVIL
GIRARDOT, CUNDINAMARCA
2026

ADICIÓN DE RESIDUOS DE CÁSCARA DE HUEVO COMO REEMPLAZO PARCIAL DE
10% DE CEMENTO EN LA ELABORACION DE MEZCLA DE CONCRETO HIDRÁULICO

JEIMY CAROLINA ROA GÓMEZ
jeimy-roa@upc.edu.co
MILER ANDRES ROCHAR SUAREZ
miler-rocha@upc.edu.co

Documento trabajo de grado, presentado como opción de grado para optar el título de
ingeniero civil

DOCENTE
MAURICIO ANDRES RIVERA SOTO
INGENIERO CIVIL
mauricio-rivera1@unipiloto.edu.co

UNIVERSIDAD PILOTO DE COLOMBIA
SECCIONAL DEL ALTO MAGDALENA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA INGENIERÍA CIVIL
GIRARDOT, CUNDINAMARCA
2026

Nota de aceptación

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

DEDICATORIA

Gracias a mi familia este proyecto fue posible, especialmente a mis padres, quienes al igual que yo realizaron grandes sacrificios para que este logro fuera posible. Su esfuerzo constante, apoyo incondicional y confianza en mis capacidades fueron fundamentales durante cada etapa de este proceso. A ellos les agradezco por brindarme las herramientas, los valores y la motivación necesaria para seguir avanzando, incluso en los periodos más difíciles, cuando el cansancio pesa y la paciencia se pone a prueba. Gracias por sus consejos, por las palabras de ánimo como su presencia en todos los momentos de este recorrido.

También dedico este logro en especial a mi pareja y su gran amor y paciencia que siempre me da compañía incondicional durante este proceso. Gracias por estar presente en los momentos de mayor exigencia, por brindarme apoyo emocional, comprensión y fortaleza cuando más lo necesité. Tu compañía fue un apoyo fundamental para mantenerme firme y continuar avanzando en este camino.

De igual manera, dedico este proyecto a aquellos compañeros y amigos que me acompañaron con palabras de ánimo, consejos sinceros y motivación en los momentos necesarios. Su compañía y respaldo hicieron más llevadero este recorrido.

Este logro no es solamente mío, también les pertenece a ustedes, porque detrás de cada meta alcanzada siempre existe el amor, la entrega y el apoyo de quienes creen en uno incluso cuando uno mismo duda.

Jeimy Carolina Roa Gómez

Este trabajo es un resultado de nuestros esfuerzos, dedicación y el apoyo de nuestros seres queridos que han sido fundamentales a lo largo de mi formación, por ello les dedico estas palabras a mis padres, los cuales se han convertido en el pilar que establece mi vida y han estado conmigo como lo es mi madre, por su gran amor y palabras de aliento al igual, que su paciencia y por enseñarme a no rendirme, y a mi padre, por su esfuerzo constante, sus consejos y el ejemplo de disciplina que siempre me ha guiado. Además, a mi hermano, por su gran personalidad y su compañía y apoyo en este camino, como a mis abuelas, por su cariño, sus palabras sabias y por su gran amor.

De igual manera, a una persona especial que ha estado presente en silencio a lo largo de toda mi vida universitaria, siendo una motivación constante. Aunque los caminos no coincidieron como alguna vez lo imaginé, me deja la tranquilidad de verla feliz, y el recuerdo de aquello que más admiro que es su sonrisa, que en muchos momentos me inspiro y me dio ánimo.

Para todos ustedes, gracias por ser una parte fundamental de este éxito.

Miler Andrés Rocha Suarez

AGRADECIMIENTOS

Nos gustaría expresar nuestros más sinceros agradecimientos a nuestras familias, por el gran apoyo incondicional, como también la comprensión y la motivación constante que nos han brindada durante todo el proceso de formación profesional. Su acompañamiento fue fundamental para afrontar los desafíos académicos y personales que nos ha ayudado para el desarrollo y finalización de este trabajo de grado.

De manera especial, manifiestan su reconocimiento al docente Cristian Andrés Quinchia Aguirre, así como a Mauricio Andrés Rivera Soto y Jesús Flaminio Ospitia Prada, por su orientación, disposición y valiosos aportes académicos, los cuales contribuyeron significativamente al fortalecimiento del proyecto y al crecimiento profesional de los autores. Su acompañamiento y compromiso fueron determinantes para la culminación satisfactoria de esta etapa.

Asimismo, queremos dar nuestra gratitud a aquellas personas que, directa o indirectamente, aportaron conocimientos, apoyo y motivación para hacer posible el desarrollo y finalización de nuestro trabajo de grado.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	8
ABSTRACT	9
INTRODUCCIÓN	10
1 DEFINICION DEL PROBLEMA	12
1.1. FORMULACION DEL PROBLEMA	12
2 JUSTIFICACIÓN	14
3 OBJETIVOS	16
3.1. OBJETIVO GENERAL	16
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
4 MARCOS DE REFERENCIA	17
4.1 ANTECEDENTES HISTÓRICOS	17
4.2 ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS	17
4.3 MARCO TEÓRICO	20
4.4 MARCO CONCEPTUAL	28
4.5 MARCO LEGAL	29
4.6 MARCO GEOGRÁFICO	31
4.7 MARCO DEMOGRÁFICO	32
5 DELIMITACION	34
6 METODOLOGÍA	35
6.1 DISEÑO DE INVESTIGACIÓN	35
6.2 ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN	35
7 RECURSOS	37
7.1 RECURSOS HUMANOS	37
7.2 RECURSOS TECNOLOGICOS	37
8 DESARROLLO DE LA INVESTIGACION	39
8.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS	39
8.2 EQUIPOS UTILIZADOS EN LA CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES	39
8.3 PREPARACIÓN DE LA CASCARA DE HUEVO PARA EL DISEÑO DE MEZCLA	43
8.4 CARACTERIZACIÓN GRANULOMÉTRICA DEL AGREGADO GRUESO	47
8.4.1 Análisis de resultados de la granulometría de grava	51
8.5 CARACTERIZACIÓN GRANULOMÉTRICA DE LA ARENA	51
8.5.1 Análisis de resultados de la granulometría de arena	55
8.6 ENSAYO PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA AL DESGASTE DE AGREGADOS GRUESOS, UTILIZANDO LA MÁQUINA DE LOS ÁNGELES	55
8.6.1 Análisis de resultados del ensayo de máquina de los ángeles	58

8.7	ENSAYO DE DENSIDAD Y ABSORCIÓN PARA MATERIAL GRUESO	58
8.7.1	Análisis de resultados de ensayo de densidad y absorción para material grueso	62
8.8	ENSAYO DE DENSIDAD Y ABSORCIÓN PARA AGREGADO FINO	62
8.8.1	Análisis de resultados de ensayo de densidad y absorción para material fino	64
8.9	ENSAYO PARA DETERMINAR LA MASA Y VACIOS UNITARIOS DEL AGREGADO GRUESO Y FINOS	65
8.9.1	Análisis de resultados la masa y vacíos unitarios del agregado grueso y finos	68
8.10	ENSAYO DE EQUIVALENTE DE ARENAS	68
8.10.1	Análisis de resultados del ensayo de equivalente de arenas	70
9	DISEÑO DE MEZCLA DE CONCRETO	72
9.1	ELABORACIÓN Y CURADO DE ESPECIMENES DE CONCRETO PARA ENSAYOS EN EL LABORATORIO SIN SUSTITUCIÓN	81
9.1.1	Análisis de resultados de ensayos en cilindros de concreto fallados	83
9.2	PREPARACIÓN Y CURADO DE MUESTRAS DE CONCRETO PARA PRUEBAS EN LABORATORIO CON SUSTITUCIÓN	87
9.2.1	Análisis de resultados de ensayos en cilindros de concreto fallados	89
9.3	ELABORACIÓN Y CURADO DE ESPECÍMENES DE CONCRETO SIN SUSTITUCIÓN PARCIAL DEL CEMENTO, CONSIDERANDO EL REAJUSTE DE LA CANTIDAD DE CEMENTO Y LA HUMEDAD DE LOS AGREGADOS	93
9.3.1	Análisis de resultados de ensayos en cilindros de concreto fallados	95
9.4	ELABORACIÓN Y CURADO DE ESPECÍMENES DE CONCRETO CON SUSTITUCIÓN PARCIAL DEL CEMENTO, CONSIDERANDO EL REAJUSTE DE LA CANTIDAD DE CEMENTO Y LA HUMEDAD DE LOS AGREGADOS	99
9.4.1	Análisis de resultados de ensayos en cilindros de concreto fallados con el reajuste y con implementación de cascara de huevo	101
9.5	ANÁLISIS VISUAL	105
9.6	ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN CILINDROS DE CONCRETO CON Y SIN SUSTITUCIÓN... ¡Error! Marcador no definido.	
9.7	ANÁLISIS VISUAL CON CORRECCIÓN DE CANTIDAD DE CEMENTO	108
9.8	COMPARACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN CILINDROS DE HORMIGÓN CON SUSTITUCIÓN Y SIN ELLA con el ajuste de cemento	110
10	CONCLUSIONES	112
11	RECOMENDACIONES	114
	REFERENCIAS	115

LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Árbol de problema.	13
Ilustración 2. Árbol de soluciones.	13
Ilustración 3. Mapa de Colombia.	31
Ilustración 4. Localización de Girardot en el mapa de Colombia.	31
Ilustración 5. Mapa de zonas sísmicas.	32
Ilustración 6. Metodología de manera grafica.	36
Ilustración 7. Curva granulométrica de la grava.	50
Ilustración 8. Máxima cantidad de material que se permite que quede retenido en un tamiz, en kilogramos.	50
Ilustración 9. Curva granulométrica de la arena.	54
Ilustración 10. Curva de carga de rotura de probetas de concreto a 7 días sin sustitución. ...	84
Ilustración 11. Curva de carga de rotura de probetas de concreto a 14 días sin sustitución. .	84
Ilustración 12. Curva de carga de rotura de probetas de concreto a 28 días sin sustitución. .	85
Ilustración 13. Desarrollo de la resistencia mecánica del concreto a 7, 14 y 28 días de curado.	86
Ilustración 14. Porcentaje de resistencia alcanzada del concreto según la edad de curado ..	87
Ilustración 15. Curva de carga de rotura de probetas de concreto a 7 días con sustitución. ...	89
Ilustración 16. Curva de carga de rotura de probetas de concreto a 14 días con sustitución. .	90
Ilustración 17. Curva de carga de rotura de probetas de concreto a 28 días con sustitución.	¡Error! Marcador no definido.
Ilustración 18. Curva de carga de rotura de probetas de concreto a 28 días con sustitución. .	91
Ilustración 19. Desarrollo de la resistencia mecánica del concreto a 7, 14 y 28 días de curado con sustitución.	92
Ilustración 20. Porcentaje de resistencia alcanzada del concreto según la edad de curado con sustitución.	93
Ilustración 21. Curva de carga de rotura de probetas de concreto a 7 días sin sustitución con mezcla reajustada.	96
Ilustración 22. Curva de carga de rotura de probetas de concreto a 14 días sin sustitución con mezcla reajustada.	96
Ilustración 23. Curva de carga de rotura de probetas de concreto a 28 días sin sustitución con mezcla reajustada.	97
Ilustración 24. Desarrollo de la resistencia mecánica del concreto a 7, 14 y 28 días de curado con reajuste.	98
Ilustración 25. Porcentaje de resistencia alcanzada del concreto según la edad de curado con reajuste.	99
Ilustración 26. Curva de carga de rotura de probetas de concreto a 7 días con sustitución y reajuste.	101
Ilustración 27. Curva de carga de rotura de probetas de concreto a 14 días con sustitución y reajuste.	102
Ilustración 29. Curva de carga de rotura de probetas de concreto a 28 días con sustitución y reajuste.	102
Ilustración 30. Desarrollo de la resistencia mecánica del concreto a 7, 14 y 28 días de curado con sustitución.	103
Ilustración 31. Porcentaje de resistencia alcanzada del concreto según la edad de curado con sustitución y reajuste.	104

LISTA DE TABLA

Tabla 1. Antecedentes con sustitución parcial de cascara de huevo en el cemento.	19
Tabla 2. Propiedades mecánicas de matrices cementicas con la incorporación de cáscara de huevo pulverizada y deshidratada	21
Tabla 3. Composición química del cemento.	23
Tabla 4. Equipos utilizados para los ensayos.	39
Tabla 5. Procedimientos acerca de la preparación de la cáscara de huevo.	46
Tabla 6. Registro fotográfico del procedimiento del ensayo de granulometría de arena.	47
Tabla 7. La dimensión de la muestra, conforme al tamaño nominal máximo.	48
Tabla 8. Datos de ensayo granulométrico de la grava por medio de tamices.....	49
Tabla 9. Porcentajes de Límite inferior y límite superior.	49
Tabla 10.Registro fotográfico del procedimiento del ensayo de granulometría de arena.	52
Tabla 11. El tamaño de la muestra en relación con el tamaño nominal máximo.	52
Tabla 12. Datos de ensayo granulométrico de la arena por medio de tamices.	53
Tabla 13. Porcentajes de Límite inferior y límite superior para arenas.	54
Tabla 14. Registro fotográfico del ensayo de máquina de los ángeles.	55
Tabla 15. Peso de la muestra para el ensayo.....	56
Tabla 16. Tipo de gradación de acuerdo con la masa de la muestra.	57
Tabla 17. Datos y resultado del ensayo de la máquina de los ángeles.	57
Tabla 18. Registro fotográfico para ensayo de densidad y absorción.	58
Tabla 19. Muestra mínima para la prueba de densidad y absorción de agregados gruesos. .	60
Tabla 20. Datos obtenidos a partir del ensayo de densidad y absorción del agregado grueso.	60
Tabla 21. Datos obtenidos del ensayo de densidad y absorción del agregado grueso	61
Tabla 22. Registro fotográfico para el ensayo de densidad y absorción para agregado fino. .	62
Tabla 23. Datos obtenidos a partir del ensayo de densidad y absorción del agregado fino. ..	64
Tabla 24. Registro fotográfico para el ensayo de determinación de masa y vacíos unitarios. .	65
Tabla 25. Datos para el cálculo de la masa unitaria del agregado fino en condición compactada.	66
Tabla 26. Resultados obtenidos de finos compactados.....	66
Tabla 27. Datos para el cálculo de la masa unitaria del agregado fino en condición suelta. ..	66
Tabla 28. Resultados obtenidos de finos sueltos.....	67
Tabla 29. Datos para el cálculo de la masa unitaria del agregado grueso en condición compactada.	67
Tabla 30. Resultados obtenidos de gruesos compactados.....	67
Tabla 31. Datos para el cálculo de la masa unitaria del agregado grueso en condición suelta.	68
Tabla 32. Resultados obtenidos de gruesos sueltos.	68
Tabla 33. Registro fotográfico del ensayo de equivalente de arena.	68
Tabla 34. Resultados obtenidos aplicando la formula mencionada anteriormente.	70
Tabla 35. Para construir capas asfálticas con una mezcla asfáltica natural, se requieren agregados pétreos combinados.....	71
Tabla 36. Datos de los materiales empleados en el diseño de mezcla de concreto.	73
Tabla 37.Resistencia promedio requerida para el diseño de mezcla.....	74
Tabla 38. Selección del asentamiento del concreto (ACI 211.1)	74

Tabla 39. Volumen de agua para mezclar según el asentamiento y las dimensiones máximas del agregado.....	75
Tabla 40. Relación agua/cemento en función de la resistencia a la compresión del concreto.	75
Tabla 41. El volumen de agregado grueso seco que se compacta por cada unidad de volumen de concreto.	76
Tabla 42. Agua de mezcla calculada y contenido de aire para varias colonias y dimensiones máximas nominales del agregado.	77
Tabla 43. Dosificación final de la mezcla de concreto por metro cúbico.....	78
Tabla 44. Dosificación de materiales para la elaboración de cilindros de ensayo.	79
Tabla 45. Corrección por humedad de los agregados.	80
Tabla 46. Aporte de humedad de los agregados	80
Tabla 47. Dosificación reajustada del diseño de mezcla.	81
Tabla 48. Registro fotográfico del ensayo para la creación de especímenes.	82
Tabla 49. Resistencia a la compresión de cilindros de concreto sin reemplazo en diversas edades de curado.	85
Tabla 50. Registro fotográfico del ensayo para la creación de especímenes.	88
Tabla 51. Resistencia a la compresión de cilindros de concreto con sustitución a diferentes edades de curado.	91
Tabla 52. Registro fotográfico del ensayo para la creación de especímenes con reajuste de cemento.	94
Tabla 53. Resistencia a la compresión de cilindros de concreto sin reemplazo en diversas edades de curado.	97
Tabla 54. Registro fotográfico del ensayo para la creación de especímenes.	100
Tabla 55. Resistencia a la compresión de cilindros de concreto con sustitución a diferentes edades de curado y con el reajuste.	103
Tabla 56. Análisis visual de los cilindros.	106
Tabla 57. Comparación de la resistencia a compresión en concreto con y sin sustitución parcial de cemento.	107
Tabla 58. Análisis visual de los cilindros Ajustados	109
Tabla 59. Evaluación de la resistencia a compresión entre el concreto convencional y el concreto que incluye una sustitución parcial de cáscara de huevo con el reajuste de cemento	110

RESUMEN

El proyecto está enfocado en primer lugar en dar conocimiento de la fabricación del cemento como una de las fuentes primordiales de emisión de CO_2 y son asociadas al sector de la construcción, lo que ha impulsado a la búsqueda de materiales alternativos que permitan mitigar su consumo que no interfiere con el funcionamiento de las estructuras de concreto. Por lo tanto, el principal objetivo del trabajo actual fue el analizar el comportamiento mecánico de un concreto hidráulico al que se le reemplazó parcialmente el 10 % del contenido de cemento con desechos de cascarilla de huevo triturada y tamizada, con el propósito de determinar si puede funcionar como materia alternativa para mezclas de concreto.

La metodología experimental comprendió la caracterización de los agregados, el procesamiento del residuo de cáscara de huevo mediante el debido tratamiento de ellas por medio de la limpieza, secado, trituración y tamizado por malla No. 200, y el diseño de mezcla conforme al método ACI 211 de (Cordero, Cardenas, & Suarez, 2022). Se elaboraron dos dosificaciones: una mezcla patrón sin sustitución y una mezcla modificada con reemplazo del diez por ciento del cemento por cáscara de huevo, manteniendo las mismas condiciones de elaboración, curado y ensayo. Posteriormente, se fabricaron especímenes cilíndricos y se analiza su resistencia a la compresión de los 7, 14 y 28 días las cuales son los intervalos de tiempo para el curado y de las pruebas mediante prensa hidráulica.

Los datos revelaron que el concreto convencional pudo alcanzar una resistencia de compresión de 32,8 MPa en la última prueba realizada a los 28 días, mientras que la mezcla con sustitución obtuvo 29,9 MPa, valor equivalente al 102 % de la resistencia de diseño establecida. Aunque la incorporación de cáscaras de huevo produjo una evidente y leve reducción de la capacidad de resistencia respecto a la mezcla patrón, el mortero modificado mantuvo un comportamiento mecánico aceptable y cumplió con la resistencia requerida.

Se determina que reemplazando parcialmente el 10 % del cemento por cáscaras de huevo molidas y tamizadas constituye una alternativa técnicamente viable en condiciones controladas de laboratorio, al permitir reducir parcialmente el consumo de cemento sin comprometer el cumplimiento de la resistencia a compresión exigida para la mezcla evaluada. Asimismo, su uso representa una alternativa con potencial de aprovechamiento de residuos dentro de enfoques de construcción más sostenible.

Palabras clave: concreto hidráulico, sustitución parcial de cemento, cáscara de huevo, resistencia a la compresión, sostenibilidad.

ABSTRACT

The project is primarily focused on raising awareness about cement manufacturing as one of the main sources of CO₂ emissions associated with the construction sector, which has encouraged the search for alternative materials capable of reducing its consumption without affecting the performance of concrete structures. Therefore, the main objective of the present study was to analyze the mechanical behavior of hydraulic concrete in which 10% of the cement content was partially replaced with crushed and sieved eggshell waste, in order to determine whether it can function as an alternative material for concrete mixtures.

The experimental methodology included the characterization of aggregates, the processing of eggshell waste through proper treatment consisting of cleaning, drying, crushing, and sieving using a No. 200 sieve, as well as the mix design according to the ACI 211 method by (Cordero, Cardenas, & Suarez, 2022). Two mix proportions were prepared: a control mixture without replacement and a modified mixture with a ten percent replacement of cement by eggshell, maintaining the same preparation, curing, and testing conditions. Subsequently, cylindrical specimens were manufactured, and their compressive strength was analyzed at 7, 14, and 28 days, corresponding to the curing and testing periods using a hydraulic press.

The results revealed that conventional concrete achieved a compressive strength of 32.8 MPa in the final test conducted at 28 days, while the mixture with replacement obtained 29.9 MPa, equivalent to 102% of the established design strength. Although the incorporation of eggshells produced a slight decrease in strength compared to the control mixture, the modified mortar maintained acceptable mechanical behavior and complied with the required strength.

It was determined that partially replacing 10% of the cement with ground and sieved eggshells constitutes a technically viable alternative under controlled laboratory conditions, as it allows for a partial reduction in cement consumption without compromising the required compressive strength of the evaluated mixture. Furthermore, its use represents an alternative with potential for waste utilization within more sustainable construction approaches.

Keywords: hydraulic concrete, partial cement replacement, eggshell, compressive strength, sustainability.

INTRODUCCIÓN

La mezcla de concreto convencional es considerado como el material compuesto más fundamental en la elaboración de proyectos de construcción, dadas sus propiedades y sus amplios usos en diferentes tipos de estructuras. Por este motivo, es crucial que las características de su diseño de mezcla sean las más apropiadas para asegurar su óptimo rendimiento. Para ello, es necesario que los diferentes elementos que forman parte de su composición cumplan con ciertos estándares y requisitos técnicos. De esta forma, la presente investigación está centrada en la sustitución parcial del cemento, material cementante principal, mediante el uso de cáscara de huevo previamente procesada y tamizada.

Ante esta necesidad de mejorar el rendimiento y la sostenibilidad del concreto, en estos últimos años, se han incrementado el interés por incluir materiales alternativos en las mezclas de concreto para disminuir parcialmente el porcentaje de cemento utilizado sin afectar la calidad del material. Dentro de estas alternativas, la cascara de huevo ha despertado interés en el campo investigativo por el alto contenido de calcio y por su potencial de aprovechamiento como un residuo en mezclas cementicias. Diversos estudios han reportado resultados favorables al incorporar este material como sustituto parcial del cemento, particularmente en porcentajes bajos, donde se han observado comportamientos mecánicos comparables al concreto convencional.

A partir de estos antecedentes, se ha identificado que sustituciones cercanas al 10 % representan un punto de equilibrio adecuado entre el aprovechamiento del residuo y el mantenimiento de las características mecánicas del hormigón. Por debajo de este valor, el impacto sobre la reducción del consumo de cemento es limitado, mientras que porcentajes superiores tienden a afectar progresivamente la resistencia debido a la disminución del contenido efectivo de material cementante. En este sentido, el 10 % de sustitución se establece como un valor técnicamente pertinente para evaluar la viabilidad del material dentro de la mezcla.

No obstante, aunque múltiples investigaciones han estudiado la incorporación de cáscara de huevo en mezclas cementicias, gran parte de estos trabajos emplean tratamientos previos que incluyen procesos de calcinación o transformación térmica del residuo incrementa el consumo energético y reduce su ventaja ambiental. En estas circunstancias, se hace necesario analizar opciones de integración más sencillas que posibiliten el uso de este residuo sin la necesidad de emplear procesos que requieran mucha energía, preservando a su vez un comportamiento mecánico adecuado en el concreto.

Bajo este enfoque, la presente investigación evalúa la conducta mecánica de un mortero hidráulico con un intercambio parcial del 10 % del material cementicio por cascarilla del huevo molido y tamizada, incorporada sin tratamiento térmico y con un procesamiento simplificado basado en limpieza, secado, trituración y tamizado por malla No. 200. El estudio se desarrolla mediante la comparación experimental entre una mezcla convencional y una mezcla modificada, ambas diseñadas según la metodología ACI 211 y evaluadas a través de pruebas de calidad a la resistencia después de un curado sumergido del espécimen en un intervalo de 7, 14 y 28 días.

Por esta razón, el estudio tiene como objetivo establecer si un enfoque simplificado para el tratamiento de la cáscara de huevo, sin procesos térmicos de alta demanda energética, permite conservar un desempeño mecánico aceptable y cumplir con la resistencia de diseño establecida, aportando evidencia técnica sobre su posible aprovechamiento como material alternativo en mezclas de concreto bajo condiciones controladas de laboratorio.

1 DEFINICION DEL PROBLEMA

En el mundo de la construcción, el principal material que se usa es el concreto que es el recurso más empleado y su componente fundamental, el cemento, tiene una capacidad de generar una gran cantidad de CO₂ durante su producción. Por lo tanto, es de los principales emisores de gas a nivel global. Se calcula que cerca del 40% de la contaminación es el resultado de tareas que están directa o indirectamente vinculadas a la construcción. Para cada metro cuadrado de construcción, se necesitan hasta 2 toneladas de materias primas. (Garcia, Quito, & Perdomo, 2020)

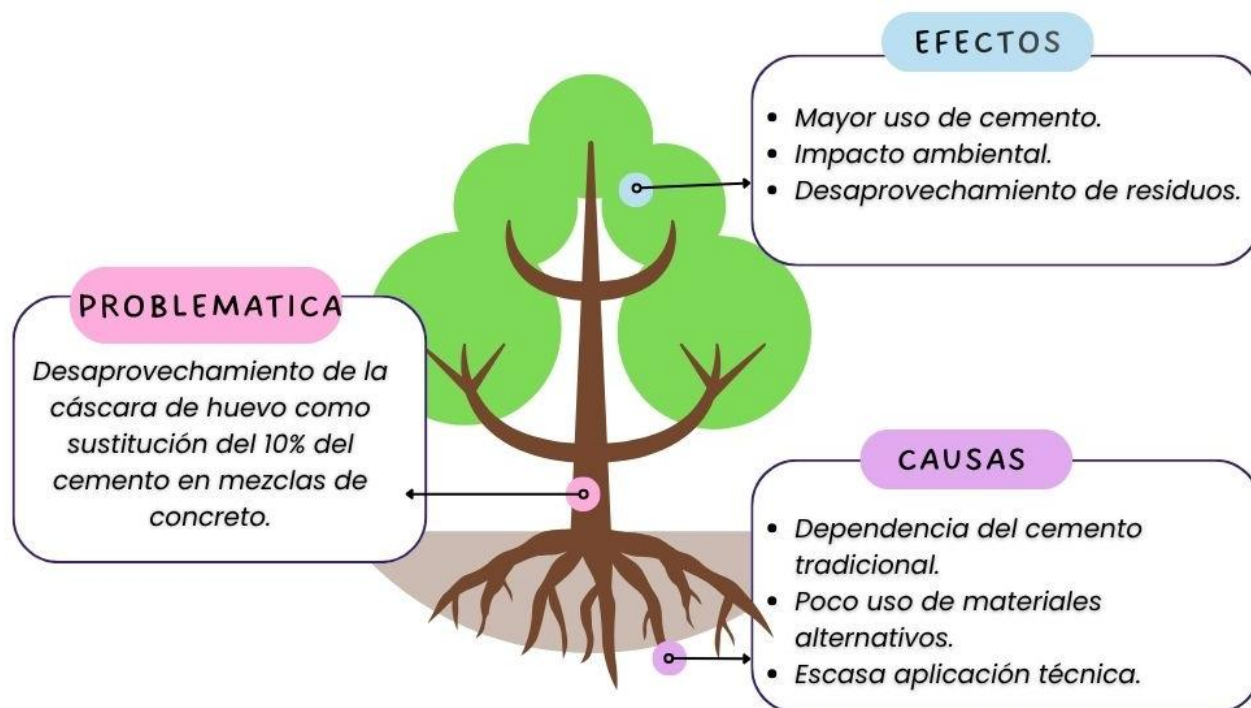
Uno de los materiales que más contribuye a esta problemática ambiental es el cemento, debido a su alta demanda y al impacto generado durante su producción. Aunque en Colombia existen medidas orientadas a la construcción sostenible, como el Decreto 1285 en el (Departamento Administrativo de la Función Pública, 2015), que requieren alternativas técnicas que permitan disminuir el uso de materiales convencionales. En este contexto, los desechos de cáscara de huevo son un tipo de residuo orgánico generado en grandes volúmenes y que, con frecuencia, no se utiliza de manera apropiada. Por lo tanto, es necesario examinar su efecto en propiedades esenciales como la habilidad de resistir la compresión y la facilidad de trabajo para establecer su empleo como un reemplazo parcial del cemento en las mezclas que forman el concreto.

1.1. FORMULACION DEL PROBLEMA

Para entender los distintos puntos de la problemática que el presente proyecto busca solucionar, es necesario plantear la siguiente pregunta clave:

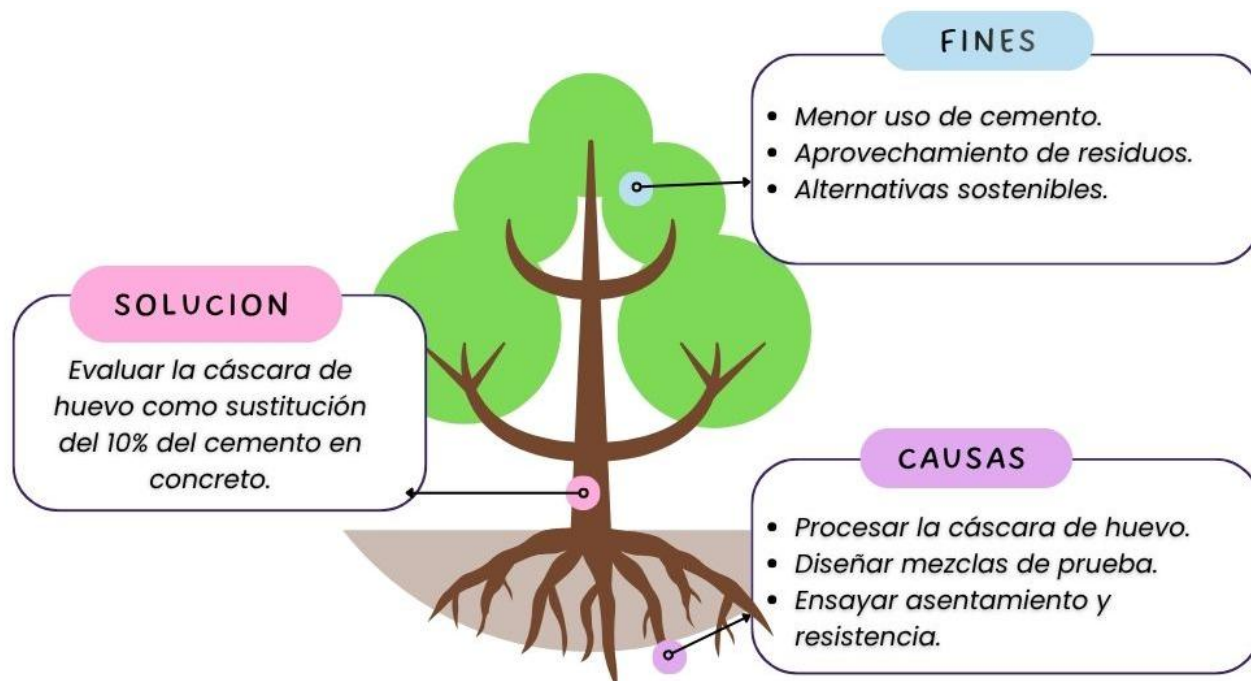
¿De qué forma impacta la utilización de cáscara de huevo molida, en una proporción del 10%, en preparación de la mezcla de concreto y en sus atributos físicas y mecánicas, tales como lo es la trabajabilidad y la resistencia de la compresión?

Ilustración 1. Árbol de problema.



Fuente: Autoría propia

Ilustración 2. Árbol de soluciones.



Fuente: Autoría propia.

2 JUSTIFICACIÓN

Se considera que en el ámbito del sector constructivo es de los que más generan CO₂ a nivel global, causando efectos ambientales notables en cada etapa del ciclo vital de los edificios. En este marco, se entiende que "las actividades relacionadas con la construcción y su impacto ambiental van más allá de la fase constructiva, ya que influyen durante todo el ciclo de vida del objeto construido" (García, Quito, & Perdomo, 2020). En consecuencia, se ha incrementado el interés por desarrollar materiales alternativos que permitan optimizar recursos sin comprometer el desempeño estructural del concreto.

El concreto constituye uno de los componentes más empleados en el sector de las edificaciones, por lo que sus propiedades en referencia a la mecánica, particularmente su resistencia por la compresión, por consiguiente, cualquier variación en su dosificación debe analizarse técnicamente con el propósito de comprobar que satisfaga los requerimientos establecidos por la normativa y las condiciones de servicio. Bajo esta perspectiva, la utilización de residuos de cáscara de huevo como sustituto parcial en el cemento se propone como una alternativa de investigación destinada a evaluar su impacto en las propiedades del concreto, tanto en su etapa de fresco como endurecido. Como nos informan múltiples investigaciones, (Aizpurua, Moreno, & Caballero, 2015) han demostrado que la combinación de cemento con residuos orgánicos como la cáscara de huevo puede mantener propiedades físicas adecuadas en la mezcla, lo que permite reducir costos sin afectar significativamente el desempeño del material.

Adicionalmente, antecedentes técnicos reportan que porcentajes de sustitución cercanos al 10 % presentan un equilibrio adecuado entre desempeño mecánico y aprovechamiento de residuos. Varios estudios sugieren que este porcentaje posibilita una reducción parcial en la cantidad de cemento sin provocar impactos significativos en la durabilidad del material ni en su capacidad de resistir a la compresión. En contraste, porcentajes superiores tienden a producir disminuciones progresivas en las propiedades mecánicas debido a la reducción del contenido efectivo de material cementante en la mezcla. Por esta razón, se adoptó el 10 % como porcentaje de referencia para el presente estudio (Fonseca & Ramirez, 2023)

Desde el enfoque experimental, esta investigación busca verificar mediante ensayos de laboratorio si se puede reemplazar parcialmente el cemento con cáscara de huevo y conseguir resistencias que sean similares o más altas que las del concreto convencional., manteniendo condiciones adecuadas de trabajabilidad, compactación y curado. El análisis de los resultados permitirá establecer la viabilidad técnica del material para su aplicación en elementos no estructurales o, si el desempeño lo permite, en elementos estructurales.

De forma complementaria, la propuesta incluye beneficios para el medio ambiente, dado que la fabricación de cemento es considerada como una de las principales fuentes de emisión de CO₂ en todo el mundo. Se calcula que "cada 1000 gramos de cemento producido generan aproximadamente 900 gramos de CO₂" (Ennomotive, 2019). Por lo tanto, al sustituir parcialmente el cemento por cáscaras de huevo como material cementante, se favorece la disminución de su cantidad y se reducen las emisiones vinculadas a su producción.

En relación con el impacto ambiental y la sostenibilidad, la reutilización de residuos orgánicos en la construcción se combina con los fundamentos de economía circular y con los ODS (ODS)

que la ONU ha adoptado. En concreto, está vinculado con el ODS 11, que tiene como objetivo disminuir la huella medioambiental negativa de las ciudades a través de su meta 11.6. de una adecuada gestión de residuos, y con el Objetivo de Desarrollo Sostenible 12, que en sus metas 12.2 y 12.5 promueve la disminución, reciclado y reutilización de residuos, así como la utilización eficaz de los recursos naturales. En esta línea, añadir cáscaras de huevo a la mezcla de concreto ayuda a reducir los residuos y al aprovechamiento responsable de materiales, fortaleciendo prácticas constructivas más sostenibles. (Asamblea de las Naciones Unidas, 2023).

3 OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

Establecer la factibilidad de una combinación de concreto hidráulico que reemplaza parcialmente el cemento con un 10% de cáscara de huevo molida, mediante la evaluación de su rendimiento

mecánico, para analizar su capacidad como material alternativo en elementos estructurales.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Realizar la evaluación de los materiales utilizados en la mezcla a través de pruebas de granulometría, densidad, absorción, masa unitaria y resistencia al desgaste, conforme a lo establecido en las Normas Técnicas Colombianas (NTC).
2. Preparación de la cáscara de huevo mediante procesos de recolección, limpieza, secado, trituración y tamizado, con el propósito de obtener un material adecuado para emplearse como reemplazo parcial del cemento, analizando sus características técnicas y físicas.
3. Elaborar el compuesto de concreto convencional y el modificado con una sustitución del 10%, aplicando la metodología ACI 211.
4. Evaluar y diferenciar la habilidad para resistir a la compresión del concreto común con el del concreto con sustitución parcial, mediante ensayos a 7, 14 y 28 días.

4 MARCOS DE REFERENCIA

4.1 ANTECEDENTES HISTÓRICOS

En las civilizaciones mesopotámicas, egipcias y griegas usaron estrategias de diseño pasivo para trabajar en armonía con la naturaleza, lo que da origen a la arquitectura sostenible. Aunque la sostenibilidad no era un concepto explícito en la Edad Media, se construían edificios duraderos con materiales locales, como piedra y madera. La Revolución Industrial llevó a la construcción a centrarse en la producción masiva, alejándose de la sostenibilidad. Sin embargo, algunos arquitectos, como Frank Lloyd Wright, defendieron la idea de integrar la arquitectura con la naturaleza. El siglo XX vio el renacimiento de la arquitectura sostenible gracias a los avances tecnológicos que permitieron la incorporación de tecnologías verdes. Prominentes arquitectos como Norman Foster, Zaha Hadid y Glenn Murcutt combinaron innovación y respeto ambiental en sus diseños (NAN Arquitectura, 2024).

En el año 1955, 72 familias adquirieron hogares en el vecindario lejano de El Centenario, que es administrado por el Instituto de Crédito Territorial (ICT). Al principio, el área era difícil de acceder porque solo había una trocha como ruta principal y no había mucho transporte. El Centenario ha tenido una evolución a lo largo del tiempo, con tres vías pavimentadas y un sistema de transporte eficiente. Sin embargo, el alcantarillado, que no ha sido renovado desde su construcción original y está sobrecargado debido al crecimiento del vecindario, presenta problemas. La comunidad ha luchado por mejoras en los servicios públicos y ha aprendido que la organización y la exigencia son esenciales para resolver sus problemas (EL TIEMPO , 1999).

4.2 ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

La idea de utilizar cáscaras de huevo en mezclas homogéneas como sustituto del cemento surgió de un proyecto de reemplazo de materiales en 2015, desarrollado por los aprendices; Estiven Frías, Francisco Gómez y Viandy Bravo por medio de la clase de ingeniería civil en Pacheco, según menciona (Caicedo, Frias, Gomez, & Bravo, 2015). Son los primeros involucrados en la creación de este método en la que propusieron un proyecto basado en economía circular destinado a la reutilización de recursos que actualmente se desechan. Con esa idea, los estudiantes crearon una nueva mezcla basada en la cascará de huevo que podía extraer un 5% del calcio para combinarlo con los componentes del cemento y que no afectará su estructura, donde mejora su rendimiento y durabilidad en las construcciones arquitectónicas y de movilidad.

De acuerdo con un proyecto de la Santo Tomás en la sección de Tunja, titulado “Incorporación de cáscaras de huevo como sustituto parcial del material cementante en la elaboración de concreto arquitectónico para mobiliario” (Rafael, 2022) , se examina la búsqueda de materiales sostenibles como una salidad al tema de la contaminación global. El enfoque del proyecto se centra en evaluar la resistencia a la rotura de compresión de diversas combinaciones de amalgama de concreto. El análisis principal consiste en estudiar las propiedades mecánicas de mezclas que utilizan cáscaras de huevo trituradas y calcinadas como una modificación parcial del cemento. Se han llevado el análisis con valores de sustitución del 10%, 20%, 30% y 35% para establecer la viabilidad de esta alternativa. Para asegurar una adecuada adherencia en la mezcla, las cáscaras se someten a procesos de trituración y calcinación (Martínez, 2022).

En un estudio distinto, se analizó el residuo de la cascara de huevo, un desecho ecológico que impacta negativamente en el medio ambiente. Se utilizaron 28.73 kg de cáscaras de huevo para la elaboración de pintura látex en el Centro Piloto de Alimentos, ubicada en la institución educativa nacional Mayor de San Marcos. Las cáscaras fueron recolectadas y sometidas a un proceso que incluyó separación por membrana, secado y molienda. Se formularon tres tipos diferentes de pintura: una con cáscara de huevo, otra combinando cáscara de huevo con TiO_2 , y una tercera convencional. Los análisis fisicoquímicos y estadísticos revelaron que el CaCO_3 presente en las cáscaras tenía un tamaño de partícula adecuado para su uso en pintura, y que el tratamiento que incluía las cáscaras era comparable al estándar, ofreciendo así una alternativa sostenible para la producción de pintura (Burga & Noé, 2018).

En la Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Urbanismo se está llevando a cabo un proyecto enfocado en la preocupación por la contaminación ambiental generada por los residuos industriales, impulsando así la exploración de opciones más sustentables para la rama de la edificación. Este estudio analiza el uso de triturado de desechos cerámicos (PRC) y polvo de cáscara de huevo (PCH) como alternativas parciales del cemento dentro de las mezclas cementantes. Se formularon mezclas que lograron capacidades a la compresión (f'_c) de 210 kg/cm^2 y 280 kg/cm^2 . Las proporciones del PRC fueron evaluadas en 5 %, 10 %, 15 % y 20 %, mientras que el PCH se probó en concentraciones del 2,5 %, 5 %, 7,5 % y 10 %. Los resultados evidenciaron que una mezcla con un 10 % de PRC y un 5 % de PCH potenciaron las propiedades mecánicas del concreto, incluyendo compresión, tracción, flexión y módulo elástico. La combinación de PRC y PCH se ha mostrado como una opción viable para obtener un concreto más resistente (Gupioc & Moya, 2023).

Basado en el proyecto titulado "Uso de cáscara de huevo como reemplazo parcial del material cementante en cubos de mortero que contienen cemento hidráulico" (Gomez, Steven, & Pacheco, 2018), la principal finalidad es analizar la fortaleza ante la compresión de una mezcla de concreto donde se sustituye parte del cemento por cáscaras de huevo trituradas y calcinadas en distintas proporciones desde el 10%, 20%, 30% hasta el 35%. Se llevan a cabo ensayos con muestras cilíndricas de concreto para analizar la viabilidad de este material no convencional en la producción de concreto para mobiliario arquitectónico. Los hallazgos que se han obtenido se comparan con la resistencia promedio de un concreto estándar que es de 21 MPa, equivalente a 3000 PSI. Tras realizar el proceso de trituración y calcinación de las cáscaras de huevo, las pruebas de compresión en laboratorio indican que el concreto con un reemplazo del 10% de cáscaras alcanza una resistencia muy similar a los 21 MPa. Esto sugiere que las cáscaras de huevo podrían representar una opción sostenible en la elaboración de concreto, aplicable en diversas regiones del mundo.

Tras llevar a cabo los ensayos pertinentes, se llega al resultado de que, a pesar de la resistencia del concreto elaborado con cáscaras de huevo no llega a los 3000 PSI, resulta adecuado para su utilización en mobiliario arquitectónico. Esto se debe a que dichos elementos no demandan una alta resistencia estructural ni están expuestos a cargas significativas. En comparación con un "concreto pobre" de 10 MPa, el concreto con un 10 % de sustitución de cáscaras de huevo logró una resistencia de 8,76 MPa, lo cual es suficiente para la fabricación de mobiliario como bancos, bolardos y basureros. Esta estrategia no solo promueve la sostenibilidad, sino que también facilita la implementación de innovaciones tangibles en el diseño del mobiliario urbano.

Tabla 1. Antecedentes con sustitución parcial de cascara de huevo para el cemento.

PROYECTO	% DE SUSTITUCIÓN	RESUMEN	CONCLUSIÓN
"Implementación Cascaras de Huevo como Sustituto Parcial para el Material Cementante en Elaboración de Concreto Arquitectónico para Mobiliario." ("Implementación Cascaras de Huevo como Sustituto Parcial para el ...") Rafael Alejandro Calixto Martínez	Se realizaron pruebas con reemplazos de cemento del 10%, 20%, 30% y 35% para determinar la viabilidad de esta alternativa.	El proyecto evalúa la resistencia a la compresión de concreto al reemplazar parte del cemento con cáscaras de huevo trituradas y calcinadas en proporciones de 10% a 35%.	La investigación muestra que el reemplazo parcial del cemento con cáscaras de huevo en concreto puede mejorar la sostenibilidad sin comprometer significativamente la resistencia, siendo más adecuado para mobiliario arquitectónico no estructural.
"Aprovechamiento de residuos agroindustriales de cascara de huevo como insumo para la elaboración de pintura látex de color" ("Aprovechamiento de residuos agroindustriales de cascara de huevo como ...") Pedro Noé Ricardo Burga Jacobib	En el estudio, se compararon tres formulaciones de pintura látex: la fórmula estándar A (marca TAMSA), la fórmula B que incluye 32.60% de CaCO ₃ de cascara de huevo y 4.89% de TiO ₂ , y la fórmula C que contiene 34.28% de CaCO ₃ de cascara de huevo.	La investigación exploró el uso de cáscaras de huevo para fabricar pintura látex, demostrando que su incorporación no afecta significativamente las propiedades fisicoquímicas de la pintura en comparación con el tratamiento estándar.	La investigación confirma que la cascara de huevo es una alternativa efectiva y sostenible en la fabricación de pintura látex, manteniendo propiedades similares a las del tratamiento estándar y reduciendo el impacto ambiental.
"Evaluación de las propiedades físico-mecánicas del concreto sustituyendo parcialmente el cemento por residuos cerámicos reforzado con cascara de huevo" ("Evaluación de las propiedades físico-mecánicas del concreto ... - USS") Bach. Altamirano Gupioc Anny y Bach. Zapata Moya Raúl Joseph	Se creó un diseño estándar con resistencias de $f'c=210$ kg/cm ² y $f'c=280$ kg/cm ² , y luego se sustituyó el PRC en proporciones de 5%, 10%, 15% y 20%, así como el refuerzo de PCH en porcentajes de 2.5%, 5%, 7.5% y 10% del peso del cemento.	La investigación evaluó el concreto con polvo de residuos cerámicos (PRC) y polvo de cascara de huevo (PCH), encontrando que la combinación óptima de PRC al 10% y PCH al 5% mejora significativamente las propiedades mecánicas del concreto, ofreciendo una alternativa más sostenible.	La combinación óptima de polvo de residuos cerámicos y polvo de cascara de huevo mejora las propiedades mecánicas del concreto, ofreciendo una alternativa sostenible para la construcción.
Influencia de la sustitución del cemento por cenizas de cascara de huevo triturado en las propiedades físicas y mecánicas del concreto 210 kg/cm ² , 2023 (Perez, 2023)	proporciones del 5%, 10% y 15%, formando así tres dosificaciones	El estudio evaluó el impacto de cenizas de cascara de huevo triturado en las propiedades del concreto ($f'c$ 210 kg/cm ²). Se utilizaron 36 probetas con sustituciones de cemento en 5%, 10% y 15%, y se realizaron ensayos de compresión, fraguado y asentamiento según normas peruanas	El estudio muestra que el asentamiento del concreto con ceniza de cascara de huevo triturado se ve afectado cuando la sustitución supera el 15%. Entre el 0% y el 15%, el asentamiento disminuye, lo que sugiere una reducción en la trabajabilidad del concreto. Sin embargo, al superar el 15%, la productividad aumenta. 40 mini

Fuente: Autoría propia información tomada de múltiples fuentes

Por otra parte en un estudio realizado en Turquía y la región de Oriente Medio, en la cual es uno de los lugares en donde más elevado está la producción de materiales aislantes a partir de residuos reutilizados como lo es la clara de huevo, perlita, yeso y cenizas volantes, analizando propiedades como densidad, absorción de agua, conductividad térmica y capacidad de atenuación de radiación gamma, estos los beneficios han sido una aportación importante para elevar la calidad de los materiales constructivos. Los hallazgos encontrados en este proceso se evidenciaron que los materiales presentan baja conductividad térmica, destacándose la perlita por mejorar el aislamiento al reducir este valor. Asimismo, el implementarlo en el yeso incrementa el peso unitario, además de que la clara de huevo aporta propiedades de resistencia a la radiación, aunque disminuye la resistencia mecánica. No obstante, este componente mejora la adherencia entre los materiales (Binici, Aksogan, & Resatoglu, 2018).

También se realizó un estudio en Colombia que exploró la utilización de cascara del huevo triturada (CHT) en calidad de una opción parcial a la mezcla de mortero que contiene cemento, con el propósito de emplear este residuo como una opción más ecológica para la construcción. Al analizar mezclas con sustituciones del 5 % y el 10 %, se tomaron en cuenta propiedades como la capacidad de absorber agua, la trabajabilidad, la compresibilidad y la densidad, debido a su elevado contenido de carbonato cálcico. En la cual pudieron observar que durante los

ensayos que la inclusión de CHT hace más fácil el manejo de la mezcla y disminuye su densidad, lo cual puede ser ventajoso en situaciones donde se necesitan materiales más ligeros (Atencia, Támara, & González, 2024).

En un estudio acerca de la utilización de desechos avícolas, se examinó el reemplazo parcial del cemento por polvo de cáscara de huevo (PCE) en mezclas de concreto, considerando proporciones que varían entre el 5% y el 15%. La investigación se enfocó en evaluar el rendimiento en términos de resistencia y las características de transporte del material.

Los resultados evidenciaron que la incorporación de PCE es viable en proporciones controladas, destacándose el 5% de reemplazo como el porcentaje con mejor desempeño, ya que presentó resistencias superiores al concreto convencional. Asimismo, se observó que hasta un 10% de sustitución, el concreto mantiene un comportamiento similar al de referencia en cuanto a sus propiedades. Adicionalmente, la combinación de PCE con cenizas volantes mostró efectos positivos en el desempeño general del material (Anwar, 2005).

4.3 MARCO TEÓRICO

El concreto, tal como lo comprendemos, se define como una combinación de piedra, arena, agua y cemento. Este material se destaca por ser uno de los más duraderos y frecuentemente empleados en la edificación de cimientos y muros. En varias naciones latinoamericanas, el término "mortero" se utiliza para referirse a la mezcla de agua, cemento y arena, mientras que "hormigón" se aplica cuando el concreto ha sido compactado en su ubicación final.

El concreto se genera a partir de una reacción química que ocurre entre el cemento y el agua, lo que permite que la mezcla adquiera rigidez con el tiempo (Montoya, 2017). El producto obtenido presenta una cierta fragilidad y una resistencia ante la presión que es considerablemente baja en comparación con su capacidad para soportar compresión; esta característica depende de la reacción entre el agua y el material principal el cemento. Estos materiales cuentan con propiedades que influyen en la calidad del trabajo realizado y en el proceso de curado. Una de las ventajas es su adaptabilidad a diversas formas según el molde empleado, gracias a la plasticidad de la mezcla durante su preparación. Para optimizar su comportamiento frente a diferentes tipos de esfuerzos, se añade acero al concreto, resultando en concreto reforzado. El acero cumple múltiples funciones: previene la formación de grietas, incrementa la ductilidad, mejora la resistencia a compresión y soporta fuerzas de tracción.

Este proyecto sugiere reemplazar parcialmente el cemento con cáscaras del huevo, considerando los elementos que conforman el concreto. Este tipo de desecho es uno de los más comunes en nuestro entorno debido a su uso constante en la alimentación. A lo largo del tiempo, las cáscaras de huevo han sido reconocidas como un residuo orgánico que se utiliza comúnmente como fertilizante en la agricultura (Posso, 2020).

Sin embargo, actualmente se encuentra en grandes cantidades dentro de los residuos alimenticios y no se aprovecha de manera adecuada. El análisis del concreto y otros materiales empleados en las edificaciones es uno de los propósitos esenciales de este proyecto, la utilización de cáscara de huevo tiene el potencial de ayudar a reducir los gastos y a reducir la cantidad de residuos, teniendo en cuenta que el concreto es uno de los componentes más utilizados en edificaciones y su producción está relacionada con la generación de desechos y contaminación.

De acuerdo con Calixto (2022), en investigaciones relacionadas con la cáscara de huevo a demostrado que es efectiva cuando se mezcla con cemento que su incorporación puede resultar útil cuando se utiliza en porcentajes reducidos, ya que en ciertas condiciones puede generar mayor resistencia sin producir impactos ambientales negativos. En Colombia se han realizado estudios sobre los desechos sólidos provenientes del consumo de huevo. Según la Federación Nacional de Avicultores (Fenavi), en el año 2023 se consumieron 13.827 millones de huevos, una cifra considerable en comparación con otros países como México. Esto ubica a Colombia como el tercer país con mayor consumo en Latinoamérica, como también en México y Brasil. En consecuencia, una gran cantidad de cáscaras de huevo termina en los residuos sanitarios una vez finaliza su vida útil (Forumnatura natour, 2019).

Asimismo, obtener calcio de la cáscara del huevo supone una alternativa sostenible que permite disminuir la extracción directa de este material del suelo, proceso que conlleva la explotación de los recursos naturales además del uso calderas industriales (Forumnatura natour, 2019). Este tipo de extracción es considerado altamente contaminante dentro de los procesos constructivos y genera un impacto significativo en el ambiente. En este contexto, la cáscara de huevo, al ser un desecho orgánico rico en calcio, se presenta como una opción viable y de bajo costo para su aprovechamiento en la construcción. Su uso en forma de polvo permite incorporarla como aditivo en mezclas de cemento, donde el calcio presente contribuye a mejorar ciertas propiedades del material. Asimismo, durante las reacciones químicas del cemento, compuestos como el silicato de cálcico pueden transformarse en silicato tricálcico, favoreciendo el desarrollo de resistencia en el concreto, de acuerdo con esto a esta información podemos caracterizar la calidad de los tipos de cáscara en función del tipo de huevo que se emplee, según la reacción:

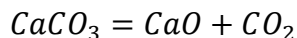
Tabla 2. Propiedades mecánicas de matrices cementicas con la incorporación de cáscara de huevo pulverizada y deshidratada

Propiedades	Formula química	%huevo blanco	%huevo marrón
Características químicas			
Carbonato de calcio	CaCO ₃	94	96-97
Cloruro	CL-	0,058	0,033
Sulfato	SO ₄ ²⁻	0,034	0,022
Azufre	S	0,067	0,063
Materia orgánica	-	6	3,4
Calcita en la membrana	CaCO ₃	97.8	98.3
Carbonato de magnesio	MgCO ₃	0.98	1.30
Fosfato cálcico	Ca ₃ (PO ₄) ₂	0.5	0.8
Perdida por la ignición (g)	-	0.028	0.067
Tamaño de partícula (%)			
Partícula <2 mm	-	100	100
Partícula <0,125 mm	-	80	80
Partícula <0,063	-	65	65
Características físicas			
Blancura (m ² /kg)	-	367	307
Gravedad específica	-	2.5	2.5

Nota. Reiban ojeda, D. V. (2017). Evaluacion experimental de las características mecánicas de matrices cementicias con adición de cascara de huevo pulverizado deshidratado y sus aplicaciones en la arquitectura. Loja - Ecuador : Universidad técnica particular de Loja .

Otro elemento para tener en cuenta para la mezcla es el cemento según habla en la página web (Ciceron, 2020) es un elemento hidráulico, comúnmente conocido como material inorgánico, que constituye el componente principal del concreto premezclado. Este se presenta en forma de un polvo finamente molido, resultado de mezclar piedra caliza, arcilla y mineral de hierro a una temperatura de 1450 °C. con agua, se en una pasta que se por medio de la reacción e hidratación, manteniendo su estabilidad y resistencia. Esto ocurre porque sus elementos se dilatan e hidratan con silicatos de calcio y aluminato. La composición es a causa del óxido de calcio (CaO) y del dióxido de silicio reactivo (SiO₂),

Otro elemento para tener en cuenta para la mezcla es el cemento según habla en la página web (Ciceron, 2020) es un elemento hidráulico, comúnmente conocido como material inorgánico, que constituye el componente principal del concreto premezclado. Este se presenta en forma de un polvo finamente molido, resultado de mezclar piedra caliza, arcilla y mineral de hierro a una temperatura de 1450 °C. Al mezclarse con agua, se transforma en una pasta que se endurece por medio de la reacción e hidratación, manteniendo su estabilidad y resistencia. Esto ocurre porque sus elementos se dilatan e hidratan con silicatos de calcio y aluminato. La composición es a causa del óxido de calcio conocido como el CaO y del dióxido de silicio reactivo (SiO₂), que representan el 50% del peso total.



Es importante destacar que, debido a que el cemento tiene una composición química diferente, existen varios tipos de cemento, incluidos:

- Cemento de arcilla (los ingredientes principales son arcilla y piedra caliza). Esto incluye cemento portland.
- Cemento puzolánico (el ingrediente principal es la ceniza volcánica conocida como puzolana)

- **Composición química**

Sus componentes químicos como lo menciona (Ciceron, 2020) se centran en la temperatura específica de los componentes de este al momento de la toma de decisiones para determinar las cantidades concretas del aditivo CHPC, que contribuirá a analizar las normas que deben cumplirse en la elaboración de estructuras cementicias, dado que son una mezcla común de cemento y CHMC.

El cemento es un silicato de aluminio y calcio. Se elabora por medio del calentamiento en un horno rotatorio inclinado, que tiene un diámetro de 3 m y una longitud de 100 m, a temperaturas cercanas a los 1450 °C. En este proceso se mezclan Polvo de arcilla y piedra caliza para fabricar el clinker, al que se le añade entre un 2% y un 3% de yeso para prevenir que fragüe inmediatamente (Reiban & Veronica, 2017). Los componentes del cemento son:

Tabla 3. Composición química del cemento.

Componente	Formula	Formula óxidos	%
Silicato di cálcico	Ca ₂ SiO ₄	SiO ₂ .2CaO	32%
Silicato tri cálcico	Ca ₃ SiO ₅	SiO ₂ .3CaO	40%
Aluminato tri calcio	Ca ₃ Al ₂ O ₆	Al ₂ O ₃ .3CaO	10%
Ferro aluminato tetra cálcico	Ca ₄ AlFe ₂ O ₁₀	Al ₂ O ₃ .Fe ₂ O ₃ .4CaO	9%
Sulfato de calcio	CaSO ₄		2-3 %

Fuente: Elaboración propia, información tomada de (Reiban & Veronica, 2017)

Como se mencionaba anteriormente el concreto es una mezcla y como lo menciona (Reiban & Veronica, 2017) la proporción de agua y cemento determina el diseño de la mezcla de concreto, que debe garantizar una manejabilidad adecuada para cumplir con los requisitos estructurales y características como resistencia, durabilidad, impermeabilidad, rigidez y trabajabilidad. Los errores en segregación, exudación y compactación suelen causar problemas en estos aspectos. Cuando la resistencia supera 80 kg/cm², es necesario utilizar mezclado mecánico y mantener una relación constante de agua-cemento. Para prevenir la pérdida de resistencia y asegurar que la mezcla sea homogénea.

Para calcular los valores de esfuerzo a partir de los cuales el concreto empezara a agrietarse, es esencial entender la tensión, aunque la mayoría de los diseños estructurales no tenga en cuenta. Según nos indica las (Normas incontest NTC 722, 2008) y la ASTM C496, La resistencia a la tensión se determina generalmente de manera indirecta, utilizando una fuerza de compresión en un cilindro estándar con 30 cm de largo y 15 cm de diámetro. Para lograr esto, se colocan dos líneas en la probeta, las cuales están diametralmente opuestas. Estas líneas tienen un ancho de 25 mm y un grosor de 3 mm, y pueden estar hechas de cartón o madera laminada. La siguiente fórmula se utiliza después del ensayo para calcular la resistencia a la tensión.

$$R_T = \frac{2P}{\pi LD}$$

Debido a que el concreto endurecido es un material que presenta discontinuidades y heterogeneidad, las propiedades de este dependen tanto de los atributos químicos y físicos de sus elementos constitutivos como de la manera en que interactúan entre ellos. El concreto es más fuerte y efectivo cuando se encuentra bajo esfuerzos de compresión, o sea, fuerzas que buscan unir sus partes. Los cilindros, que tienen Para determinar su durabilidad a la compresión, se somete a pruebas en condiciones controladas. Se Tienen especímenes de una altura de hasta 30 cm y un diámetro total de 15 cm. Por lo general, se pueden analizar a los 1, 3, 7 y 14 días después del curado para obtener resultados más rápidamente; no obstante, generalmente se analizan después de un mes. Aunque el concreto tiene la capacidad de lograr resistencias más altas de 200 MPa al utilizar mezclas y aditivos particulares, las resistencias comunes de los componentes estructurales varían entre 21 MPa y 35 MPa (Reiban & Veronica, 2017).

Para determinar la resistencia del concreto, se llevan a cabo diversos ensayos, siendo uno de los más comunes el ensayo de compresión de cilindros. Este procedimiento utiliza cilindros de 30 cm de longitud y 15 cm de diámetro. Tras ser vaciados y curados, los cilindros son sometidos a una prueba de compresión en un equipo especializado. Durante esta prueba, se aplica una fuerza axial hasta que ocurre la fractura del cilindro. La resistencia se calcula dividiendo la máxima fuerza aplicada por el área de la sección transversal del cilindro. En Estados Unidos, esta medida se expresa en PSI (libras por pulgadas cuadradas), mientras que en el sistema internacional se utiliza MPa (mega pascales). Es necesario curar al menos dos cilindros de la misma muestra durante 28 días, aunque también es posible estimar resistencias para muestras curadas a los 7 y 14 días.

Otra prueba relevante es el ensayo de asentamiento, que evalúa la relación agua-cemento en el concreto y está regulada por la norma ASTM C143 desde 2003. Para realizar este ensayo, el concreto debe estar en estado plástico y no tener un contenido excesivo de agregado grueso mayor a 37.5 mm. Se establecen límites para los asentamientos: un asentamiento inferior a media pulgada podría indicar una falta de plasticidad, mientras que un asentamiento superior a nueve pulgadas puede señalar problemas de cohesión.

Se destacan ensayos de laboratorio que evalúan el comportamiento de estos nuevos materiales, como el análisis de granulometría, que mide la consistencia del suelo, determinada a partir de la dimensión de las partículas y la evaluación de equivalentes de arena, que examina la calidad de los agregados finos al identificar materiales limosos y arcillosos, capaces de influir negativamente en la durabilidad del concreto. La resistencia al desgaste de los agregados se examina a través del ensayo con la máquina de Los Ángeles. Todos estos ensayos son fundamentales para asegurar la calidad de la construcción y continúan regulaciones particulares como INVIAS, ASTM y NTC.

La granulometría representa uno de los ensayos fundamentales para la caracterización de materiales, ya que se trata de un análisis físico que permite identificar la distribución de tamaños de las partículas que forman un agregado o un suelo. Este tipo de estudio facilita la clasificación de los materiales en función de sus diámetros y contribuye a comprender su rendimiento en distintas aplicaciones dentro de la ingeniería civil. En este ensayo, se emplea el método de tamizado, que consiste en hacer pasar el material a través de una serie de tamices con aberturas variadas, lo que permite separar las partículas finas de las gruesas. La caracterización de agregados para la construcción se realiza frecuentemente mediante este proceso, dado que ayuda a determinar la gradación del material (ICONTEC, 1994).

Durante la elaboración del ensayo, se realizan diversos cálculos, que abarcan el porcentaje retenido, el porcentaje acumulado retenido y la fracción que pasa a través de cada tamiz. El cálculo del porcentaje retenido se determina como la relación entre el peso del material que queda en cada tamiz y el peso total de la muestra; este se expresa mediante una ecuación. Las ecuaciones posteriores están basadas en la NTC 77. (ICONTEC, 2013).

$$\%wret = \frac{wret}{total\ wret}$$

El porcentaje retenido acumulado corresponde a lo que se muestra en la ecuación que equivale a la adición de los porcentajes retenidos en los tamices anteriores:

$$\% \text{ retenido acumulado} = \sum \% \text{ retenido}$$

Para calcular el porcentaje que pasa por cada tamiz, se debe restar el porcentaje acumulado retenido de 100 según la fórmula.

$$\% \text{ que pasa} = 100 - \% \text{ retenido acumulado}$$

Con los resultados que se obtienen para la arena se obtendrá el porcentaje de finura en la cual nos dará el rango de finura que tiene el material, este porcentaje se obtiene con la siguiente fórmula.

$$MF = \frac{\sum W_{\text{ret. Acumulado}}}{100}$$

Después de abordar el análisis granulométrico y las fórmulas que permiten caracterizar la distribución de tamaños, se procede a investigar las dimensiones de las partículas de desgaste utilizando el aparato de los Ángeles. Este ensayo tiene como objetivo evaluar la resistencia de los agregados gruesos a la abrasión y al impacto. De acuerdo con la norma NTC 98 del ICONTEC, este procedimiento establece el método para determinar la resistencia a la erosión en agregados con un tamaño inferior a 37,5 mm. Para ello, se someten a cargas abrasivas en un tambor rotatorio junto con esferas de acero. Durante el ensayo, el material sufre fricción e impacto, lo que provoca la desintegración de las partículas más débiles. Posteriormente, mediante un proceso de tamizado, se cuantifica la pérdida de material y se evalúa su comportamiento bajo condiciones de servicio (ICONTEC, 2006). La siguiente ecuación muestra cómo se calcula el desgaste, basado en la relación entre el peso inicial y final de la muestra:

$$\% \text{ de desgaste} = \frac{DI - DF}{DI} * 100$$

Donde

DI = Peso inicial

DF = Peso final

Este valor refleja el grado de calidad del agregado, dado que una menor cantidad de desgaste se traduce en una mayor resistencia y, por consiguiente, un mejor rendimiento en aplicaciones como la producción de concreto. En este contexto, la prueba de la máquina de Los Ángeles complementa el análisis granulométrico al considerar no solo la distribución de tamaños, sino también la capacidad del material para soportar esfuerzos mecánicos. Esto proporciona criterios significativos para la adecuada selección de agregados en el diseño de mezclas. (ICONTEC, 2006).

Otro elemento relevante para considerar es la densidad nominal, que juega un papel crucial en la evaluación de los materiales de construcción. Esta propiedad establece una relación entre la masa y el volumen del agregado, excluyendo los vacíos permeables. Es fundamental para asegurar la calidad y resistencia de las mezclas de concreto, especialmente en el caso de agregados gruesos, debido a su impacto en la dosificación y el comportamiento del material. La determinación de esta densidad se lleva a cabo mediante la medición del peso y el volumen del agregado bajo diversas condiciones, como en estado seco y saturado, conforme a lo estipulado por la norma. (ICONTEC, 1995), y se calcula de la siguiente forma:

$$Ds Bulk = \frac{0,9975 \times A}{(A - C)}$$

Donde:

- A representa la masa de la muestra en aire, seca al horno, medida en gramos;
- B indica la masa de esa misma muestra en aire, pero que está superficialmente saturada, también expresada en gramos;
- C se refiere a la masa de la muestra que se encuentra saturada y sumergida en agua, igualmente expresada en gramos.

Estos valores son fundamentales para determinar tanto la absorción como la densidad del agregado grueso.

Otra manera de calcular es a través de la densidad relativa, que establece la relación entre la densidad del agregado y la del agua. Este parámetro es relevante para analizar el comportamiento del material en las mezclas de concreto. Se determina utilizando los valores obtenidos durante la prueba, como se indica a continuación:

$$Ds\ relativa\ sh = \frac{A}{(B - C)}$$

Otro factor a considerar es la densidad relativa en estado saturado superficialmente seco (SSS), que indica la relación entre la masa del agregado en esta condición y su volumen. En este estado, los poros están llenos de agua, pero no hay un exceso de esta en la superficie. Este parámetro es importante para el diseño de mezclas, ya que refleja una condición que se asemeja más al comportamiento del material dentro del concreto y se determina mediante la siguiente ecuación:

$$Ds\ relativa\ sh = \frac{B}{(B - C)}$$

La densidad representa un parámetro importante para los agregados finos, ya que está directamente relacionada con la cantidad de espacios vacíos en el material y con la proporción de los componentes en la mezcla de concreto. Esta propiedad permite analizar cómo se comporta la arena en la mezcla, lo cual influye en aspectos como la cohesión, la trabajabilidad y la resistencia final. La densidad del agregado fino se determina bajo diversas condiciones, incluyendo seca, saturada superficialmente seca (SSS) y aparente, siguiendo las directrices establecidas por las normativas aplicables, de manera análoga a lo que ocurre con los agregados gruesos (ICONTEC, 1995). Su cálculo se realiza a partir de las relaciones entre masa y volumen obtenidas durante el ensayo.

En primer lugar, se determina la densidad aparente, que tiene en cuenta el volumen total del material, incluyendo los espacios vacíos.

$$Ds\ aparente = \frac{0.9975 * A}{B + S - C}$$

$$Ds\text{ aparente} = \frac{0.9975 * A}{B + S - C}$$

La densidad aparente (D), expresada en g/cm³, se determina a partir de diversas masas registradas durante el ensayo. La variable A corresponde a la masa de la muestra que ha sido secada en el horno, medida en gramos. La variable B representa la masa del picnómetro lleno completamente de agua, también en gramos. Por su parte, C indica la masa del picnómetro que contiene tanto la muestra como el agua hasta alcanzar la marca de calibración (igualmente en gramos), y S denota la masa de la muestra cuando está saturada y superficialmente seca. Posteriormente, se define la densidad relativa, que establece una comparación entre la densidad del agregado y la del agua, permitiendo así un análisis del comportamiento de ambos componentes en la mezcla

$$Ds\text{ aparente} = \frac{0.9975 * A}{B + A - C}$$

La habilidad del agregado para retener agua en relación con su peso seco se evalúa a través del porcentaje de absorción. Esta medida se determina al comparar los pesos del material en estado seco y saturado, lo cual es esencial para ajustar la cantidad de agua en las mezclas de concreto. Este proceso es crucial para asegurar una hidratación adecuada del cemento, lo que a su vez garantiza la durabilidad y resistencia del concreto. A continuación, se detalla el procedimiento:

$$Ds\text{ aparente} = \frac{0.9975 * A}{B + A - C}$$

De manera complementaria, para los agregados gruesos se realiza el ensayo de desgaste en la máquina de Los Ángeles, el cual permite evaluar la resistencia del material frente a la abrasión y el impacto. De acuerdo con la ICONTEC mediante la norma NTC 98, este ensayo consiste en someter el agregado, junto con esferas de acero, a un tambor rotatorio durante un número determinado de revoluciones, generando procesos de fricción e impacto que producen la degradación de las partículas más débiles (ICONTEC, 2006).

$$Desgaste (\%) = \frac{Wi - Wf}{Wi} \times 100$$

Donde Wi representa el peso inicial de la muestra en gramos (es decir, antes de realizar la prueba), y Wf es el peso final del material tras haber sido sometido al proceso de abrasión en la máquina de Los Ángeles (también medido en gramos). Ambos valores son fundamentales para determinar el porcentaje de desgaste del agregado.

Asimismo, se tiene en cuenta la prueba de equivalente de arena para caracterizar los agregados finos. Este es un procedimiento significativo para la producción de concreto y la construcción de pavimentos, pues posibilita valorar el número de finos arcillosos que contiene el material. Cuando el equivalente de arena es alto, significa que el agregado fino tiene menos arcillas y, por ende, resulta más apto para su uso; en cambio, un valor bajo indica la presencia de finos dañinos que pueden poner en riesgo la durabilidad y resistencia del concreto. Sin embargo, a pesar de que este ensayo es útil para controlar la calidad, se aconseja complementarlo con otros métodos de caracterización, debido a que puede verse influenciado

por la técnica empleada y no permite diferenciar entre los distintos tipos de materiales finos. (Gupioc & Moya, 2023) y se calcula con la siguiente formula:

$$SE = \frac{h_2}{h_1} * 100$$

Donde H_2 corresponde a la altura de la capa de arena después del proceso de sedimentación, mientras que H_1 representa la altura total de la muestra, incluyendo tanto la capa de arena como la de finos o arcillas, siendo estos valores fundamentales para determinar el equivalente de arena del material.

De manera adicional, se efectúa el ensayo de masa unitaria tanto para agregados finos como gruesos, lo que permite calcular el peso del material en un volumen específico. Este parámetro es clave para el diseño de mezclas de concreto. La realización de este ensayo sigue las directrices establecidas por ICONTEC a través de la norma NTC 92, que detalla el procedimiento para obtener la masa unitaria, tanto compactada como suelta, del agregado. Los valores resultantes son útiles para estimar la cantidad de material que llenará un volumen determinado y para evaluar la compactación y disposición de las partículas. Esto tiene un impacto directo en la dosificación y efectividad de la mezcla de concreto, y se determina mediante la siguiente fórmula.

$$M = \frac{G - T}{V}$$

En la ecuación, V denota el volumen del molde, T corresponde a la masa del vacío y G se refiere a la masa del agregado junto con el molde. Para calcular la masa unitaria y posteriormente el contenido de vacíos del material es necesario contar con estos tres valores. Con esta información, se sustituyen en la fórmula siguiente para determinar el porcentaje de vacíos que están presentes en el agregado.

$$\% \text{ Vacios} = 100 \left(\frac{(S * W) - M}{S * W} \right)$$

Donde S corresponde a la gravedad específica del agregado obtenida en el ensayo anterior, mientras que W representa la densidad del agua, siendo estos parámetros necesarios para el cálculo del contenido de vacíos del material.

4.4 MARCO CONCEPTUAL

Segregación: La segregación se produce cuando hay una alteración en la distribución de los agregados dentro de la mezcla. Esta falta de uniformidad puede comprometer tanto la resistencia como la seguridad del concreto. Este problema puede surgir si los procedimientos no se llevan a cabo adecuadamente durante las etapas de transporte o mezcla del concreto, lo que conlleva a una disminución de la homogeneidad en la mezcla, esencial para preservar su resistencia (Montoya, 2017).

Exudación: Cuando el agua de la mezcla asciende durante el proceso de fraguado del concreto, se genera la exudación del concreto fresco, resultando en una superficie porosa que carece de resistencia y durabilidad. Este fenómeno es causado por la sedimentación de los áridos más pesados y el ascenso del agua, la cual, al evaporarse lentamente, puede formar conductos capilares que afectan la impermeabilidad y durabilidad del concreto. Las mezclas con un alto contenido de cemento y cementos más finos tienden a presentar una menor exudación (Montoya, 2017).

Concreto hidráulico: Este material, conocido como concreto hidráulico, se utiliza principalmente en la construcción y pavimentación. Ha sido elaborado con el propósito de soportar elevadas tensiones tanto de compresión como de flexión (Torices, 2023).

Sostenibilidad: Se basa en la idea de satisfacer las necesidades actuales sin comprometer la capacidad de las generaciones venideras para cubrir las suyas. Esto requiere un equilibrio constante entre el progreso social, la protección del medio ambiente y el crecimiento económico. (Communications, 2023).

Desgaste de materiales: Según Adhesivos Industriales (Guanajuato, 2017) el desgaste es el resultado de la pérdida gradual del material en diferentes condiciones, como el trabajo de dos piezas o la carga ejercida sobre él.

Agregados: Contienen grava, piedra triturada, escoria o arena y se emplean de manera natural o triturada, dependiendo del uso que se les quiera dar. Se mezclan con un medio cementante para transformarse en mortero hidráulico o concreto (Cemex, 2024).

Optimización de materiales: Es crucial que la proporción de cemento, agua y agregados sea la correcta para maximizar la resistencia, disminuir el consumo de cemento y evitar gastos superfluos. Asimismo, es importante limitar el uso excesivo de agua para prevenir la segregación y garantizar una mayor durabilidad del material. (Kosmatka, Kerkhoff, & Sepulveda, Diseño y Control de Mezclas de Concreto, 2014).

4.5 MARCO LEGAL

Constitución Política de Colombia: Se la conoce también como Carta Magna o Carta Fundamental; esta define los derechos y obligaciones esenciales de la ciudadanía, además de la estructura y organización del Estado. La Constitución actual, promulgada en 1991, marcó un cambio significativo respecto a la de 1886, que estuvo en vigor durante más de un siglo (Asamblea Constituyente de Colombia, 1991).

Ley 388 de 1997: Supervisa las políticas y los lineamientos vinculados con la protección y conservación de la herencia cultural de la Nación y de los departamentos, abarcando aspectos históricos, artísticos, arqueológicos y arquitectónicos, en cumplimiento con la legislación pertinente (EL CONGRESO DE COLOMBIA, 1997).

Ley 400 de 1997: Esta ley regula la construcción sismo resistente en Colombia. Cualquier modificación en materiales de construcción debe ser evaluada bajo esta ley para garantizar la seguridad estructural. (EL CONGRESO DE COLOMBIA, 1997)

Decreto 1077 de 2015: Establece que el Fondo Nacional de Ahorro debe administrar eficientemente las cesantías y contribuir a resolver problemas de vivienda y educación de los afiliados, mejorando así su calidad de vida. Este decreto fue actualizado el 5 de diciembre de 2023 (Secretaría Distrital de Planeación, 2015).

NTC 32: Esta norma especifica los métodos y procedimientos para el ensayo de agregados en concreto, abarcando diferentes aspectos técnicos para asegurar la calidad del material utilizado.

NTC 77: Define el procedimiento para analizar agregados tanto finos como gruesos a través del tamizado, estableciendo la distribución del tamaño de las partículas mediante este método y determinando los criterios de gradación necesarios para dichos agregados (ICONTEC, 1994).

NTC 98: Proporciona instrucciones para evaluar la resistencia al desgaste de agregados gruesos con un tamaño máximo inferior a 37,5 mm utilizando la máquina de Los Ángeles, así como también directrices para aquellos agregados que tienen dimensiones entre 19 y 37,5 mm. (ICONTEC, 2018).

NTC 174: Define los criterios de calidad y clasificación para los agregados empleados en el concreto, tanto finos como gruesos. Con el fin de garantizar la calidad del concreto, establece el tamaño nominal máximo y otros parámetros relevantes (ICONTEC, 2018).

NTC 673: Esta regulación define los estándares para la fabricación y supervisión de calidad del concreto. Es esencial que la utilización de cáscaras de huevo como agregado se ajuste a los variados criterios establecidos en esta norma (INCONTEC, 2018).

Norma Sismo Resistente (NSR-10), título A: Este capítulo define los principios básicos del diseño resistente a sismos que son aplicables a todas las clases de edificaciones. Comprender estos fundamentos es crucial para cualquier cambio o avance en los materiales de construcción (NSR-10, 2010).

Norma Sismo Resistente (NSR-10), título B: Dicho título explica los requisitos para tener en cuenta al momento de rehabilitar estructuras existentes o al mejorar viviendas construidas con anterioridad (NSR-10, 2010).

Norma Sismo Resistente (NSR-10), título G: Control de calidad y pruebas de materiales. Aquí se describen los procedimientos para asegurar la calidad del concreto y otros materiales en el sitio de construcción, lo cual es vital para garantizar la viabilidad del agregado alternativo (NSR-10, 2010).

Norma Sismo Resistente (NSR-10), título J: Este título aborda los requisitos específicos para viviendas de interés social, lo cual es relevante dado que se trabajará con viviendas de estrato 2 (NSR-10, 2010)

4.6 MARCO GEOGRÁFICO

El diseño de la mezcla se llevará a cabo en el municipio de Girardot, una ciudad caracterizada por su clima cálido que ha facilitado la aparición de diversas ofertas turísticas, como se menciona en la página del (Gobierno de Colombia, 2024). La temperatura promedio anual es de 28 °C por la mañana, entre 30 y 34 °C durante la tarde, y alrededor de 27 °C por la noche. Este municipio abarca aproximadamente 150 km² y su cabecera se encuentra a una altitud de 290 m.s.n.m., con cerca del 70 % de su territorio siendo montañoso, alcanzando alturas de hasta 1000 m.s.n.m., debido a su ubicación en el vértice de la cordillera oriental.

Ilustración 3. Mapa de Colombia



Fuente: MapTiler, consulta realizada en línea.

Ilustración 4. Localización de Girardot en el mapa de Colombia.

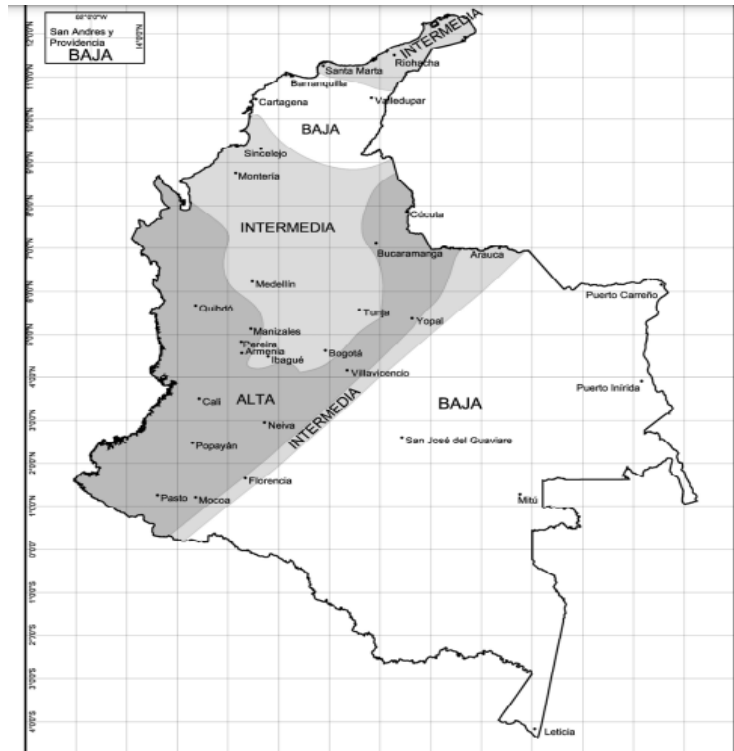


Fuente: MapTiler, consulta realizada en línea.

- **Zona de riesgo sísmico:**

De acuerdo con el capítulo 2.3 del título A de la NSR-10, los municipios son clasificados según el tipo de zona de riesgo sísmica en la que se encuentran; el tipo de amenaza sísmica es definido en el mapa a continuación:

Ilustración 5. Mapa de zonas sísmicas.



Fuente: Subcomité A del Comité AIS 100 de la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, (2010). Zonas de Amenazas Sísmicas aplicable a edificaciones para la NSR-10 en función de Aa y Av

En ese orden de ideas y teniendo en cuenta los datos suministrados por la NSR-10, podemos afirmar que Girardot es considerado como una zona de riesgo sísmico intermedia, debido a que sus valores de Aa y Av son 0,2 en cada una.

4.7 MARCO DEMOGRÁFICO.

Para comprender la relevancia del desarrollo de materiales sostenibles en la construcción, especialmente aquellos que aprovechan los desechos, es fundamental considerar el aumento en el consumo de alimentos y los problemas asociados con la generación de residuos orgánicos. En este contexto, la cáscara de huevo emerge como un residuo abundante que, a pesar de poseer propiedades valiosas y un considerable potencial en sectores como la construcción y otros procesos productivos, suele ser subutilizada.

En Colombia, el huevo ha sido durante años uno de los alimentos más consumidos, principalmente por su alto valor nutricional y bajo costo. Según datos de la (Federación Nacional de Avicultores de Colombia., 2025)), el consumo ha ido en aumento en años

recientes, alcanzando más de 13.800 millones de unidades al año. Este nivel de consumo, junto a una población cercana a los 52 millones de personas, genera enormes volúmenes de desechos que incluyen las cáscaras de huevo. Estas generalmente no reciben ningún tipo de tratamiento antes de ser desechadas, lo que resulta en grandes cantidades de residuos mal gestionados en el medio ambiente.

La cáscara de huevo equivale entre el 10% y el 12% del peso total de un huevo, lo cual significa que se generan toneladas de este material cada año. En la mayor parte de los casos, estos desechos son arrojados en conjunto a desechos alimentarios o como rellenos sanitarios, lo que causa un incremento de la carga medioambiental y el desaprovechamiento de un recurso que podría ser útil. Sus componentes químicos están formados por el carbonato de calcio (CaCO_3), la vuelve particularmente atractiva para emplearla en el sector de la construcción, donde dicho compuesto se usa mucho (Oliveria & Benillo, 2012).

En Girardot, el turismo representa la principal fuente de ingresos, lo que impacta directamente en el consumo de alimentos como los huevos, generando así una considerable cantidad de desechos. De acuerdo con el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE, 2023), la población asciende a aproximadamente 115,000 personas, cifra que puede aumentar durante las temporadas vacacionales debido al arribo de turistas. Este incremento poblacional conlleva a una mayor producción de residuos sólidos, especialmente orgánicos, planteando un reto para su adecuada gestión.

De acuerdo con lo anterior, el poner en práctica opciones para el uso de desechos como la cáscara del huevo puede contribuir a disminuir el volumen de desechos que se envían para su disposición final, estimulando al mismo tiempo que estos sean reutilizados en procesos constructivos. Esto es especialmente importante en áreas donde se ejecutan proyectos habitacionales, dado que posibilita el análisis de alternativas para disminuir costos sin comprometer la calidad de los materiales.

5 DELIMITACION

Este estudio tiene como objetivo analizar el comportamiento mecánico de un concreto hidráulico al que se le ha sustituido parcialmente el 10% del cemento por residuos de cáscara de huevo, previamente triturados y tamizados. La finalidad es determinar si este material puede constituir una alternativa en la mezcla con concreto convencional. La investigación se enfoca específicamente en la resistencia a la compresión del concreto modificado, considerando esta propiedad como el criterio principal para evaluar su rendimiento mecánico y su posible aplicación en elementos no estructurales o de demanda moderada dentro del sector construcción.

En cuanto a la delimitación temática, la investigación se realiza en el ámbito de la ingeniería civil, especialmente en lo relativo a los materiales de construcción, explorando cómo los desechos orgánicos pueden servir como reemplazos parciales del cemento en la producción de concreto hidráulico. El estudio se dedica exclusivamente a examinar el impacto que tiene la inclusión del 10% de cáscara de huevo, que ha sido procesada mediante limpieza, secado, trituración y tamizado, sobre la resistencia a la compresión del hormigón. En este sentido, no se consideran otras propiedades relacionadas con durabilidad o mecánica, tales como resistencia a flexión, absorción, permeabilidad o comportamiento químico; por ende, el alcance del análisis se restringe al desempeño mecánico bajo compresión.

Respecto a la delimitación espacial, la investigación se lleva a cabo en el municipio de Girardot, Cundinamarca. Se toman como referencia las condiciones de elaboración, curado y ensayo realizadas en un entorno controlado en laboratorio. Esta delimitación espacial permite situar el estudio dentro de una zona con características climáticas específicas que pueden afectar el comportamiento del material durante su fraguado y endurecimiento; sin embargo, los resultados no son extrapolables directamente a otras condiciones geográficas o ambientales.

En lo que respecta a la delimitación temporal, el estudio abarca el ciclo académico relacionado con el desarrollo experimental. Este periodo incluye las fases de recolección y procesamiento del residuo, diseño de mezcla, producción de especímenes y evaluación de resistencia a la compresión a los 7, 14 y 28 días post curado. Este intervalo temporal facilita el análisis del comportamiento inicial del concreto, así como su resistencia final al diseño dentro un marco adecuado para comparar tanto la mezcla estándar como la modificada.

Bajo estas premisas, esta investigación se centra únicamente en evaluar la viabilidad técnica del uso de cáscara de huevo como sustituto parcial del cemento en una proporción específica del 10%, bajo condiciones controladas en laboratorio y centrándose exclusivamente en su resistencia a la compresión. Por consiguiente, los resultados obtenidos no pretenden ser generalizables a todas las aplicaciones posibles del concreto sino ofrecer una base empírica para futuros estudios orientados hacia el desarrollo de materiales constructivos más sostenibles.

6 METODOLOGÍA

6.1 DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

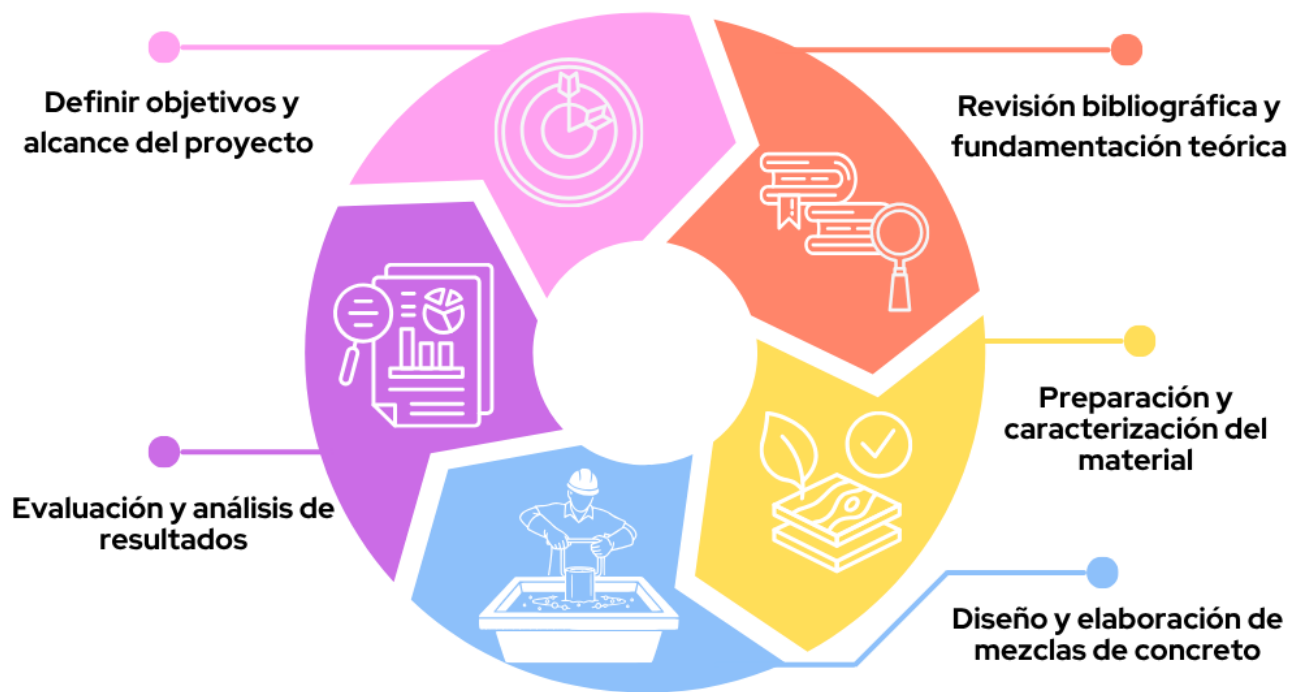
Se realizó un diseño experimental con el fin de evaluar la posibilidad de sustituir un 10% del cemento en la mezcla de concreto por cáscara de huevo. Este porcentaje se determinó a partir de antecedentes técnicos, sin realizar variaciones en la tasa de sustitución, siguiendo investigaciones previas. En lugar de modificar el porcentaje, se examinó cómo incorporar el material, optando por un tratamiento más accesible para la cáscara de huevo que no requiera herramientas especializadas, salvo el uso de un tamiz número 200 para obtener partículas con un tamaño similar al del cemento. Este enfoque busca facilitar el tratamiento del material para aquellos que no tengan acceso a equipos especializados. Para llevar a cabo esta evaluación, se realizaron ensayos de resistencia a la compresión con el objetivo de analizar tanto el rendimiento estructural del material como su viabilidad en aplicaciones constructivas sostenibles.

6.2 ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN

El panorama que sigue el estudio se dará a cabo mediante el estudio de (Pole, 2009) sobre la metodología mixta en la cual explica que este método es un diseño se expresa como una investigación que, mediante datos cuantitativos y cualitativos, ya sean para estudios privados o de investigación y. La viabilidad técnica y el impacto social y ambiental de este método propuesto se puede evaluar con este método. Además de eso mediante esta metodología mixta se podrá hacer uso de hipótesis para abordar la problemática de la desinformación que se manifiesta en la población con respeto al uso y los veneficios que esta mezcla puede dar alas viviendas y volverlas sustentables y ecológicas, en la cual se podrá utilizar hipótesis mediante el enfoque mixto, con el fin de generar ideas que permitan llegar a conclusiones potenciales en el proyecto.

El análisis cuantitativo analiza las características del concreto modificado con respeto a sus aspectos mecánicos, evaluando y comparando las características físicas como la resistencia y durabilidad del concreto tradicional con el modificado. Por otro lado, la investigación cualitativa analiza simultáneamente la selección de los constructores y residentes sobre la eficacia y la sostenibilidad de esta alternativa, dando también una clara forma de disminución económica en la compra de materiales de construcción, al igual que la afectación medioambiental de su implementación en las viviendas analizadas.

Ilustración 6. Metodología de manera grafica.



Fuente: Autoría propia

7 RECURSOS

7.1 RECURSOS HUMANOS

El proyecto inició como un trabajo de aula en la materia de Procesos Constructivos, creado por los dos autores Miler Andrés Rocha Suarez y Jeimy Carolina Roa Gómez, guiada por el docente Cristian Andrés Quinchía, quien orientó la formulación inicial y los primeros ensayos de la investigación. Con el tiempo, el proyecto tomó más fuerza y pasó a desarrollarse dentro del semillero SENTRAM, liderado por el docente Juan David Soto Marroquín, donde continuó el trabajo experimental, el análisis de resultados y la estructuración del proyecto de grado fue asesorado por el docente Mauricio Andrés Rivera Soto.

El proceso ha sido un esfuerzo conjunto entre estudiantes y docentes, combinando las bases académicas, la parte práctica del laboratorio y el acompañamiento constante del semillero. Esto permitió que el proyecto avanzara de forma ordenada, con seguimiento técnico y con un enfoque claro hacia el producto final del trabajo de grado.

7.2 RECURSOS TECNOLOGICOS

En la elaboración de la investigación se emplearon recursos tecnológicos tanto en el tratamiento de información al igual que en la ejecución práctica de los ensayos necesarios en el proyecto, los cuales permitieron garantizar la confiabilidad de los resultados y el adecuado control de las variables que surjan en el concreto cuando se sustituya parcialmente el cemento por Cáscara de huevo.

Para llevar a cabo este desarrollo, se utilizaron equipos especializados del laboratorio de materiales, los cuales facilitaron el procesamiento adecuado de los componentes de la mezcla de concreto. Esto incluyó la elaboración de probetas y la evaluación de sus propiedades mecánicas. Entre los equipos utilizados se encontraba un horno de secado, que sirvió para eliminar la humedad de los materiales, así como una serie de tamices para clasificar la granulometría.

Además, se emplearon herramientas no especializadas para tratar el material principal utilizado como sustituto del cemento, que es la cáscara de huevo. Para triturar adecuadamente este material y obtener el tamaño de partícula deseado, se utilizó un molino. También se hizo uso de una balanza de precisión para asegurar una dosificación exacta de los materiales, con el objetivo de lograr una mezcla homogénea. Para garantizar la calidad del concreto, se emplearon moldes cilíndricos normalizados en la fabricación de las probetas y un aparato hidráulico para medir su resistencia a la compresión, tanto con cáscaras de huevo como sin ellas.

De manera complementaria, se emplearon herramientas digitales como Microsoft Excel para el procesamiento y análisis de datos, Microsoft Word para la elaboración del documento técnico y software de dibujo asistido para la representación gráfica todos estos softwares con su respectiva licencia educativa, lo que permitió organizar la información, generar resultados comparativos y presentar el proyecto de forma clara y estructurada.

En relación con las herramientas digitales, se utilizaron:

- Microsoft Excel, para anotar y organizar los datos experimentales, así como para analizarlos. Esto posibilita la creación de tablas comparativas, el cálculo de resistencia y la representación gráfica de los resultados.
- Microsoft Word, para redactar y estructurar el documento técnico de acuerdo con las reglas académicas y las regulaciones ICONTEC.

•

Por otra parte, en la etapa experimental se usaron equipos de laboratorio con elementos tecnológicos, los cuales son esenciales para procesar el material y examinar sus características:

- Horno de secado con control de temperatura: Se utiliza para eliminar la humedad de los componentes, en este caso, para la mezcla de concreto. Sin embargo, no se usó el horno para la cáscara de huevo; esta se dejó al aire libre con el fin de minimizar el uso de herramientas contaminantes y difíciles de acceder para el público general, asegurando así condiciones adecuadas para su trituración y uso posterior.
- Juego de tamices normalizados (que termina con la malla N°200): Se emplea para clasificar el material triturado según su granulometría, garantizando la uniformidad en el tamaño de las partículas no solo del concreto convencional, sino también de la cáscara de huevo.
- Balanza electrónica de precisión: Permite una dosificación exacta de los componentes conforme al diseño de la mezcla.
- Mezcladora de concreto: Su objetivo es asegurar una correcta homogeneización de los componentes del concreto.
- Máquina de compresión hidráulica: Equipo esencial para determinar la capacidad de resistencia a la compresión en los cilindros, operando bajo condiciones controladas y siguiendo protocolos estandarizados.

El uso de estos recursos permitió un adecuado tratamiento y control del proceso experimental, como la gestión eficiente de la información, en la cual nos ayudaran a evaluar correctamente el diseño de mezcla con sustitución y sin sustitución.

8 DESARROLLO DE LA INVESTIGACION

8.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS

En el proceso de diseñar mezclas, caracterizar los agregados es una etapa fundamental. ya que sus propiedades mecánicas y físicas tienen un impacto directo en cómo se comporta el material en estado fresco y endurecido. Las características evaluadas más importantes incluyen la textura superficial, la forma, la absorción, la granulometría, el peso específico y la resistencia a la abrasión; son estas las que establecen elementos como la durabilidad del concreto, su trabajabilidad y su resistencia mecánica. Además, se acepta que los agregados constituyen alrededor del 75 % del volumen de hormigón; por ello, sus propiedades impactan notablemente en características como la permeabilidad y la porosidad del producto final (García, Morrillo, & Guerra, 2023).

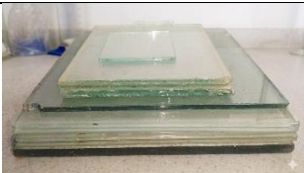
8.2 EQUIPOS UTILIZADOS EN LA CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES

Para caracterizar los agregados y llevar a cabo las pruebas de laboratorio, se emplearon equipos especializados que aseguran la precisión y confiabilidad de los resultados. La balanza digital es un instrumento clave para calcular masas, mientras que el horno de secado controla la humedad. Asimismo, se utilizó un conjunto de tamices para realizar el análisis granulométrico y recipientes calibrados para determinar los pesos unitarios.

Adicionalmente, se hicieron uso de dispositivos como la máquina de Los Ángeles para evaluar la resistencia a la abrasión, el picnómetro para medir la gravedad específica y la absorción, así como moldes estandarizados para fabricar especímenes. Todos los ensayos se realizaron conforme a los procedimientos estipulados en las normas técnicas, lo que garantiza tanto la calidad como la representatividad de los resultados en el diseño de mezclas para concreto. (ICONTEC, 2017).

Tabla 4. Equipos utilizados para los ensayos.

NOMBRE DEL EQUIPO	IMAGEN	DESCRIPCIÓN
Balanza digital de precisión		Equipo utilizado para determinar la masa de materiales con alta exactitud, fundamental en la dosificación y caracterización de agregados.
Horno de secado		Permite eliminar la humedad de las muestras mediante temperaturas controladas, garantizando condiciones secas para los ensayos.

Tamices		Conjunto de mallas de diferentes aberturas que se emplean para clasificar los agregados por medio de su tamaño de partícula para el análisis granulométrico.
Taras		Recipientes utilizados para contener muestras durante procesos de pesaje y secado, evitando pérdidas de material.
Picnómetro		Instrumento empleado para definir la densidad y absorción de agregados finos mediante el desplazamiento de volumen.
Probeta graduada		Recipiente cilíndrico con escala volumétrica que permite medir volúmenes de líquidos con precisión.
Molde cónico y pisón Humboldt		Dispositivo utilizado para moldear y compactar muestras mediante golpes controlados en ensayos de laboratorio.
Base de vidrio		Superficie lisa y rígida que proporciona estabilidad y nivelación durante la ejecución de ensayos.

Estufa eléctrica		Equipo utilizado para el calentamiento o secado de materiales en laboratorio mediante generación de calor controlado.
Pala de mano		Herramienta manual utilizada para la manipulación, mezcla y traslado de materiales.
Baldes de mezcla		Recipientes empleados para contener y mezclar materiales durante la preparación del concreto.
Mezcladora de concreto		Equipo mecánico que permite la homogenización de los materiales del concreto, asegurando uniformidad en la mezcla.
Recipiente para peso unitario		Un modelo de volumen conocido para estimar el peso unitario de los agregados.
Varilla de apisonamiento		Barra metálica utilizada para compactar materiales mediante golpes controlados durante el moldeo de muestras.

Cono de Abrams		El molde en forma de tronco de cono se utiliza para evaluar la consistencia del concreto fresco mediante la prueba de asentamiento.
Máquina de los ángeles		Equipo destinado a evaluar la resistencia de los agregados frente a la abrasión y el desgaste mediante un impacto.
Equipo de equivalente de arenas		Permite determinar la limpieza de los agregados finos, evaluando la presencia de materiales arcillosos.
Máquina universal de ensayos		Equipo que facilita establecer propiedades técnicas como la resistencia del concreto al ser comprimido.
Balanza de colgar		Se utiliza para la toma del peso del material para la determinación de la muestra a utilizar en la investigación

Olla de acero		Su función principal es el de la desinfección y limpieza de la cascara al utilizar la con agua y dejarla hervir a la temperatura adecuada
Molino de mano		El objetivo del molino es la trituración de la cascara de huevo, en la cual se pasarán las veces que haga falta para obtener el tamaño adecuado para la mezcla

Fuente: Autoría propia

8.3 PREPARACIÓN DE LA CASCARA DE HUEVO PARA EL DISEÑO DE MEZCLA

El presente proyecto adopta un enfoque experimental, específicamente a través de un ensayo controlado que busca evaluar si la mezcla de concreto que incorpora cascarilla de huevo satisface los criterios requeridos para su uso en aplicaciones cotidianas. Se han establecido directrices precisas a seguir, considerando el conocimiento previo sobre la gestión del proceso productivo y la realización de pruebas de compresión. Para lograr esto, se llevará a cabo el tratamiento pertinente de la cascarilla, durante el cual se determinará el tamaño nominal adecuado para su utilización como sustituto parcial del cemento en la mezcla de concreto.

ORIGEN DEL MATERIAL

Primero, es esencial determinar la procedencia de los materiales necesarios para la elaboración de las mezclas antes de iniciar la producción de los cilindros requeridos. Se selecciona una fuente principal para obtener el material base, que son las cáscaras de huevo; estas pueden recolectarse en panaderías y también se generan como desecho orgánico en nuestros hogares a lo largo del día. Si se requiere más cantidad, se pueden adquirir en diversos puntos de venta como restaurantes o pastelerías, dado que este método es comúnmente utilizado. Los materiales como grava y arena son accesibles en canteras localizadas en el departamento, siendo SAP AGREGADO la más cercana y empleada. Considerando que el agregado quedará expuesto y contribuirá a la estética del hormigón, se busca utilizar agregados provenientes de la misma fuente y estrato para lograr resultados más similares al hormigón convencional. Además, se opta por el uso de cemento Cemex. Una vez que se ha determinado el origen de los agregados gruesos y finos en las canteras, se puede proceder con el proceso adecuado.

RECOLECCIÓN Y LIMPIEZA

Para comenzar el procedimiento de preparación de la cáscara de huevo como agregado para la mezcla de concreto, para ello se llevó a cabo un procedimiento de unos sencillos pasos los

cuales son: recolección, limpieza, secado y triturado del material base que son las cascara de huevo en la cual se realiza estos pasos para permitir la garantía de la calidad del material antes de su utilización.

Como primer paso se recolectó la cáscara de huevo tipo común que es la que se encuentra en su mayor parte viviendas y establecimientos de consumo alimenticio, como panaderías y restaurantes, en la cual se procura seleccionar aquellas que se encuentran libres de contaminantes visibles o residuos externos que conlleven patógenos. Este procedimiento es esencial para asegurar la pureza y la calidad y evitar impurezas que puedan afectar las propiedades físicas y químicas del material (Binici, Aksogan, & Resatoglu, 2018).

Posteriormente, se trata la cascara por un proceso de limpieza inicial con solo pasando la cascara a un lavado sencillo de agua, con el fin de eliminar el sobrante de clara y yema que esta tenga adherida en la superficie. Esto teniendo en cuenta con las investigaciones sobre el aprovechamiento de residuos de cascara de huevo en materiales cementantes, en la cual la eliminación de material orgánico es necesario para prevenir alteraciones en el comportamiento de la mezcla y posibles procesos de descomposición (Atencia, Támara, & González, 2024). Con el propósito de eliminar todo material de residuo no útil de las cascara de huevo que no fueron eliminados en el lavado inicial, se toma la cascara de huevo y reutilizando el agua ya filtrada de cualquier desecho anterior se colocan en un recipiente para calentarla en una temperatura de 30°C por aproximadamente un tiempo de 10 a 15 min, esto con de que el calor separe las membranas internas y contribuye a una limpieza más eficiente del residuo de cascara de huevo (Anwar, 2005). Para esta etapa es recomendado no saturar el lavado del material, sino que se recomienda que sea de a 1 kg de cascara de huevo que permitirá que la limpieza se realice de manera uniforme.

Final mente para esta parte se sometió a un secado de la cascara de huevo, etapa fundamental para tener el material seco y en óptimas condiciones, para que el material no sufra de alteraciones de consistencia o calidad por un mal tratamiento de ellas por el no reducir el contenido de humedad antes de su triturado. En estudios previos del manejo de este material recomiendan el secado en horno especial para el tratamiento de materiales a una temperatura de 60 °C y 80°C durante 3 horas, esto con el fin de eliminar por completo la humedad del material (Anwar, 2005). Sin embargo, por la falta de esta herramienta y para medida de que este proceso debe de ser fácil de replicar para futuros usuarios, en este caso las cascara de huevo se dejaron secar al aire libre en un espacio controlado donde tenga buena ventilación y nada de humedad en un lapso de un tiempo de 6 horas, este método también permite el reducir la humedad que se encuentra en el material esta técnica ha sido empleada en múltiples investigaciones que señalan cómo es factible que la cascara de huevo pueda secarse de manera natural cuando no se dispone de un horno, permitiendo el secado superficial antes de procesar la cascara de huevo (Yerramala, 2014) .

TRITURADO

El proceso para triturar las cascara de huevo con un molino se inicia con la preparación del material, previamente limpio y seco. Las cáscaras secas se sitúan en el molino, idealmente un

molino de bolas, pero por falta de recurso se utiliza un molino convencional, por su capacidad para generar un tamaño de partícula homogéneo. El molino debe estar dispuesto a funcionar a una velocidad moderada, previniendo un sobrecalentamiento que pueda modificar las características químicas de las cáscaras. En el proceso, las cáscaras son objeto de un impacto reiterado que las fragmenta en partículas pequeñas.

Este proceso se lleva a cabo en un tiempo fluctuante, de 15 a 30 minutos ya que al pasarla cascara el Tamayo de ella es muy grande por eso hay que repetir el proceso de trituración para conseguir la mayor cantidad de polvillo de huevo es te proceso se da por la capacidad del molino y la cantidad de material que se está procesando. Una vez trituradas, las cáscaras se someten a un tamiz de malla fina para su trituración de acuerdo a la norma ASTM C618 del (2021), esta norma indica el Tamayo de los materiales puzolánicos, se toma ya que el polvo de cascara de huevo se considera como un aditivo similar a el este se puede determinar por medio de el tamiz N200, Este procedimiento garantiza un material con propiedades físicas apropiadas para una mezcla uniforme en el hormigón, optimizando la calidad del producto final según la norma ASTM C136 del (2023), que determina el método de análisis de los tamices para la granulometría necesaria para el material triturado.

DETERMINACION DEL TAMAÑO ADECUADO PARA LA SUSTITUCION.

La elección del tamaño de partícula en una mezcla de hormigón con reemplazo parcial de cáscara de huevo se basa en diversos elementos, tales como el tipo de mezcla, la dosificación, las características deseadas son como la resistencia, durabilidad, trabajabilidad y la cantidad de cáscara de huevo que se va a emplear.

Por lo general, la cáscara de huevo triturada es considerada un material ligero y poroso, apto para ser utilizado como un sustituto parcial del cemento, gracias a su alto contenido de calcio. Para incorporar la cáscara de huevo en una mezcla de concreto, es importante determinar el tamaño adecuado de las partículas. En este contexto, se emplearon dos métodos de sustitución: uno que utiliza un tamaño estándar de trituración y otro que utiliza un polvo de cáscara de huevo que pasa el tamiz N200, con un tamaño aproximado de 0.075 mm, similar al del cemento. Esto permite evaluar cuál alternativa resulta más adecuada. Es esencial tener en cuenta lo siguiente:

La composición principal de la cáscara de huevo es carbonato de calcio (CaCO_3), lo cual le confiere propiedades comparables a las de los materiales puzolánicos. Según (Construpedia, 2024), los materiales puzolánicos son aquellos que reaccionan con cal en ausencia de cemento y en presencia de agua para generar productos adicionales que pueden mejorar características del hormigón como su resistencia y durabilidad. Por lo tanto, al utilizar cáscara de huevo triturada como sustituto parcial del cemento, se aprovecha esta capacidad reactiva del calcio presente en la cáscara.

Si se utiliza la cascarilla de huevo, podría actuar como un sustituto parcial del cemento, lo que podría resultar en una reducción de la resistencia inicial debido a la reacción más lenta de la cáscara de huevo en el concreto. No obstante, este efecto podría ser neutralizado si se modifica la proporción de la mezcla y si se realiza un proceso de curado apropiado para asegurar un buen resultado por parte de los dos métodos de sustitución que se realiza.

Tabla 5. Procedimientos acerca de la preparación de la cáscara de huevo.

NOMBRE DEL PROCEDIMIENTO	IMÁGENES	DESCRIPCIÓN
Determinación de la cantidad del material		Se utilizará una balanza de colgar para establecer la cantidad de materia prima necesaria. Para ello, se tomará en cuenta la cantidad de sustituciones que se emplearán y el método de trituration a aplicar.
Lavado de las cascaras		Se debe de hervir agua y agregas las cascaras de huevo para desinfectarlas y retirar restos de yema y placenta que tienen alrededor, este proceso tiene un tiempo de 15 a 20 minutos
Secado del material		Después de realizar el proceso de lavado se pasa al secado en la cual se dejará la cascará de huevo en un horno convencional de 60 – a 80 grados en un tiempo de 2 horas, no obstante, por falta de recursos se dejó al aire libre en un lugar sin humedad por 10 horas para garantizar su secado
Triturado del material		Se toma el material ya secado y limpio y se procede a triturar mediante el molino manual, aun según informes es mejor utilizar uno molino de bolas en este caso solo se pudo conseguir uno manual, por eso el proceso de triturado se repetirá continuamente hasta conseguir los dos tamaños de partículas necesario.

Tamizado del triturado		Al tener todo el material triturado se procederá a tamizarlo para la separación de tamaño de partículas en este caso se usó el tamiz N200 ya que según nos dice ASTM C136 (2023), es el de la maña de un diámetro de 0.075 mm que hace que el material tenga un tamaño similar al cemento
-------------------------------	---	--

Fuente: Autoría propia.

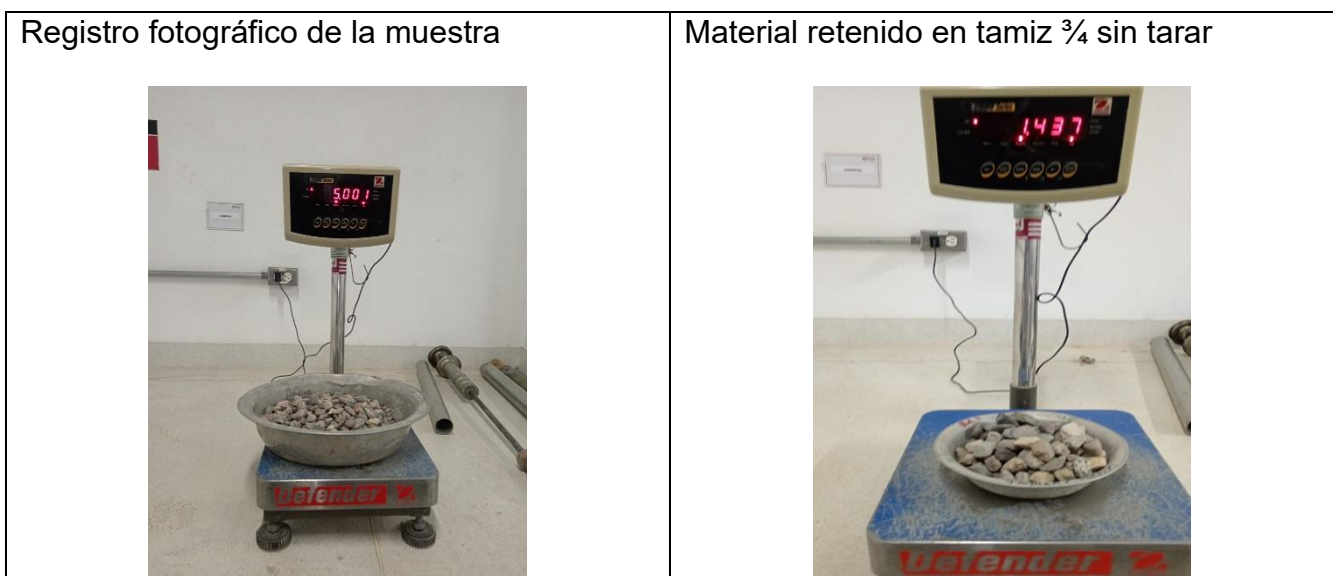
8.4 CARACTERIZACIÓN GRANULOMÉTRICA DEL AGREGADO GRUESO

La prueba de análisis granulométrico se realiza a través del tamizado, un método esencial que permite establecer la distribución del tamaño de las partículas en los agregados, ya sean finos o gruesos. Este procedimiento implica someter una muestra representativa a una serie de tamices organizados desde el más amplio hasta el más estrecho, para medir la cantidad de material que queda retenido en cada uno. A partir de estos datos, se calculan los porcentajes retenidos, acumulados y pasantes, lo cual es útil para elaborar la curva granulométrica y evaluar la gradación del material.

Esta información es fundamental para clasificar los agregados y analizar su comportamiento en mezclas de concreto, ya que afecta directamente propiedades como durabilidad, resistencia y trabajabilidad. El ensayo se realizó conforme a lo establecido por la norma técnica colombiana. (ICONTEC, 1994).

Tabla 6. Registro fotográfico del procedimiento del ensayo de granulometría de arena.

Lavado de la muestra para eliminación de finos previo al análisis granulométrico 	Secado del material después del lavado previo al análisis granulométrico. 
---	---



Fuente: Autoría propia

PROCEDIMIENTO PARA ESTABLECER LA GRANULOMETRÍA DEL AGREGADO GRUESO

Siguiendo lo estipulado por la norma, se recolectó una muestra representativa con un peso inicial de 5.000 g y se realizó el análisis granulométrico del agregado grueso.

Tabla 7. La dimensión de la muestra, conforme al tamaño nominal máximo.

Tamaño máximo nominal aberturas cuadradas (mm)	Masa mínima Muestra de ensayo (kg)
9,5	1
12,5	2
19,0	5
25,0	10
37,5	15
50,0	20
63,0	35
75,0	60
90,0	100
100,0	150
125,0	300

Fuente: (ICONTEC, 1994)

En primera instancia, la muestra fue sometida a un proceso de lavado con el fin de retirar el material fino adherido, garantizando así resultados más precisos durante el ensayo. Posteriormente, el material fue secado por medio de una estufa eléctrica hasta alcanzar una condición de masa constante. Una vez seco, el agregado fue sometido al proceso de tamizado, utilizando una serie de tamices normalizados dispuestos en orden decreciente de abertura. El conjunto de tamices fue colocado en el equipo de agitación y se mantuvo en operación durante

un intervalo aproximado de 10 minutos, asegurando una adecuada separación de las partículas según su tamaño.

Una vez terminado el tamizado, se procedió a medir la masa del material que quedó en cada tamiz, registrando la información requerida para determinar, por medio de la fórmula, los porcentajes retenidos, acumulados y pasantes. La elaboración de la curva granulométrica y el estudio de Estos resultados hicieron posible la distribución de las dimensiones del agregado grueso. (ICONTEC, 1994).

RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO

Tabla 8. Datos de ensayo granulométrico de la grava por medio de tamices.

TAMIZ		W RETENIDO	%RETENIDO	% R. ACUMULADO	% PASA	% QUE PASA NTP 400.037 2001	
3/4"	19,00 mm	1,372 kg	30,90%	30,90%	69,10%	40%	85%
1/2"	12,50 mm	2,094 kg	47,16%	78,06%	21,94%	10%	40%
3/8"	9,50 mm	0,696 kg	15,68%	93,74%	6,26%	0%	15%
N1/4	6,30 mm	0,217 kg	4,89%	98,63%	1,37%	0%	0%
N4	4,750 mm	0,061 kg	1,37%	100,00%	0,00%	0%	0%
W TOTAL		4,440 kg				0%	0%

Fuente: Autoría propia

Los porcentajes de límite inferior y límite superior establecen los rangos permitidos de material que atraviesa cada tamiz en la evaluación granulométrica de la arena, según normas técnicas el límite inferior indica el porcentaje mínimo y el límite superior el máximo de partículas que deben atravesar cada tamiz (ICONTEC, 2017).

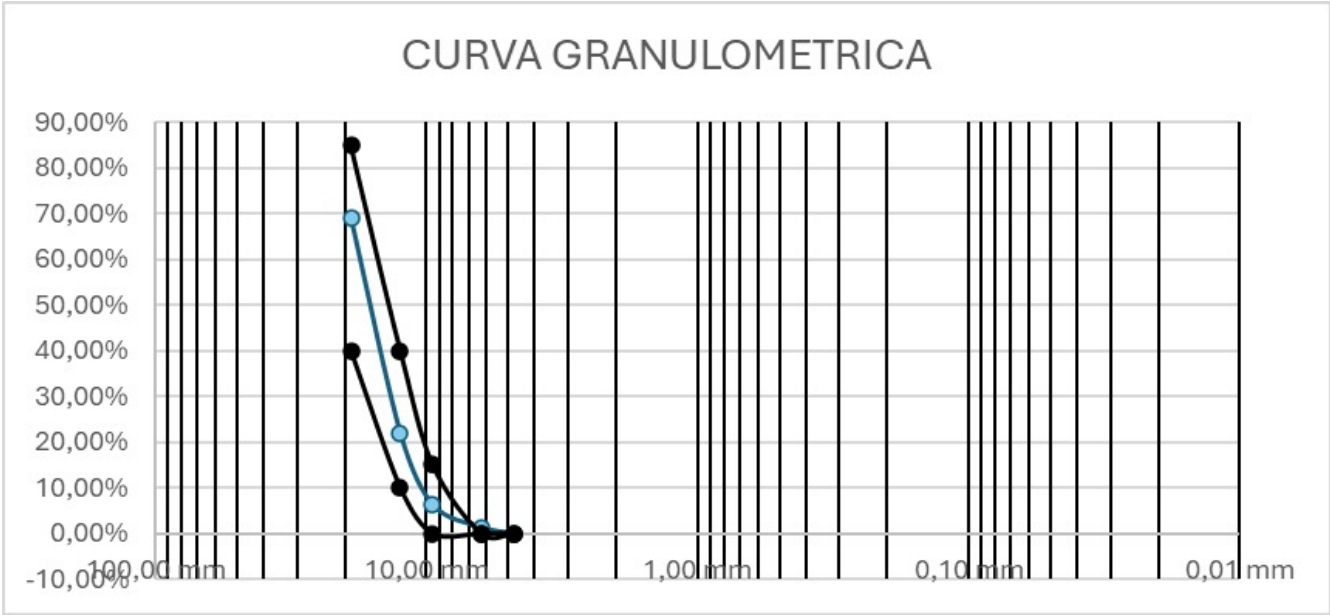
Tabla 9. Porcentajes de Límite inferior y límite superior.

Tamiz NTC 32 (ASTM E 11)	Porcentaje que pasa
9,5 mm	100
4,75 mm	95 a 100
2,36 mm	80 a 100
1,18 mm	50 a 85
600 μ m	25 a 60
300 μ m	10 a 30
150 μ m	2 a 10

Fuente: ICONTEC. (2017). NTC 174

Se creó la curva granulométrica del material con base en los datos adquiridos en la prueba de granulometría y comparándolos con los límites fijados por la normativa, tanto el inferior como el superior; esto posibilitó examinar cómo se distribuyen las partículas según su tamaño.

Ilustración 7. Curva granulométrica de la grava



Fuente: Autoría propia

Se compararon los hallazgos del análisis de granulometría con la tabla de cantidad máxima, autorizada de material retenido en cada tamiz, según lo dispuesto por la norma. Esta comprobación posibilitó determinar si la distribución granulométrica del agregado satisface los requerimientos necesarios, lo que garantiza su idoneidad para emplearse en mezclas de concreto (ICONTEC, 2017).

Ilustración 8. Máxima cantidad de material que se permite que quede retenido en un tamiz, en kilogramos.

Tamaño de abertura del tamiz, mm	Dimensiones nominales de los tamices ^A				
	203,2 mm diámetro ^B	254 mm diámetro ^B	304,8 mm diámetro ^B	350 mm x 650 mm	372 mm x 580 mm
	Área de tamizado, m ²				
	0,0285	0,0457	0,0670	0,122 5	0,215 8
125,0	c	c	c	30,6	67,4
100,0	c	c	c	27,6	53,9
90,0	c	c	15,1	23,0	48,5
75,0	c	8,6	12,6	19,3	40,5
63,0	c	7,2	10,6	15,3	34,0
50,0	3,6	5,7	8,4	11,5	27,0
37,5	2,7	4,3	6,3	7,7	20,2
25,0	1,8	2,9	4,2	5,8	13,5
19,0	1,4	2,2	3,2	3,8	10,2
12,5	0,89	1,4	2,1	2,9	6,7
9,5	0,67	1,1	1,6	1,5	5,1
4,75	0,33	0,54	0,80		2,6

^A Dimensiones del marco del tamiz en pulgadas: 8,0 pulgadas de diámetro, 10,0 pulgadas de diámetro; 12,0 pulgadas de diámetro; 13,8 pulgadas por 13,8 pulgadas (14 x 14 pulgadas nominal); 14,6 por 22,8 pulgadas (16 por 24 pulgadas nominal).

^B El área del tamiz para bastidores redondos se encuentra basado en un diámetro efectivo de 12,7 (1/2 pulgada) menos que el diámetro nominal, debido a que la NTC 32 (ASTM E11) permite que el sello entre la malla del tamiz y el marco se extienda 6,35 mm (1/4 de pulgada) sobre la malla del tamiz. Así, el diámetro efectivo de tamizado para un bastidor de 203 mm de diámetro es 190 mm (7,5 pulgadas). Algunos fabricantes de tamices pueden reducir solamente hasta 6,35 mm (1/4 de pulgada) la malla del tamiz.

^C Los tamices señalados tienen menos de cinco aberturas completas y no deben usarse para ensayos granulométricos, excepto como se menciona en el numeral 8.6.

Fuente: (ICONTEC, 1994).

Según la tabla utilizada, el límite permitido es de 1.372 kg; por ende, la cantidad de material que queda retenida en el tamiz de 19 mm se encuentra dentro de este límite. Así, se puede concluir que el ensayo se llevó a cabo correctamente y que los resultados obtenidos son confiables.

8.4.1 Análisis de resultados de la granulometría de grava

Se llevó a cabo la evaluación granulométrica del agregado grueso para confirmar que la distribución de tamaños de las partículas cumple con los estándares establecidos por la NTC 174, que determina los límites aceptables para los agregados empleados en la elaboración de concreto. Según los resultados obtenidos, el porcentaje de material que atraviesa cada uno de los tamices analizados se encuentra dentro del rango permitido por la norma. El tamiz de 19,00 mm 3/4" tiene un porcentaje de paso del 69,10% cifra que se encuentra dentro del rango establecido entre el 40% y el 85%. De igual forma, para el tamiz de 12,50 mm 1/2" se obtuvo un 21,94%, cumpliendo con el intervalo de 10% a 40%.

El porcentaje que atraviesa el tamiz de 3/8" corresponde a 6,26%, el cual también se encuentra dentro del rango permitido de 0% a 15%. Para los tamices de menor tamaño, como el de 6,30 mm y 4,75 mm, se registraron valores de 1,37% y 0,00% respectivamente, los cuales son aceptables dentro de los criterios de la normativa, considerando que se permite una pequeña presencia de material fino en el agregado grueso. En cuanto a la curva granulométrica, esta presenta un comportamiento continuo y uniforme, sin cambios bruscos en la distribución de tamaños, lo que indica que el material posee una adecuada gradación. Esta característica es fundamental, pues tiene un impacto directo en la resistencia y trabajabilidad del concreto.

En términos generales, los resultados logrados posibilitan concluir que el agregado grueso examinado cumple con las exigencias establecidas en la NTC 174, al tener una distribución granulométrica apropiada para su empleo en el diseño de mezclas de concreto.

8.5 CARACTERIZACIÓN GRANULOMÉTRICA DE LA ARENA

La granulometría de las arenas es el estudio de cómo se distribuye la magnitud de las partículas que conforman un agregado fino, que se determina por medio de pruebas de tamizado. Para diseñar mezclas de mortero o concreto, es crucial este análisis ya que influye directamente en la resistencia, la durabilidad, el costo y la trabajabilidad del material. Un terreno de arena con un grado apropiado promueve un empaquetamiento ideal de las partículas y disminuye los espacios vacíos y reduce la cantidad de agua y cemento necesarios; esto produce una mezcla más concentrada, sólida y eficiente. Por esa razón, para asegurar que las combinaciones en la construcción sean de buena calidad y opere correctamente, es esencial supervisar la granulometría (Palacio, Chávez, & Velásquez, 2017).

Tabla 10.Registro fotográfico del procedimiento del ensayo de granulometría de arena.

Masa de la muestra de arena húmeda. 	Peso de la cantidad de arena en estado seco. 
Peso del material atrapado en el tamiz N° 100 	Registro fotográfico de los tamices utilizados y del material retenido en cada uno 

Fuente: Autoría propia

PROCEDIMIENTO PARA LA DETERMINACIÓN DE LA GRANULOMETRÍA DEL AGREGADO GRUESO

En cumplimiento con lo establecido por la norma, se empleó una muestra representativa de 1.000 g para realizar el análisis granulométrico del agregado grueso.

Tabla 11. El tamaño de la muestra en relación con el tamaño nominal máximo.

Tamaño de abertura del tamiz, mm	Dimensiones nominales de los tamices ^A				
	203,2 mm diámetro ^B	254 mm diámetro ^B	304,8 mm diámetro ^B	350 mm x 650 mm	372 mm x 580 mm
	Area de tamizado, m ²				
	0,0285	0,0457	0,0670	0,122 5	0,215 8
125,0	c	c	c	c	67,4
100,0	c	c	c	30,6	53,9
90,0	c	c	15,1	27,6	48,5
75,0	c	8,6	12,6	23,0	40,5
63,0	c	7,2	10,6	19,3	34,0
50,0	3,6	5,7	8,4	15,3	27,0
37,5	2,7	4,3	6,3	11,5	20,2
25,0	1,8	2,9	4,2	7,7	13,5
19,0	1,4	2,2	3,2	5,8	10,2
12,5	0,89	1,4	2,1	3,8	6,7
9,5	0,67	1,1	1,6	2,9	5,1
4,75	0,33	0,54	0,80	1,5	2,6

Fuente: (ICONTEC, 1994)

Esta muestra se llevó al horno a 105 grados durante cerca de 24 horas.

°C, para que la humedad contenida en el material se elimine y no influya en los resultados del ensayo. Después de secarse, la muestra se dejó enfriar a temperatura ambiente para ser pesada posteriormente y así obtener su masa inicial en condiciones apropiadas.

Posteriormente, se organizaron los tamices en orden de mayor a menor abertura, en la siguiente secuencia: N° 4, 8, 16, 30, 50, 100 y el fondo. La muestra de arena se colocó en el tamiz superior y se procedió a realizar el tamizado de forma manual, agitando cuidadosamente la serie de tamices durante varios minutos, asegurando que el material se distribuyera correctamente y logrando una adecuada separación de las partículas según su tamaño. Al finalizar el proceso, Se pesó la materia que fue retenida en cada tamiz y se registraron los datos recolectados, los cuales permitieron posteriormente realizar los cálculos correspondientes y analizar la distribución granulométrica de la arena. (ICONTEC, 1994).

RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ENSAYO

Los datos que se obtuvieron en el ensayo fueron los siguientes: la muestra inicial pesaba 1.000 kg y la muestra seca, 0.985 kg, lo cual demuestra que había pérdida de humedad en el material antes de llevar a cabo el tamizado. Después, se realizó el análisis granulométrico a través del tamizado, que permitió la obtención de la cantidad de masa que queda en cada uno de los tamices. Los resultados aparecen en la tabla granulométrica. Estos valores sirvieron para calcular el porcentaje retenido en cada tamiz, lo que permitió conocer la distribución del material por tamaños de partícula. Finalmente, se determinó el porcentaje que pasa a través de cada tamiz lo cual facilita la interpretación del comportamiento granulométrico del material y su clasificación según los criterios establecidos.

Tabla 12. Datos de ensayo granulométrico de la arena por medio de tamices.

TAMIZ		W RETENIDO	%RETENIDO	% R. ACUMULADO	% PASA	% PASA NTP 400.037 2001	
N4	4,750 mm	0,003	0,30%	0,30%	99,70%	95%	100%
N8	2,380 mm	0,076	7,70%	8,00%	92,00%	80%	100%
N16	1,190 mm	0,150	15,20%	23,20%	76,80%	50%	85%
N30	0,595 mm	0,17	17,22%	40,43%	59,57%	25%	60%
N50	0,297 mm	0,155	15,70%	56,13%	43,87%	10%	30%
N100	0,150 mm	0,145	14,69%	70,82%	29,18%	2%	10%
N200	0,075 mm	0,068	6,89%	77,71%	22,29%	0%	0%
FONDO		0,220	22,29%	100,00%	0,00%		
W TOTAL		0,987 Kg					

Fuente: Autoría propia

Después de conseguir el porcentaje retenido acumulado, se calcula el módulo de finura, que se obtiene sumando todos los porcentajes retenidos divididos entre 100 los acumulados en los tamices fijados por la norma. De esta manera, el módulo de finura permite evaluar de forma global la distribución granulométrica del agregado, proporcionando un valor representativo de su tamaño medio.

$$MF = \frac{276,60}{100} = 2.8$$

Los porcentajes de límite inferior y límite superior establecen los rangos permitidos de material que atraviesa cada tamiz durante el análisis granulométrico de la arena, según normas técnicas el límite inferior indica el porcentaje mínimo y el límite superior el máximo de partículas que deben atravesar cada tamiz.

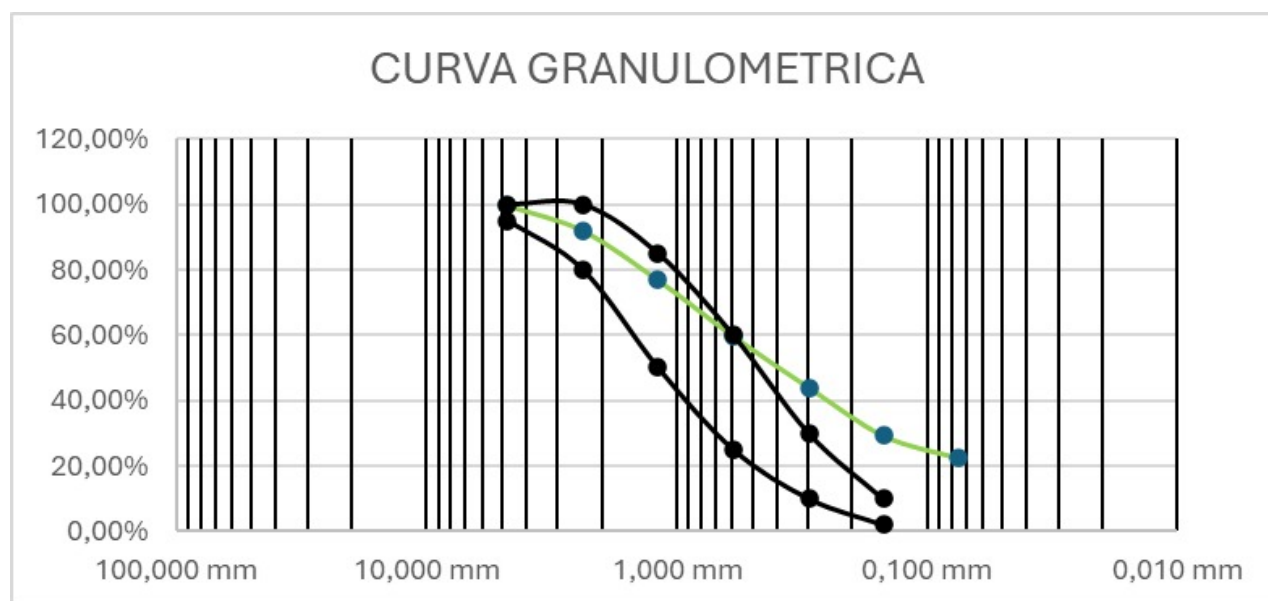
Tabla 13. Porcentajes de Límite inferior y límite superior para arenas.

Tamiz (NTP 334.170 o ASTM E11)	Porcentaje que pasa (%)
9,5 mm (3/8 pulg)	100
4,75 mm (No. 4)	95 – 100
2,36 mm (No. 8)	80 – 100
1,18 mm (No. 16)	50 – 85
600 µm (No. 30)	25 – 60
300 µm (No. 50)	5 – 30
150 µm (No. 100)	0 – 10
75 µm (No. 200)	0 – 3

Nota. Tomado de *NTP 400.037:2021, Agregados para concreto. Especificaciones*, por INACAL (2021).

Con base en los datos obtenidos del ensayo de granulometría y en comparación con los límites establecidos por la norma, se creó la curva granulométrica del material, lo cual posibilitó el estudio de cómo se distribuyen las dimensiones de las partículas.

Ilustración 9. Curva granulométrica de la arena.



Fuente: Autoría propia

8.5.1 Análisis de resultados de la granulometría de arena

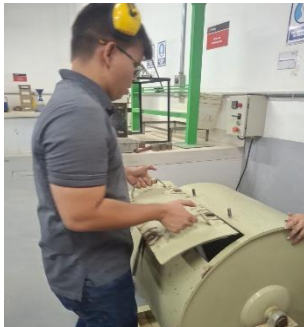
A partir de los resultados que se muestran en la Tabla 13, se concluye que la arena tiene un comportamiento granulométrico generalmente apropiado. El módulo de finura calculado es de 2,8, valor que se encuentra dentro del rango recomendado para agregados finos empleados en concreto, lo que indica que se trata de una arena de granulometría media, favorable para lograr una buena trabajabilidad y un adecuado desempeño en la mezcla.

Al analizar los porcentajes que pasan en cada uno de los tamices, se observa que la mayoría de los valores están dentro de los márgenes definidos por la norma, lo que evidencia una distribución granulométrica continua y bien gradada. Esta característica es importante, ya que contribuye a una mejor compactación del material y a una adecuada relación entre los diferentes tamaños de partículas. En el caso del tamiz N°200 (0,075 mm), se presenta un porcentaje que pasa de 22,29%, lo cual sugiere la presencia de una cantidad apreciable de material fino. Aunque este valor se encuentra por encima del límite de referencia, puede considerarse como un aspecto para tener en cuenta en el diseño de la mezcla, ya que estos finos pueden influir en la demanda de agua y en la cohesión del material. En general, la arena analizada muestra condiciones favorables para su uso, destacándose su adecuada gradación y un módulo de finura dentro de los parámetros recomendados.

8.6 ENSAYO PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA AL DESGASTE DE AGREGADOS GRUESOS, UTILIZANDO LA MÁQUINA DE LOS ÁNGELES

Este ensayo proporciona una evaluación directa de la idoneidad de los agregados para su uso en concreto, permitiendo así la medición de su resistencia al desgaste. Al confirmar que los agregados cumplen con las normas establecidas por la NTC 98, se garantiza que el concreto producido con ellos no sufrirá deterioros prematuros y será capaz de resistir las condiciones ambientales. Esta garantía es especialmente importante en aplicaciones donde la durabilidad es fundamental, como en pavimentos, puentes y otras infraestructuras. Por lo tanto, el ensayo no solo facilita la selección de materiales apropiados, sino que también contribuye a la durabilidad y seguridad de las estructuras en las que se emplean (ICONTEC, 2006).

Tabla 14. Registro fotográfico del ensayo de máquina de los ángeles.

Introducción del agregado en la máquina de los ángeles 	Cantidad del material que el tamiz N°12 retuvo 
--	---

Registro fotográfico del tamizado por el N°12	Peso del material retenido en el tamiz número 12
	

Fuente: Autoría propia

PROCEDIMIENTO DE MAQUINA DE LOS ANGELES

Se debe iniciar seleccionando una muestra de grava de $\frac{3}{4}$ que tenga un peso total de 5 kg para llevar a cabo el ensayo conforme a la tabla.

Tabla 15. Peso de la muestra para el ensayo.

Tamaño del tamiz, mm (abertura cuadrada)		Masa de los tamaños indicados, g			
Pasa	Retenido en	Granulometría			
		A	B	C	D
37,5	25,0	1 250 ± 25	-	-	-
25,0	19,0	1 250 ± 25	-	-	-
19,0	12,5	1 250 ± 10	2 500 ± 10	-	-
12,5	9,5	1 250 ± 10	2 500 ± 10	-	-
9,5	6,3	-	-	2 500 ± 10	-
6,3	4,75	-	-	2 500 ± 10	-
4,75	2,36	-	-	-	5 000 ± 10
Total		5 000 ± 10	5 000 ± 10	5 000 ± 10	5 000 ± 10

Nota: Extraído de la Norma Técnica Colombiana NTC 98: Procedimiento de prueba para evaluar la resistencia al desgaste de agregados gruesos, por ICONTEC (1995).

Primero, hay que limpiar y secar la muestra para el ensayo. Luego, siguiendo la norma NTC 98, que establece un método para determinar cuán resistente es a desgastarse por las abrasiones causadas por el impacto de agregados gruesos de menos de 37,5 mm, se debe utilizar la máquina de los ángeles. La muestra que se empleará en este ensayo podrá ser identificada por el tipo de grabación, y en este caso particular se usó una gradación de tipo A, tal como se muestra en la tabla 16:

Tabla 16. Tipo de gradación de acuerdo con la masa de la muestra.

Gradación	Número de esferas	Masa de la carga. g
A	12	5 000 ± 25
B	11	4 584 ± 25
C	8	3 330 ± 20
D	6	2 500 ± 15

Nota: Extraído de la Norma Técnica Colombiana NTC 98: Procedimiento de prueba para evaluar la resistencia al desgaste de agregados gruesos, por ICONTEC (1995).

Donde se empleará el material que queda en el tamiz N ¾ para un peso de 5 kg entre los dos. Por lo tanto, cuando la muestra esté lista, habrá que alistar la máquina de Los Ángeles. Se introducen esferas de acero en el tambor, cuya cantidad y tamaño son definidos por las regulaciones correspondientes. Las esferas de acero y la muestra de agregado se introducen en el tambor, que posteriormente se hace rotar a una velocidad constante entre 30 y 33 revoluciones por minuto (rpm). La normativa y la fracción del agregado determinan el número de revoluciones que se utilizan.

Generalmente, se aplican 500 revoluciones para agregados grueso que es lo que se usara en este caso, se colocara la muestra de grava con cuidado en el tambor de igual forma se colocara en sima las bolas de acero sobre ellas y se iniciara el proceso de rotación. Al finalizar el número prescrito de revoluciones, se detiene la máquina, y se retira el contenido del tambor. Después se tomará el contenido y se pasará por el tamiz n 12 para separar el material desgastado del que no lo está, al sepáralo se tomará la parte no desgastada y se lavará muy bien para quitar partículas de arena de la prueba y al final de que el material esta lavado y secado se pesará para compararlo con el inicial.

RESULTADOS DEL ENSAYO DE MAQUINA DE LOS ANGELES

Con una muestra inicial de 5000 g y una muestra final de 4181 g, valores obtenidos después de que el material fue sometido a los procesos de tamizado y secado previamente descritos, se procede a aplicar la ecuación correspondiente para determinar el desgaste del material, como se evidencia a continuación, permitiendo así cuantificar la pérdida de masa y evaluar de manera general su comportamiento frente a la abrasión.

$$\frac{5000 - 4181}{5000} * 100 = 16.5 \%$$

Tabla 17. Datos y resultado del ensayo de la máquina de los ángeles.

Tipo de gradación	# Esferas	Peso inicial (g)	Peso final (g)	% Desgaste
A	12	5005	4181	16,5

Fuente: Autoría propia

8.6.1 Análisis de resultados del ensayo de máquina de los ángeles

El ensayo realizado en la máquina de Los Ángeles mostró un desgaste del 16,5% para una gradación tipo A, lo que sugiere que el material presenta una mínima pérdida de masa al ser sometido a abrasión. Este resultado refleja que el agregado tiene buena resistencia al impacto y a la fricción, manteniendo sus características durante el proceso. En términos generales, se considera un valor favorable, lo que sugiere que el material es apto para su uso en concreto y puede contribuir a un buen desempeño y durabilidad de la mezcla.

8.7 ENSAYO DE DENSIDAD Y ABSORCIÓN PARA MATERIAL GRUESO

Para establecer las propiedades físicas que afectan el comportamiento del concreto, se lleva a cabo una prueba destinada a medir la densidad y la absorción de los agregados gruesos. Según ICONTEC, este procedimiento facilita la determinación de la densidad aparente, la densidad superficialmente seca en condiciones de saturación, así como el porcentaje de absorción del agregado grueso. Estos parámetros son significativos cuando se diseñan mezclas, ya que afectan tanto la cantidad de agua requerida como la manera en que los materiales interactúan entre sí. Esto contribuye a garantizar una buena durabilidad y rendimiento del concreto. (ICONTEC, 1995).

Tabla 18. Registro fotográfico para ensayo de densidad y absorción.

Inmersión de material grueso en agua	El material totalmente sumergido por 24h
	
Secado superficial del material grueso	Agregando el material a la canastilla

	
Peso del agregado sumergido 	Peso del agregado totalmente seco 

Fuente: Autoría propia

PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO DE DENSIDAD Y ABSORCIÓN

Para llevar a cabo el ensayo de absorción y densidad de un agregado grueso según la Norma NTC 176, en primer lugar, se introdujo una muestra de tres kilogramos del material en agua. Este volumen fue seleccionado de acuerdo con lo establecido en la norma, que determina el tamaño mínimo de la muestra según el tamaño nominal máximo del agregado, como se muestra en la tabla siguiente:

Tabla 19. Muestra mínima para la prueba de densidad y absorción de agregados gruesos.

Tamaño nominal (mm)	Masa mínima de la muestra de ensayo (kg)
12,5 o menos	2
19	3
25	4
37,5	5
50	8
63	12
75	18
90	25
100	40
112	50
125	75
150	125

Fuente: ICONTEC (1995). *NTC 176*.

Después de tamizarlo se toma el material y se colocan en las probetas, después se colocó un líquido de aproximadamente tres centímetros por encima de su superficie. La inmersión se mantuvo durante un día para garantizar que el agregado alcanzara la saturación. Posteriormente, la muestra sumergida se pesó utilizando una canastilla diseñada para medir la densidad. A continuación, el agregado se secó superficialmente utilizando una toalla absorbente para mantener el peso en una condición superficialmente seca sin eliminar la humedad interna. Finalmente, la muestra se secó por completo en el horno hasta el momento en que llegó a un peso constante, lo que permitió obtener el peso en estado seco completo. Estos tres pesos es decir sumergido, superficialmente seco y seco en horno son esenciales para calcular tanto la densidad del agregado como su porcentaje de absorción según los procedimientos establecidos por la (ICONTEC, 1995).

RESULTADOS DEL ENSAYO DE DENSIDAD Y ABSORCIÓN

Según la norma NTC 176, se definieron tres pesos fundamentales en la prueba de absorción y densidad del agregado grueso. En primer lugar, se pesó la muestra para determinar su condición saturada tras estar sumergida durante 24 horas. Luego, se determinó el peso en estado superficialmente seco al eliminar el agua sobrante sin alterar la humedad interna. Al final, la muestra fue secada en horno hasta que llegó a un peso estable, lo que permitió calcular su peso seco. Los siguientes datos se adquirieron a partir de este procedimiento.

Tabla 20. Datos obtenidos a partir del ensayo de densidad y absorción del agregado grueso.

Datos

A	5010,00 g
B	5113,00 g
C	2327,00 g

Fuente: Autoría propia.

Se reemplazan los datos conseguidos en la ecuación D_s mencionada en el marco teórico, con el fin de determinar el valor correspondiente y continuar con el análisis de los resultados del ensayo.

$$D_s = \frac{0.9975g * 5010.00 \text{ g}}{5010.00 \text{ g} - 2327.00 \text{ g}} = 1.83 \text{ g/cm}^3$$

Posteriormente, se procede a calcular la densidad relativa sh mediante el reemplazo de los valores obtenidos en la ecuación (7).

$$D_s \text{ relativa sh} = \frac{5010.00g}{(5113.00g - 2327.00 \text{ g})} = 1.80 \text{ g/cm}^3$$

A continuación, se establece la densidad relativa en condiciones de saturación superficial seca (SSS) mediante un método de sustitución que permite analizar el comportamiento del agregado en un entorno similar al que experimenta dentro de la mezcla de concreto, utilizando datos derivados de la ecuación pertinente.

$$D_s \text{ relativa sss} = \frac{5113.00g}{(5113.00g - 2327.00 \text{ g})} = 1.84 \text{ g/cm}^3$$

También se calcula la densidad aparente, la cual permite relacionar la masa del agregado con su volumen total, que incluye espacios vacíos permeables e impermeables.

$$D_s \text{ aparente} = \frac{5010.00g}{(5010.00g - 2327.00 \text{ g})} = 1.87 \text{ g/cm}^3$$

Finalmente, se determina el porcentaje de absorción, lo cual proporciona información sobre la cantidad de agua que el agregado puede retener en sus poros.

$$\% \text{ de absorcion} = \frac{5113.00g - 5010.00}{5010.00} \times 100 = 2\%$$

Así, los resultados alcanzados son los siguientes y se presentan de manera resumida en la tabla que aparece a continuación.

Tabla 21. Datos obtenidos del ensayo de densidad y absorción del agregado grueso

Densidad relativa (SH)	Densidad	Densidad relativa (SSS)	Densidad aparente	Absorción (%)
1,80	1,83 g/cm ³	1,84	1,87	2%

Fuente: Autoría propia.

8.7.1 Análisis de resultados de ensayo de densidad y absorción para material grueso

De acuerdo con los resultados obtenidos y lo establecido por la ICONTEC en la NTC 176, se puede decir que el agregado grueso presenta un comportamiento adecuado, ya que los valores de densidad son muy similares entre sí, lo cual es normal porque dependen de la condición del material, Seco, saturado con una capa superficial seca y aparente. Adicionalmente, el 2% de absorción, indica que el material no retiene mucha agua, lo que resulta favorable al momento de diseñar la combinación de concreto, ya que no tiene un impacto significativo sobre la cantidad de agua requerida. Por lo general, el material satisface las expectativas de acuerdo con la norma y puede ser empleado sin problemas en la producción de concreto, teniendo en mente estos valores durante la dosificación.

8.8 ENSAYO DE DENSIDAD Y ABSORCIÓN PARA AGREGADO FINO

La evaluación de la densidad y la capacidad de absorción de los agregados finos tiene como finalidad analizar las propiedades físicas que impactan directamente el comportamiento del concreto, tales como la habilidad de los materiales para retener agua y la relación existente entre su volumen y masa. De acuerdo con las directrices establecidas por las normas ICONTEC, en particular la norma NTC 237, este ensayo permite determinar la densidad bajo diversas condiciones: seca, saturada superficialmente seca y aparente, así como también el porcentaje de absorción del agregado fino. Estos parámetros son esenciales en el diseño de mezclas, ya que influyen en aspectos como la trabajabilidad, la dosificación del agua y el rendimiento final del concreto (ICONTEC, 1995).

Tabla 22. Registro fotográfico para el ensayo de densidad y absorción para agregado fino.

Muestra de arena saturada, expandida en una bandeja para poder secarla superficialmente. 	Esparcimiento de la muestra con el fin de alcanzar la condición superficialmente seca 
Llenado del cono de arena para comprobar que el agregado fino se encuentra en condición superficialmente seca (SSS).	Compactación del agregado fino en el cono por capas para verificar la condición saturada superficialmente seca (SSS).

	
Arena extendida con formación de pico, indicando condición SSS. 	Peso de la muestra antes de ser adicionada al picnómetro, sin tarar. 
Limpieza de los laterales con el irrigador y llenado del picnómetro hasta el punto de calibración. 	Peso final de la muestra completamente seca, sin tarar. 

Fuente: Autoría propia.

PROCEDIMIENTO DE DENSIDAD Y ABSORCION

Primero, con una muestra de 1000 gramos del material fino se sumerge y se prepara completamente en agua, asegurando una profundidad aproximada de 3 cm durante un período de 24 horas, de acuerdo con la ICONTEC mediante la NTC 237, con el fin de garantizar su completa saturación; posteriormente, la muestra se retira y se extiende sobre una bandeja para realizar el secado superficial, eliminando el exceso de humedad sin afectar el contenido interno de agua. Luego, se lleva a cabo la prueba del cono de arena para verificar que el material se

encuentre en condición saturada superficialmente seca (SSS), colocando el agregado en capas y observando su comportamiento. A continuación, se prepara el picnómetro de 500 mL, llenándolo con agua y verificando la ausencia de burbujas de aire; seguidamente, se introduce la muestra y se realizan movimientos suaves para sacar el aire atrapado, completando el llenado hasta la marca de calibración. Al final, se lleva la muestra al horno hasta que esté totalmente seca y después se quita del picnómetro. Esto indica el término de la prueba.

RESULTADOS DEL ENSAYO DE DENSIDAD Y ABSORCION

Una vez realizado el ensayo y obtenidos los pesos en sus diferentes condiciones es decir seco, saturado superficialmente seco, los datos que se muestran a continuación fueron registrados en la tabla subsiguiente.

Tabla 23. Datos obtenidos a partir del ensayo de densidad y absorción del agregado fino.

DATOS	
A	493,00 g
B	678,00 g
S	500,00 g
C	986,00 g

Fuente: Autoría propia.

Con estos datos, se procede a calcular la densidad aparente del agregado fino utilizando la ecuación (9).

$$Ds \text{ aparente} = 0,9975 * \frac{493.00}{(678.00 + 500.00 - 986.00)} = 2.56 \text{ g/cm}^3$$

A continuación, se calcula la densidad nominal utilizando la ecuación de Ds nominal.

$$Ds \text{ nominal} = \frac{0,9975 * 493.00 \text{ g}}{(678.00 \text{ g} + 493.00 \text{ g} - 986.00 \text{ g})} = 2.66 \text{ g/cm}^3$$

Finalmente, para determinar el porcentaje de absorción se utiliza la ecuación a continuación.

$$Absorción, \% = \left[\frac{500.00 \text{ g} - 493.00 \text{ g}}{493.00 \text{ g}} \right] \times 100 = 1\%$$

8.8.1 Análisis de resultados de ensayo de densidad y absorción para material fino

Los resultados indican que el contenido de finos tiene una densidad de 2,56 g/cm³ y una densidad nominal de 2,66 g/cm³, cifras bastante parecidas entre sí, lo cual es habitual porque se refieren a distintas condiciones del material. Esta diferencia señala que el agregado tiene

una estructura relativamente compacta y con un número no muy alto de vacíos. El 1% de absorción indica que el material tiene poca capacidad para retener agua, ya que este valor es bajo. Esto resulta ventajoso para diseñar mezclas de concreto porque no será preciso modificar en gran medida la cantidad de agua, lo que simplificará el control de la dosificación.

8.9 ENSAYO PARA DETERMINAR LA MASA Y VACIOS UNITARIOS DEL AGREGADO GRUESO Y FINOS

La finalidad del ensayo de masa unitaria para agregados finos y gruesos consiste en medir el peso del material en un volumen específico, ya que esto es crucial para diseñar y controlar las mezclas de concreto. Según ICONTEC, a través de la norma NTC 92, este ensayo posibilita el cálculo de la masa unitaria en su estado suelto y compactado. Esto contribuye a determinar cómo están dispuestas las partículas y cuántos espacios vacíos se encuentran en el material (ICONTEC, 1995).

Tabla 24. Registro fotográfico para el ensayo de determinación de masa y vacíos unitarios.

Peso del molde con agua y la base de vidrio. 	Llenado del molde por el método de paleo 
Llenado del molde con el método del paleo. 	Nivelación de la muestra para retirar partículas sobresalientes. 

Fuente: Autoría propia.

PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO DE MASA Y VACIOS

Para calibrar el molde, inicialmente se llenó con 2,8 litros de agua y se completó hasta su capacidad total; posteriormente, se cubrió con una placa de vidrio para quitar el agua sobrante y las burbujas de aire, garantizando así un volumen preciso. Luego, el molde se secó y se procedió a llenarlo mediante el método de paleo sin compactación, registrando el peso del

material en esta condición. Este procedimiento se llevó a cabo tanto para el agregado grueso como para el fino.

Posteriormente, se aplicó el método de compactación por capas de acuerdo con lo establecido por la ICONTEC en la NTC 92, dividiendo el molde en tres estratos y compactando cada uno usando 25 golpes distribuidos de manera uniforme con una varilla. Este proceso se repitió hasta completar el llenado del molde, para luego nivelar la superficie con una regla y registrar el peso del material compactado. Tanto el método suelto como el compactado se realizaron para ambos materiales es decir arena y grava, repitiendo cada procedimiento tres veces con el propósito de lograr resultados más fiables y una media que sea representativa, garantizando así una adecuada evaluación de la masa unitaria y las propiedades del material.

RESULTADOS DEL ENSAYO DE MASA Y VACIOS

Como primera instancia, para obtener los resultados del ensayo, se calculó el volumen del molde, obteniendo un valor de $0,0032 \text{ m}^3$ y un factor de $(1/V) = 307,81 \text{ m}^{-3}$. Con estos datos, se procedió a calcular la masa unitaria del agregado fino en condición compactada, obteniéndose los siguientes resultados.

Tabla 25. Datos para el cálculo de la masa unitaria del agregado fino en condición compactada.

DATOS	
G	8,08 kg
T	2,32 kg
V	0,0032 m3
F	307,81 m3

Fuente: Autoría propia.

Con estos datos, se utilizan las ecuaciones 14 y 15 para calcular el porcentaje de vacíos y la masa unitaria, cuyos hallazgos se muestran en la tabla siguiente.

Tabla 26. Resultados obtenidos de finos compactados.

FINOS COMPACTADOS				
DATOS		PROMEDIO	MASA UNITARIA	CONTENIDO DE VACIOS
ENSAYO 1	8,061	8,075	1770,22 kg/m3	31%
ENSAYO 2	8,089			
ENSAYO 3	8,097			

Fuente: Autoría propia

De igual manera, se obtuvieron los datos del material fino en condición suelta, es decir, sin compactación.

Tabla 27. Datos para el cálculo de la masa unitaria del agregado fino en condición suelta.

DATOS	
G	7,81 kg

T	2,33 kg
V	0,0032 m3
F	307,81 m3

Fuente: Autoría propia

Con esta información, se determinó el porcentaje de vacíos y la masa unitaria del material en estado no compacto.

Tabla 28. Resultados obtenidos de finos sueltos.

FINOS COMPACTADOS				
DATOS		PROMEDIO	MASA UNITARIA	CONTENIDO DE VACIOS
ENSAYO 1	8,061	8,075	1770,22 kg/m3	31%
ENSAYO 2	8,089			
ENSAYO 3	8,097			

Fuente: Autoría propia

Con el propósito de comparar su comportamiento y finalizar el análisis de los materiales, ahora se realiza el cálculo de la masa unitaria del agregado grueso, empleando la información que se obtuvo del ensayo en condiciones sueltas y compactadas. Por lo tanto, se obtuvieron los datos siguientes para el agregado grueso en estado compactado.

Tabla 29. Datos para el cálculo de la masa unitaria del agregado grueso en condición compactada.

DATOS	
G	7,36 kg
T	2,32 kg
V	0,0032 m3
F	307,81 m3

Fuente: Autoría propia

Ahora se determina la masa por unidad de volumen y la cantidad de espacios vacíos en el agregado grueso una vez que ha sido compactado.

Tabla 30. Resultados obtenidos de gruesos compactados.

GRUESO COMPACTADOS				
DATOS		PROMEDIO	MASA UNITARIA	CONTENIDO DE VACIOS
ENSAYO 1	7,310	7,358	1549,37 kg/m3	17%
ENSAYO 2	7,405			
ENSAYO 3	7,346			

Fuente: Autoría propia

Ahora se recogen los datos para el agregado grueso en estado suelto, con los resultados que siguen.

Tabla 31. Datos para el cálculo de la masa unitaria del agregado grueso en condición suelta.

DATOS	
G	6,91 kg
T	2,33 kg
V	0,0032 m ³
F	307,81 m ³

Fuente: Autoría propia

Tabla 32. Resultados obtenidos de gruesos sueltos.

GRUESO SUELTO				
DATOS		PROMEDIO	MASA UNITARIA	CONTENIDO DE VACIOS
ENSAYO 1	6,893	6,91	1411,93 kg/m ³	24%
ENSAYO 2	6,933			
ENSAYO 3	7,021			

Fuente: Autoría propia

8.9.1 Análisis de resultados la masa y vacíos unitarios del agregado grueso y finos

Los resultados muestran que, tanto en el agregado grueso como en los finos, la condición compactada presenta una mayor masa unitaria y una menor proporción de vacíos en contraste con el estado suelto. En los finos, el cambio no es muy amplio, pasando de 1689,11 kg/m³ a 1770,22 kg/m³, con una reducción de vacíos del 34% al 31%, lo que indica un mejor acomodo de las partículas. En el caso del agregado grueso, la diferencia es un poco más marcada, ya que la masa unitaria aumenta de 1411,93 kg/m³ a 1549,37 kg/m³ y los vacíos disminuyen de 24% a 17%, mostrando una mejor reorganización del material al compactarse. En conjunto, estos resultados permiten ver cómo varía el comportamiento de los agregados según su estado, siendo información útil para ajustar la dosificación y lograr una mezcla más equilibrada.

8.10 ENSAYO DE EQUIVALENTE DE ARENAS

Con el fin de analizar los resultados del ensayo de equivalente de arena, se tiene en cuenta que este procedimiento permite evaluar la cantidad de finos arcillosos presentes en el agregado fino, aspecto que influye directamente en la calidad del material. Según la ICONTEC, a través de la norma NTC 174, este ensayo define el procedimiento para establecer la proporción relativa de partículas finas indeseables en la arena, proporcionando un valor que sirve como referencia para analizar su aptitud en aplicaciones como la elaboración de concreto y capas granulares (ICONTEC, 2017). A partir de esto, se presentan a continuación los resultados obtenidos.

Tabla 33. Registro fotográfico del ensayo de equivalente de arena.

Preparación de la muestra para su adición a la solución.	Llenado de las probetas hasta las 4 pulgadas.
--	---



Adición de la muestra a la solución.



Probetas mostrando la separación entre arena y finos.



Lectura de la capa de arcilla para la primera muestra.



Lectura de la capa de arena para la primera muestra.



Fuente: Autoría propia

PROCEDIMIENTO DEL ENSAYO DE EQUIVALENCIA DE ARENA

El espécimen se distribuyó en tres probetas graduadas de 15 pulgadas, llenándolas inicialmente con la solución hasta una altura de 4 pulgadas, de acuerdo con lo que la NTC 174 establece en el ICONTEC. Cada probeta se ensayó en tiempos de 3, 6 y 9 minutos, aplicando golpes en la base para lograr una mezcla más uniforme; posteriormente, se realizó una agitación de 10 segundos seguida de otra de 30 segundos. Luego, se retiraron los tapones y se limpiaron las paredes internas para asegurar que todo el material fino descendiera al fondo; seguidamente, se completó el llenado hasta las 15 pulgadas. Las probetas se dejaron en

reposo durante 20 minutos para permitir la sedimentación, y finalmente se midieron las alturas de la capa de arcilla y de arena utilizando la pesa correspondiente, obteniendo así los valores necesarios para el análisis del material.

RESULTADOS DEL ENSAYO DE EQUIVALENCIA DE ARENA

Como se mencionó anteriormente, se registraron dos datos importantes: la altura del depósito de arcilla y la altura de la arena. Después del período de sedimentación, se mide la altura de la arcilla. Esto muestra la cantidad de material fino que se ha asentado en el fondo del frasco. Por el contrario, la altura de la arena se mide utilizando una pesa específica para el equivalente de arena. Esto permite calcular el volumen de arena retenida después de la sedimentación. El valor del equivalente de arena se determina debido a la discrepancia entre la altura total del líquido y la del reservorio de arcilla.

Tabla 34. Resultados obtenidos aplicando la formula mencionada anteriormente.

ARENAS					
Muestra	Arcilla	arena	resta 10-ARENA	TOTAL	PROMEDIO
P1	3,95 in	13,20 in	3,20 in	81	88
P2	2,60 in	13,20 in	3,20 in	123	
P3	3,70 in	12,20 in	2,20 in	59	

Fuente: Autoría propia.

8.10.1 Análisis de resultados del ensayo de equivalente de arenas

A partir de los hallazgos del ensayo de equivalente de arena, se puede ver que las tres muestras tienen distintas cifras en lo que respecta a la altura de la capa de arcilla y arena, lo cual impacta directamente el resultado final del análisis. La muestra P1 obtuvo un valor de 81, la P2 un valor de 123 y la P3 un valor de 59, con un promedio general de 88.

Tabla 35. Para construir capas asfálticas con una mezcla asfáltica natural, se requieren agregados pétreos combinados.

CARACTERÍSTICA	Norma de Ensayo INV	REQUISITO
Dureza, agregado grueso (o)		
Desgaste en la máquina de los Ángeles, máximo (%) - Capa de: rodadura / intermedia	E – 218-13	25 / 35
Coefficiente de pulimiento acelerado para rodadura, Mínimo	E – 232-13	0.45
Durabilidad (O)		
Pérdidas en ensayo de solidez en sulfato de magnesio, Máximo (%)	E-220-13	18
Limpieza, agregado grueso (F)		
Impurezas en agregado grueso, máximo (%)	E-237-13	0.5
Limpieza, gradación combinada (F)		
Índice de plasticidad, máximo (%)	E-125-13 y E-126-13	7
Equivalente de arena, mínimo (%) (Nota 1)	E-133-13	50
Valor de azul de metileno, máximo (Nota 1)	E-235-13	10
Geometría de las partículas, agregado grueso (F)		
Partículas planas y alargadas, relación 5:1, máximo (%)	E-240-13	10
Caras fracturadas, mínimo (%) - Una cara: rodadura / intermedia - Dos caras: rodadura / intermedia	E-227-13	75 / 60
Geometría de las partículas, agregado fino (F)		
Angularidad de la fracción fina, método A, mínimo (%) - Capa de: rodadura / intermedia	E-239-13	40 / 35
Adhesividad (O)		
Agregado grueso: Cubrimiento de los agregados con materiales asfálticos en presencia del agua hirviendo (%)	E-757-13	Reportar
Agregado fino: adhesividad de los ligantes bituminosos a los agregados finos (método Riedel-Weber), índice mínimo	E - 774-13	4

Fuente: (INVIAS, 2013)

Al comparar con lo establecido por la INVIAS, donde el valor mínimo es 50, todas las muestras cumplen con el requisito. En general, según los resultados indican que la calidad del material es buena. ya que no presenta una alta cantidad de finos arcillosos, por lo que puede ser utilizado sin problema, aunque se evidencia una ligera variación entre muestras que puede deberse a la manipulación o a la misma distribución del material.

9 DISEÑO DE MEZCLA DE CONCRETO

La estructura para la mezcla se lleva a cabo con el objetivo de establecer las cantidades apropiadas de cemento, agua, agregado grueso y fino requeridas para lograr un concreto que satisfaga los requisitos de resistencia y trabajabilidad y durabilidad requeridas. Este procedimiento permite optimizar el uso de los materiales disponibles y garantizar que la mezcla presente un comportamiento adecuado tanto en estado fresco como endurecido. Para ello, se siguió la metodología propuesta por American Concrete Institute, la cual establece criterios técnicos para definir una dosificación inicial acorde con las características del concreto requerido (American Concrete Institute, 2009).

Tabla 36. Datos de los materiales empleados en el diseño de mezcla de concreto.

CARACTERISTICAS DE LOS MATERIALES	
CEMENTO	
Densidad	1 g/cm ³
Clasificación	Tipo 1
Peso específico	3,15 kg/m ³
ARENA	
Módulo de finura	276,6%
Densidad aparente seca	2560 kg/m ³
Absorción de la arena	1%
Masa unitaria suelta	1689,11 kg/m ³
Masa unitaria compacta	1770,22 kg/m ³
GRAVA	
Tamaño máximo del agregado	19,00 mm
Densidad aparente seca	1870 kg/m ³
Absorción de la grava	2%
Masa unitaria suelta	1411,93 kg/m ³
Masa unitaria compacta	1549,37 kg/m ³

Fuente: Autoría propia

Una vez caracterizados los materiales mediante la determinación de sus características mecánicas y físicas, se procede a establecer la resistencia promedio requerida del concreto, la cual se obtiene a partir de la resistencia especificada de diseño y considerando los criterios de variabilidad y supervisión de la calidad. Este procedimiento se lleva a cabo en función de las recomendaciones del método del American Concrete Institute, específicamente lo establecido en la norma ACI 211.1, donde se emplean la siguiente tabla que permiten estimar la resistencia promedio.

Tabla 37. Resistencia promedio requerida para el diseño de mezcla.

Resistencia a compresión especificada, f'_c kg/cm²	Resistencia a compresión media requerida, f'_{cr} kg/cm²
Menos de 210	$f'_c + 70$
210 a 350	$f'_c + 84$
Más de 350	$1.10f'_c + 50$

Fuente: Adaptado de ACI 211.1 (American Concrete Institute, 2002).

Después de definir la resistencia media necesaria, se escoge el asentamiento del concreto. Este depende tanto del tipo de elemento estructural como de las condiciones de compactación y colocación. Este valor se determina según los rangos sugeridos en la tabla siguiente.

Tabla 38. Selección del asentamiento del concreto (ACI 211.1)

Construcción de Concreto	Revenimiento, mm (pulg.)	
	Máximo	Mínimo
Zapatas y muros de cimentación reforzados	75 (3)	25 (1)
Zapatas, cajones y muros de subestructuras sin refuerzo	75 (3)	25 (1)
Vigas y muros reforzados	100 (4)	25 (1)
Columnas de edificios	100 (4)	25 (1)
Pavimentos y losas	75 (3)	25 (1)
Concreto masivo	75 (3)	25 (1)

Fuente: Adaptado de ACI 211.1 (American Concrete Institute, 2002).

Después de elegir el asentamiento del concreto, se calcula el volumen de agua para mezclar. Este depende sobre todo de la trabajabilidad que se necesite y de las dimensiones máximas nominales del agregado. Este valor se logra utilizando las tablas que el American Concrete Institute sugiere en la norma ACI 211.1, que determinan volúmenes aproximados de agua requeridos para lograr la compactación deseada, asegurando de esta manera una consistencia apropiada sin poner en peligro la resistencia del concreto.

Tabla 39. Volumen de agua para mezclar según el asentamiento y las dimensiones máximas del agregado.

	Agua, kilogramos por metro cúbico de concreto, para los tamaños de agregado indicados							
Revenimiento, mm	9.5 mm	12.5 mm	19 mm	25 mm	37.5 mm	50 mm	75 mm	150 mm
25 a 50	207	199	190	179	166	154	130	113
75 a 100	228	216	205	193	181	169	145	124
150 a 175	243	228	216	202	190	178	160	—
Cantidad aproximada de aire atrapado en un concreto sin aire incluido, porcentaje	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3	0.2

Fuente: Adaptado de ACI 211.1 (American Concrete Institute, 2002).

Después, se emplea la tabla correspondiente para establecer la relación del cemento y el agua. Los valores que están más cerca de la resistencia requerida son seleccionados y se obtiene un valor ajustado por interpolación.

Tabla 40. Relación agua/cemento en función de la resistencia a la compresión del concreto.

Resistencia compresión 28 días	Concreto sin aire incluido (a/cm)	Concreto con aire incluido (a/cm)
(MPa)		
450 (45)	0.38	0.30
400 (40)	0.42	0.34
350 (35)	0.47	0.39
300 (30)	0.54	0.45
250 (25)	0.61	0.52
200 (20)	0.69	0.60
150 (15)	0.79	0.70

Fuente: Elaborada por los autores por medio de la Adaptado de ACI 211.1 (American Concrete Institute, 2002).

Teniendo en cuenta los datos de la tabla y una resistencia de diseño de 29.4 MPa, se lleva a cabo una interpolación lineal entre los valores de 30 MPa y 25 MPa, ya que la resistencia dada se encuentra entre estos dos valores. La interpolación se realiza mediante la siguiente ecuación:

$$a/c = 0.54 + \frac{25 - 30}{29.4 - 30} * (0.61 - 0.54)$$

y sustituyendo los valores para el concreto sin aire incluido, se obtiene:

$$a/c = 0.55$$

De esta manera, para una resistencia de 29.4 MPa, la proporción de agua/cemento es de aproximadamente 0.55. A continuación, con la proporción de agua/cemento determinado, se calcula el contenido de cemento empleando la fórmula sugerida utilizando el método del Instituto Americano de Concreto (ACI):

$$C = \frac{205 \text{ kg/m}^3}{0.55}$$

Se logró un contenido de cemento de 374 kg/m³, que era la cantidad necesaria en la mezcla para conseguir la resistencia exigida. Este valor se utiliza para determinar la cantidad de agregado grueso a través del método ACI 211. Para conseguir esto, se determina el volumen del agregado grueso seco compactado por cada unidad de concreto. Para ello, se considera la dimensión nominal máxima del agregado y el módulo de finura de la arena, lo que se ilustra en la tabla.

Tabla 41. El volumen de agregado grueso seco que se compacta por cada unidad de volumen de concreto.

Tamaño max del agregado, mm (pulg.)	Módulo de finura de la arena			
	2.40	2.60	2.80	3.00
9.5 (3/8)	0.50	0.48	0.46	0.44
12.5 (1/2)	0.59	0.57	0.55	0.53
19 (3/4)	0.66	0.64	0.62	0.60
25 (1)	0.71	0.69	0.67	0.65
37.5 (1 1/2)	0.75	0.73	0.71	0.69
50 (2)	0.78	0.76	0.74	0.72
75 (3)	0.82	0.80	0.78	0.76
150 (6)	0.87	0.85	0.83	0.81

Fuente: Adaptado de ACI 211.1 (American Concrete Institute, 2002).

Luego, se multiplica esta cifra por el peso unitario seco compactado del agregado grueso con el propósito de determinar cuántos metros cúbicos de mezcla contienen ese agregado.

$$\text{Peso de grava} = \frac{0.62}{1549.37 \text{ kg/m}^3} = 960.6 \text{ kg/m}^3$$

Se estableció que la cantidad de agregado grueso es 960.6 kg/m³, utilizando el valor extraído de la tabla. Luego, se extrae el contenido de agua a partir de la tabla del método ACI 211, eligiendo el valor apropiado en función del asentamiento solicitado y de la dimensión máxima nominal del agregado.

Tabla 42. Agua de mezcla calculada y contenido de aire para varias colonias y dimensiones máximas nominales del agregado.

	Agua, kilogramos por metro cúbico de concreto, para los tamaños de agregado indicados							
Revenimiento, mm	9.5 mm	12.5 mm	19 mm	25 mm	37.5 mm	50 mm	75 mm	150 mm
25 a 50	207	199	190	179	166	154	130	113
75 a 100	228	216	205	193	181	169	145	124
150 a 175	243	228	216	202	190	178	160	—
Cantidad aproximada de aire atrapado en un concreto sin aire incluido, porcentaje	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3	0.2

Fuente: Adaptado de ACI 211.1 (American Concrete Institute, 2002).

Lo que produce un contenido de agua de 205 kg/m³. Luego, para obtener la cantidad de agua y la proporción de agua/cemento seleccionado se emplean para determinar el contenido de cemento, dividiendo el contenido acuático por dicha relación.

$$\text{Peso de cemento} = \frac{205 \text{ kg/m}^3}{0.55} = 374 \text{ kg/m}^3$$

Lo que produce un contenido de cemento de 374 kg/m³. Luego, se determinan los volúmenes absolutos de los materiales, estableciendo el volumen del agua, el cemento y el agregado grueso a través de las siguientes fórmulas:

$$\text{volumen del cemento} = \frac{374 \text{ kg/m}^3}{3.15 * 1000 \text{ kg/m}^3} = 0.12 \text{ m}^3$$

$$\text{volumen del agua} = \frac{205 \text{ kg/m}^3}{1000 \text{ kg/m}^3} = 0.21 \text{ m}^3$$

$$volumen\ de\ grava = \frac{906.6\ kg/m^3}{1.87 * 1000\ kg/m^3} = 0.51\ m^3$$

En última instancia, la cantidad del agregado fino se obtiene al restarle los volúmenes:

$$volumen\ de\ grava = 1 - (0.12 + 0.21 + 0.38) = 0.28\ m^3$$

Obtenido el volumen del agregado fino, se procede a calcular su peso, multiplicando dicho volumen por la densidad del agua y el peso específico de los agregados finos. Con ello se determina la cantidad de arena necesaria dentro del metro cúbico de mezcla.

$$volumen\ de\ grava = \frac{0.14\ m^3}{2.56 * 1000\ kg/m^3} = 365.15\ m^3$$

Con los volúmenes absolutos ya calculados, se procede a determinar la densidad teórica de la mezcla, sumando las masas de cada uno de los materiales que constituyen un metro cúbico de concreto. Este valor representa la masa total teórica del concreto en estado fresco por unidad de volumen.

$$Densidad\ teorica = 205 \frac{kg}{m^3} + \frac{374kg}{m^3} + 960.6 \frac{kg}{m^3} + 719.6 \frac{kg}{m^3} = 2259\ kg/m^3$$

Tras establecer los componentes y proporciones de cada material, se determina la dosificación definitiva de la mezcla. La dosificación que se presenta aquí indica las proporciones requeridas por metro cúbico de concreto de agua, agregado grueso, agregado fino y cemento. Los hallazgos adquiridos se presentan en la tabla siguiente.

Tabla 43. Dosificación final de la mezcla de concreto por metro cúbico.

Material	Volumen	Peso	Dosificación respecto a los agregados
Agua	0,21 m ³	205 Kg/m ³	0,55
Cemento	0,12 m ³	374 Kg/m ³	1,00
Aire	0,02 m ³	-----	-----
Grava	0,38 m ³	961 Kg/m ³	2,57
Arena	0,28 m ³	720 Kg/m ³	1,93

Fuente: Autoría propia

De acuerdo con esto, se calcula el volumen de los cilindros de ensayo, considerando un diámetro de 0.15 m y una altura de 0.30 m, mediante la expresión del volumen de un cilindro.

$$V = \pi(0.075)^2(0.30) = 0.0053m^3$$

El volumen obtenido para un cilindro se multiplica por tres, correspondiente al número de especímenes a elaborar. De esta manera se determina el volumen total de concreto requerido para la fabricación de los tres cilindros de ensayo.

$$V = 0.0053m^3 * 3 = 0.016 m^3$$

Este volumen total se multiplica por la dosificación obtenida por metro cúbico y, adicionalmente, se considera un 20% de desperdicio para compensar pérdidas durante el mezclado, manipulación y llenado de los moldes, obteniendo así las cantidades finales de materiales requeridas, presentadas la tabla 44.

Tabla 44. Dosificación de materiales para la elaboración de cilindros de ensayo.

Material	Dosificación respecto a los agregados	
Agua	205,00 kg/m ³	3,91 Kg
Cemento	373,81 kg/m ³	7,13 Kg
Grava	960,61 kg/m ³	18,33 Kg
Arena	719,59 kg/m ³	13,73 Kg

Fuente: Autoría propia

Para la mezcla con sustitución, se modifica la cantidad de cemento teniendo en cuenta un reemplazo del 10% por cáscaras de huevo. Para calcular el nuevo contenido de cemento, se multiplica la cantidad original de cemento por la fracción que queda, tal como se indica en la expresión siguiente:

$$Cr = 7,13 Kg(1 - 0.10) = 6.42$$

Donde Cr representa la cantidad de cemento ajustada para la mezcla con sustituciones. Después, la cantidad de cáscara de huevo añadida se calcula restando el contenido inicial de cemento, como se ilustra a continuación:

$$CH = 7.13 - 6.42 = 0.71 kg$$

donde CH corresponde a la cantidad de cáscara de huevo incorporada como material de sustitución.

REAJUSTE DEL DISEÑO DE MEZCLA POR CORRECCIÓN DE HUMEDAD DE AGREGADOS Y CONTENIDO DE CEMENTO

Este reajuste se realizó debido a que el diseño de mezcla inicial presentó una resistencia de 33,3 MPa, superando la resistencia de diseño establecida de 29,4 MPa. Aunque el resultado obtenido se encuentra dentro de los rangos aceptables, desde el punto de vista económico no resulta viable, ya que implica un consumo mayor de cemento al requerido.

Por esta razón, se efectuó un reajuste al diseño de mezcla, tomando como primera medida la corrección por humedad de los agregados, debido a que este parámetro no se había contemplado anteriormente en la dosificación inicial. Con ello, se buscó optimizar la cantidad de materiales empleados y obtener una mezcla más eficiente y acorde con la resistencia de diseño establecida.

Tabla 45. Corrección por humedad de los agregados.

CORRECCION POR HUMEDAD DEL AGREGADO	
Agregado fino	10,94 Kg/m ³
Peso húmedo	730,53 Kg/m ³
Humedad Superficial	1,51 %
Agregado grueso	21,61 Kg/m ³
Peso húmedo	982,22 Kg/m ³
Humedad Superficial	2,23 %

Fuente: Autoría propia

De acuerdo con los resultados obtenidos, el agregado fino presentó una humedad superficial de 1,51 %, generando un aporte de humedad de 10,87 kg/m³, mientras que el agregado grueso presentó una humedad superficial de 2,23 %, con un aporte de 21,42 kg/m³. En conjunto, los agregados aportaron un total de 32,29 kg/m³ de agua a la mezcla.

Tabla 46. Aporte de humedad de los agregados

APORTE DE HUMEDAD DE LOS AGREGADOS	
Agregado fino	10,87 Kg/m ³
Agregado grueso	21,42 Kg/m ³
Total	32,29 Kg/m ³
Agua efectiva	172,71 Kg/m ³

Fuente: Autoría propia

Con base en estas correcciones, el contenido de agua efectiva del diseño de mezcla fue ajustado a 172,71 kg/m³, permitiendo un control más preciso de la relación agua-cemento y un comportamiento más acorde con la resistencia de diseño requerida.

posteriormente, se realizó un reajuste en la cantidad de cemento del diseño de mezcla, debido a que la resistencia obtenida experimentalmente fue superior a la resistencia de diseño establecida. Inicialmente, la mezcla presentó una resistencia de 32,8 MPa frente a una resistencia de diseño de 29,4 MPa, evidenciando un sobre diseño en la dosificación del cemento. Para optimizar la mezcla, se empleó un factor de ajuste obtenido a partir de la relación entre la resistencia de diseño y la resistencia experimental, obteniendo un valor de

$$\frac{29.4}{32.8} = 0.90$$

Con base en este factor, se realizó una reducción proporcional en el contenido de cemento de la mezcla, con el propósito de disminuir el consumo de material y lograr una dosificación más eficiente desde el punto de vista técnico y económico, sin afectar el cumplimiento de la resistencia requerida.

Tabla 47. Dosificación reajustada del diseño de mezcla.

Material	Dosificación respecto a los agregados	
Agua	173 kg/m ³	3,30 Kg
Cemento	374 kg/m ³	6,39 Kg
Grava	982 kg/m ³	18,75 Kg
Arena	731 kg/m ³	13,94 Kg

SUSTITUCION DE CASCARA DE HUEVO	
Cantidad de cascara de huevo	0,64
Cantidad de cemento	5,76

Fuente: Autoría propia

Con el reajuste realizado y la corrección por humedad de los agregados, se obtuvieron las nuevas dosificaciones del diseño de mezcla. El contenido de agua efectiva se estableció en 173 kg/m³ y el contenido de cemento fue ajustado a 374 kg/m³, buscando una mezcla más eficiente y acorde con la resistencia de diseño requerida.

De igual manera, la dosificación de los agregados quedó establecida en 982 kg/m³ para la grava y 731 kg/m³ para la arena. Para la elaboración de los especímenes de laboratorio, estas cantidades correspondieron a 18,75 kg de grava y 13,94 kg de arena, mientras que el cemento y el agua utilizados fueron de 6,39 kg y 3,30 kg respectivamente.

Posteriormente, para la mezcla con sustitución parcial, se realizó el reemplazo del cemento por residuo de cáscara de huevo en un porcentaje del 10%, obteniendo una dosificación de 0,64 kg de cáscara de huevo y 5,76 kg de cemento.

9.1 ELABORACIÓN Y CURADO DE ESPECIMENES DE CONCRETO PARA ENSAYOS EN EL LABORATORIO SIN SUSTITUCIÓN

De acuerdo con la norma NTC 1377, el proceso de curación y fabricación de muestras de concreto para ensayos en laboratorio es esencial para obtener especímenes que reflejen con precisión el comportamiento del concreto endurecido. En este contexto, los especímenes sin sustitución se producen utilizando materiales estándar como cemento, agua, agregado fino y agregado grueso, y sirven como muestras representativas para evaluar características mecánicas, tales como la resistencia a la compresión y a la tracción. Este procedimiento incluye la mezcla de los componentes, su vertido en moldes normalizados, la compactación adecuada y el curado posterior bajo condiciones controladas de humedad y temperatura, lo que asegura resultados fiables para garantizar la calidad del concreto.

Tabla 48. Registro fotográfico del ensayo para la creación de especímenes.

Incorporación del agregado fino en el procedimiento de mezcla del concreto. 	Incorporación de agua en la fase de mezcla del concreto. 
Registro fotográfico de la mezcla de concreto en trompo. 	Preparación de moldes para la creación de muestras cilíndricas. 
Especímenes cilíndricos después de 24 horas de fraguado. 	Evidencia de la instalación de la mezcla de hormigón. 

Fuente: Autoría propia

PROCEDIMIENTO

De acuerdo con la NTC 1377, el procedimiento comenzó con el pesaje de los materiales según las proporciones definidas en el diseño de mezcla, garantizando que cada componente del concreto se dosificara de manera adecuada. A continuación, en el trompo mezclador se añadió inicialmente una porción de agua, seguida de la grava, lo que permitió una premezcla que favorece la distribución uniforme de los agregados. Posteriormente, se incorporaron la arena y el cemento, manteniendo la mezcla en rotación para lograr su homogeneización; finalmente, se agregó el agua restante, completando así el proceso de mezclado durante aproximadamente cinco minutos para asegurar la uniformidad del concreto fresco.

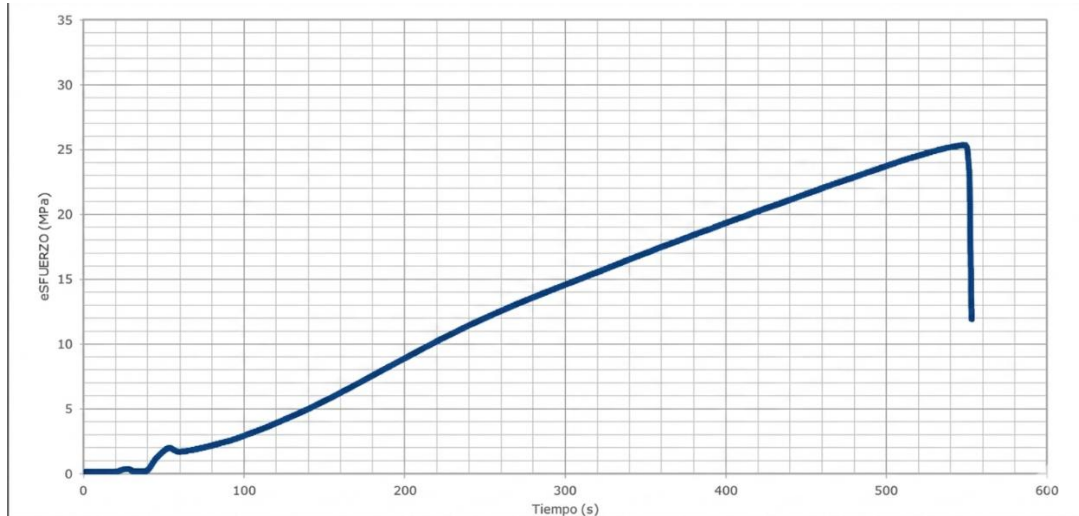
Una vez preparada la mezcla, se realizó la prueba de asentamiento utilizando el cono Abrams, conforme a lo estipulado por la norma NTC 396. Esta norma establece el procedimiento para evaluar la consistencia del concreto fresco mediante el llenado del molde en tres capas, su compactación y la medición de la reducción en altura del material tras retirar el molde. Como resultado del ensayo, se registró un asentamiento de 3", tal como estaba previsto en el diseño de mezcla.

Posteriormente, se procedió al vaciado del concreto en moldes cilíndricos normalizados, asegurando la compactación de cada capa para evitar vacíos y segregación del material, siguiendo las indicaciones de la NTC 1377. Al cabo de 24 horas y cumpliendo con los lineamientos establecidos por dicha norma, se llevó a cabo el desmoldeo de los especímenes, que fueron trasladados inmediatamente a un proceso de curado mediante inmersión en agua en una alberca. Esto fue realizado conforme a las normas NTC 550 y NTC 673 para garantizar condiciones controladas de humedad y temperatura que propicien un desarrollo adecuado de la hidratación del cemento. Finalmente, los cilindros fueron almacenados para su ensayo a edades de 7, 14 y 28 días con el fin de analizar cómo progresa la resistencia del concreto a lo largo del tiempo bajo condiciones estandarizadas en laboratorio.

9.1.1 Análisis de resultados de ensayos en cilindros de concreto fallados

Los resultados de la prueba de compresión en los cilindros de concreto, que fueron elaborados y curados de acuerdo con los métodos experimentales establecidos, se presentan en esta etapa. Las muestras fueron expuestas a diferentes períodos de curado para estudiar cómo varía la resistencia del material a lo largo del tiempo, obteniendo el siguiente resultado al cabo de siete días.

Ilustración 10. Curva de carga de rotura de probetas de concreto a 7 días sin sustitución.

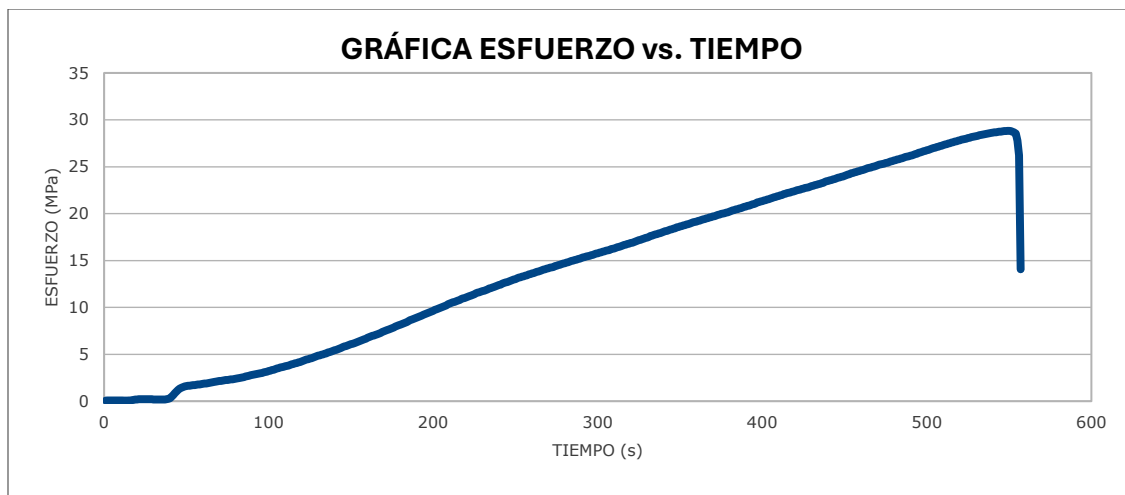


Fuente: Elaboración propia basada en los datos obtenidos mediante prensa hidráulica.

En este sentido, un valor como 25,44 MPa a los 7 días, frente a una resistencia de diseño de 29,4 MPa a los 28 días, indica un desarrollo muy alto en edad temprana, aproximadamente cercano o incluso superior al rango esperado, lo que sugiere un concreto con buena hidratación inicial y condiciones adecuadas de curado.

A continuación, se analiza la información recopilada después de dos semanas de curado para observar el desarrollo intermedio de la resistencia del concreto y confirmar la tendencia en el aumento de dicha resistencia en relación con la edad temprana y los valores de resistencia de diseño establecidos.

Ilustración 11. Curva de carga de rotura de probetas de concreto a 14 días sin sustitución.



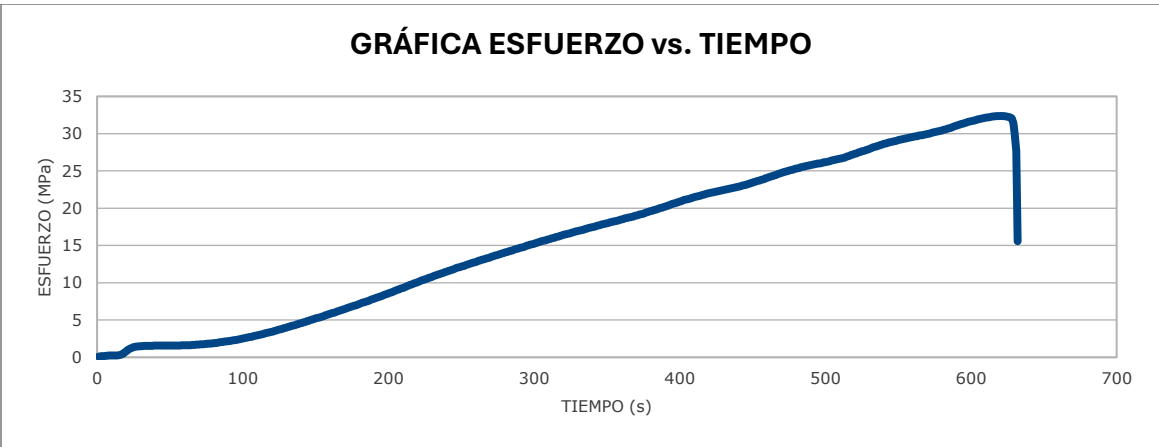
Fuente: Elaboración propia fundamentada en la información recogida a través de prensa hidráulica.

La curva de evolución de resistencia nos muestra un incremento progresivo del comportamiento mecánico del material, confirmando el desarrollo continuo de la hidratación

del cemento. A esta edad intermedia, la resistencia alcanzada refleja un avance significativo respecto a los 7 días, lo cual es coherente con el proceso normal de endurecimiento del concreto. Dando una resistencia de 28.83

Este comportamiento permite inferir que la mezcla presenta una adecuada ganancia de resistencia en el tiempo, manteniendo una tendencia ascendente que se aproxima gradualmente al valor de diseño establecido a los 28 días. Asimismo, los resultados obtenidos a los 14 días son representativos para evaluar la eficiencia del diseño de mezcla y las condiciones de curado aplicadas, evidenciando un desempeño satisfactorio del material en esta etapa de maduración. Ahora bien, de manera complementaria se presentan los resultados correspondientes a los 28 días de curado.

Ilustración 12. Curva de carga de rotura de probetas de concreto a 28 días sin sustitución.



Fuente: Elaboración propia fundamentada en la información recogida a través de prensa hidráulica.

De acuerdo con la curva en la evolución de resistencia se aprecia que el material llegó a una resistencia de 32,38 MPa a los 28 días, evidenciando su máximo desarrollo mecánico dentro del periodo de ensayo y consolidando el proceso de hidratación del cemento, así como la estabilización de su ganancia de resistencia. Este valor final permite validar el cumplimiento y superación de la resistencia de diseño establecida 29,4 MPa, sirviendo como parámetro principal de comparación para la evaluación del desempeño del concreto.

Tabla 49. Resistencia a la compresión de cilindros de concreto sin reemplazo en diversas edades de curado.

CILINDROS SIN SUSTITUCION			
N DE CILINDROS	EDAD	RESISTENCIA	% ALCANZADO
1	7 Días	25,44	87%
2	14 Días	28,83	98%
3	28 Días	32,8	112%

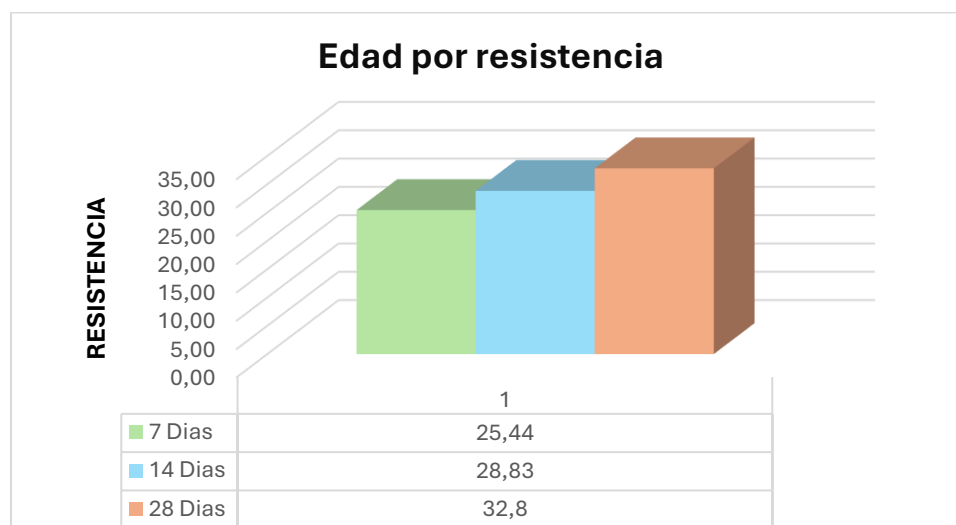
Fuente: Autoría propia

Los resultados de la Tabla 47 muestran la evolución de la resistencia a la compresión de los cilindros sin reemplazo al séptimo, décimo cuarto y vigésimo octavo día de curado,

evidenciando un incremento progresivo asociado al proceso de hidratación del cemento. A los 7 días se obtuvo una resistencia de 25,44 MPa con un porcentaje de 87% de la resistencia de diseño, mientras que a los 14 días esta aumentó a 28,83 MPa con un porcentaje de 98%, reflejando una adecuada ganancia de resistencia en edades intermedias.

Finalmente, a los 28 días se alcanzó una resistencia de 32,8 MPa, equivalente al 112% de la resistencia de diseño, lo que indica un comportamiento satisfactorio del concreto y un desempeño mecánico superior al esperado, asociado a condiciones adecuadas de curado y correcta elaboración de las probetas.

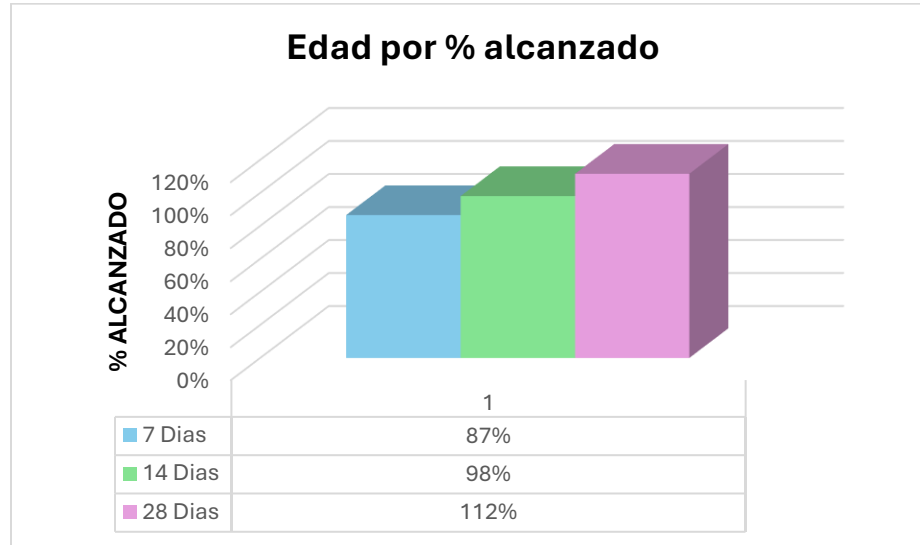
Ilustración 13. Desarrollo de la resistencia mecánica del concreto a 7, 14 y 28 días de curado.



Fuente: Autoría propia

La ilustración 13, presenta un incremento gradual en la resistencia física del material con el tiempo, alcanzando cifras de 25,44 MPa a los 7 días, 28,83 MPa a las dos semanas y 32,8 MPa al mes. Estos hallazgos muestran que el concreto se comporta normalmente durante la hidratación del cemento, ya que su resistencia se incrementa poco a poco hasta llegar a su valor de diseño a los 28 días. Además, se observa que a los 7 días ya se ha desarrollado una parte importante de la resistencia final, lo que indica un buen desempeño inicial de la mezcla y condiciones adecuadas de curado.

Ilustración 14. Porcentaje de resistencia alcanzada del concreto según la edad de curado



Fuente: Autoría propia

La ilustración 14 presenta el avance porcentaje de la resistencia en relación con la resistencia de diseño definida. Se observa que a los 7 días el concreto alcanzó el 87%, evidenciando un desarrollo inicial favorable y una rápida ganancia de resistencia. A los 14 días se obtuvo el 98%, valor cercano a la resistencia esperada, lo que indica un comportamiento adecuado de la mezcla y buenas condiciones de curado. Finalmente, a los 28 días se alcanzó el 112%, superando la resistencia de diseño, lo cual demuestra que el concreto presentó un desempeño mecánico superior al previsto, brindando mayor seguridad estructural y confirmando la eficiencia de los materiales y la dosificación empleada.

9.2 PREPARACIÓN Y CURADO DE MUESTRAS DE CONCRETO PARA PRUEBAS EN LABORATORIO CON SUSTITUCIÓN

Según la NTC 1377, el proceso de curado y fabricación de muestras de concreto para ensayos en laboratorio es fundamental para conseguir muestras que representen con precisión el funcionamiento del concreto endurecido. En este escenario, los modelos se desarrollan reemplazando el 10% del cemento con polvo de cáscara de huevo e incorporando también elementos convencionales como agua, agregado grueso y agregado fino. El objetivo es estudiar la manera en que estos materiales inciden en las propiedades mecánicas del concreto, poniendo un énfasis particular en la resistencia a la compresión y a la tensión.

Tabla 50. Registro fotográfico del ensayo para la creación de especímenes.

Cáscara de huevo procesada y lista para incorporar a la mezcla de concreto. 	Adición de la cascara de huevo durante el proceso de mezclado del concreto. 
Evidencia del ensayo de asentamiento con el cono de Abrams. 	Especímenes cilíndricos después de 24 horas de fraguado. 

Fuente: Autoría propia

PROCEDIMIENTO

De acuerdo con lo que establece la NTC 1377, el procedimiento empezó con la preparación de la cáscara de huevo, que fue lavada, secada y molida. Luego, se tamizó con un tamiz No. 200 para conseguir un material homogéneo y fino, que pueda ser utilizado como reemplazo parcial del cemento en la mezcla de concreto. Los materiales fueron luego pesados según las proporciones especificadas en el diseño de mezcla, garantizando así una dosificación correcta de cada componente del concreto.

Más adelante, se agregó inicialmente una parte del agua al trompo mezclador, seguida de la grava, lo que facilitó una premezcla que asegura una distribución uniforme de los agregados. Luego se incorporaron la arena, el cemento y la cáscara de huevo mientras se mantenía la mezcla en rotación para lograr su homogeneización; finalmente, se añadió el resto del agua, completando el proceso de mezclado en aproximadamente cinco minutos para asegurar la uniformidad del concreto fresco.

El ensayo de asentamiento se llevó a cabo con el cono de Abrams conforme a lo indicado en la NTC 396. Este procedimiento consiste en determinar la consistencia del concreto fresco

llenando el molde en tres capas, compactándolo y midiendo el descenso del material tras desmoldarlo; en esta ocasión, se alcanzó un asentamiento de 3 pulgadas, como estaba previsto por el diseño de la mezcla. Seguidamente, se realizó el vaciado del concreto en moldes cilíndricos estandarizados, compactando cada capa para evitar la segregación del material y prevenir vacíos, tal como establece la NTC 1377.

Transcurridas 24 horas y siguiendo las pautas mencionadas anteriormente, se procedió al desmoldeo de las muestras. Estas fueron trasladadas inmediatamente a un proceso de curado mediante inmersión en agua en una piscina, conforme a las normativas NTC 550 y NTC 673. Este método asegura condiciones controladas de humedad y temperatura propicias para un adecuado desarrollo de la hidratación del cemento.

9.2.1 Análisis de resultados de ensayos en cilindros de concreto fallados

En esta fase se exponen los resultados obtenidos de la prueba de resistencia a la compresión de los cilindros de concreto, que fueron fabricados y curados siguiendo las condiciones estipuladas en el procedimiento experimental. Las muestras se sometieron a ensayos a diversas edades de curado con el propósito de evaluar cómo varía la resistencia del material con el tiempo. Se obtuvo el siguiente resultado al cabo de siete días.

Ilustración 15. Curva de carga de rotura de probetas de concreto a 7 días con sustitución.

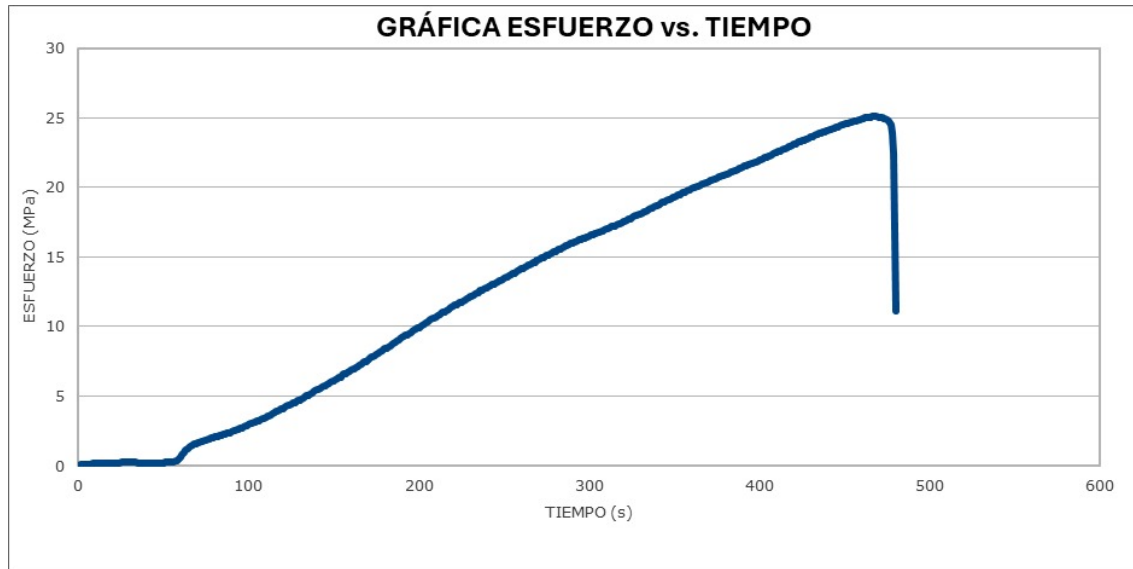


Fuente: Elaboración propia fundamentada en la información recogida a través de prensa hidráulica.

En este sentido, un valor como 18,11 MPa a los 7 días, frente a una resistencia de diseño de 29,4 MPa a la semana 28, tomando en cuenta el reemplazo parcial del 10% de cemento por polvo de cáscara de huevo, indica un desarrollo inicial favorable, este comportamiento sugiere que la incorporación del material sustituyente no afectó de manera significativa la ganancia temprana de resistencia, permitiendo un adecuado proceso de hidratación y un desempeño mecánico aceptable en las primeras edades de curado.

Ahora, se lleva a cabo un análisis de los resultados obtenidos después de 14 días de curado, lo que permite examinar la evolución intermedia de la resistencia del concreto al haber sustituido parcialmente el 10% del cemento por polvo de cáscara de huevo.

Ilustración 16. Curva de carga de rotura de probetas de concreto a 14 días con sustitución.

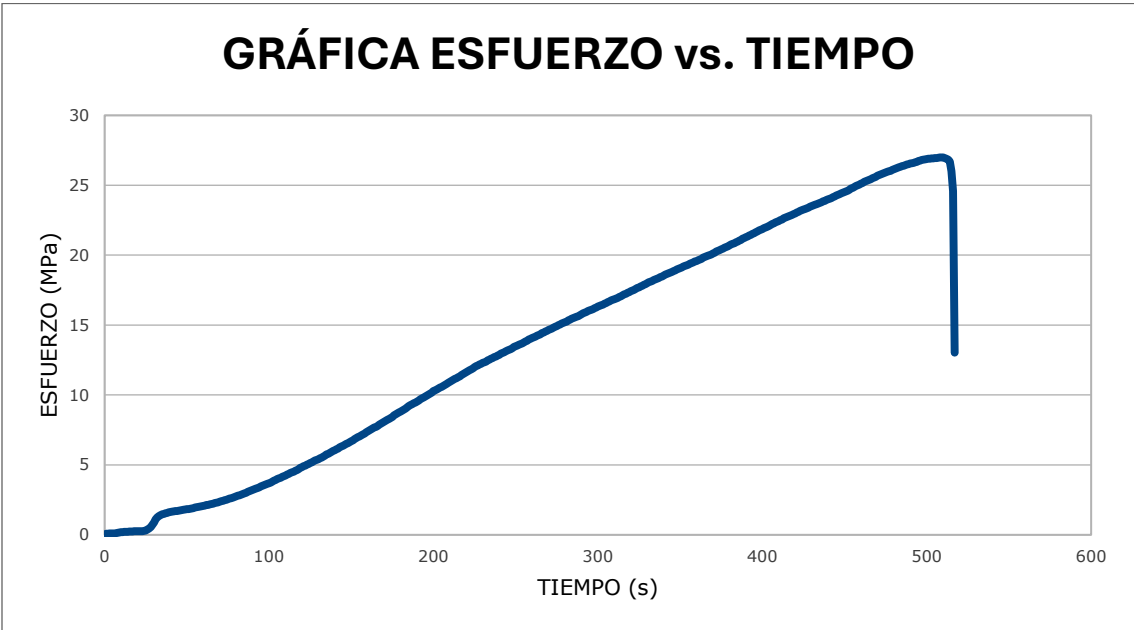


Fuente: Elaboración propia fundamentada en la información recogida a través de prensa hidráulica.

La gráfica de evolución de la resistencia muestra que, después de 28 días, el material logró una resistencia de 26.99 MPa. Esto sugiere que su desarrollo mecánico fue superior durante el tiempo de prueba y que la hidratación del cemento junto con la estabilización contribuyó a este incremento en la resistencia. Con este resultado final, se puede comparar la resistencia de diseño estipulada en 29.4 MPa con el rendimiento de la mezcla que incorpora un reemplazo parcial del 10% de cemento por un compuesto derivado de cáscara de huevo.

Este comportamiento permite inferir que la mezcla presenta una adecuada ganancia de resistencia en el tiempo, manteniendo una tendencia ascendente que se aproxima gradualmente al valor de diseño establecido a los 28 días. Asimismo, los resultados obtenidos a los 14 días son representativos para evaluar la eficiencia del diseño de mezcla y las condiciones de curado aplicadas, evidenciando un desempeño satisfactorio del material en esta etapa de maduración. Ahora, de forma adicional, Los resultados que se logran después de 28 días de curado, tiempo en el cual se comprueba la resistencia final del concreto, son presentados.

Ilustración 17. Curva de carga de rotura de probetas de concreto a 28 días con sustitución.



Fuente: Elaboración propia fundamentada en la información recogida a través de prensa hidráulica.

La gráfica de evolución de la resistencia muestra que, después de 28 días, el material logró una resistencia de 26.99 MPa. Esto sugiere que su desarrollo mecánico fue superior durante el tiempo de prueba y que la hidratación del cemento junto con la estabilización contribuyó a este incremento en la resistencia. Con este resultado final, se puede comparar la resistencia de diseño estipulada en 29.4 MPa con el rendimiento de la mezcla que incorpora un reemplazo parcial del 10% de cemento por un compuesto derivado de cáscara de huevo.

Tabla 51. Resistencia a la compresión de cilindros de concreto con sustitución a diferentes edades de curado.

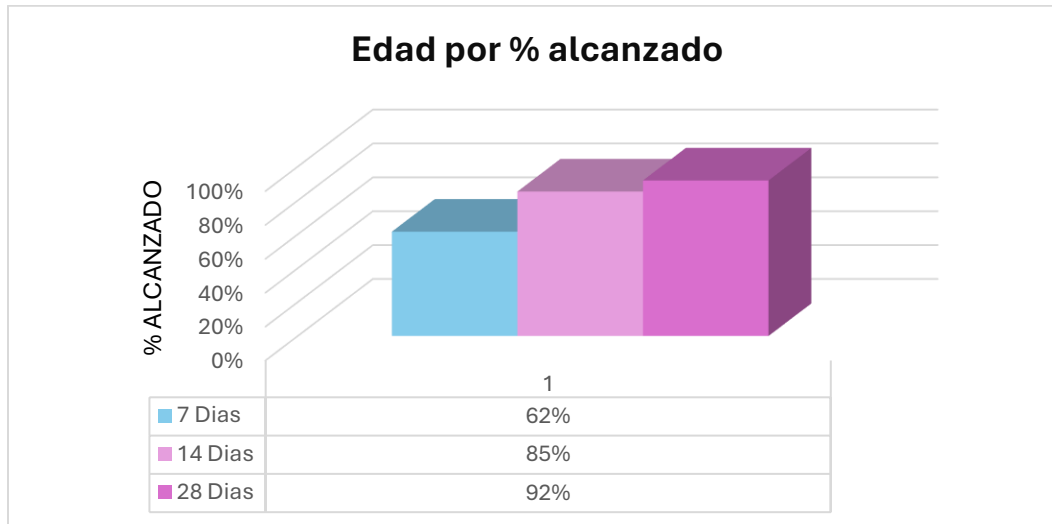
CILINDROS SIN SUSTITUCION			
N DE CILINDROS	EDAD	RESISTENCIA	% ALCANZADO
1	7 Días	18,11	62%
2	14 Días	25,07	85%
3	28 Días	26,99	92%

Fuente: Autoría propia

Los resultados de los cilindros sin sustitución evidencian una ganancia progresiva de resistencia conforme aumenta la edad de curado, comportamiento típico del concreto convencional debido al avance del proceso de hidratación del cemento. A los 7 días se obtuvo una resistencia de 18,11 MPa, equivalente al 62% de la resistencia de diseño, lo que indica un desarrollo inicial adecuado. Posteriormente, a los 14 días, la resistencia aumentó a 25,07 MPa, alcanzando el 85%, lo cual demuestra una evolución favorable del comportamiento mecánico. Finalmente, a los 28 días se registró una resistencia de 26,99 MPa, correspondiente al 92% del valor esperado, evidenciando que la combinación mostró una tendencia ascendente durante todo el periodo de prueba. Aunque no se lograron los resultados esperados, indican

que se alcanzó el 100% de la resistencia de diseño, lo cual refleja un rendimiento adecuado y permite establecer una referencia técnica para evaluar el comportamiento de mezclas con materiales alternativos.

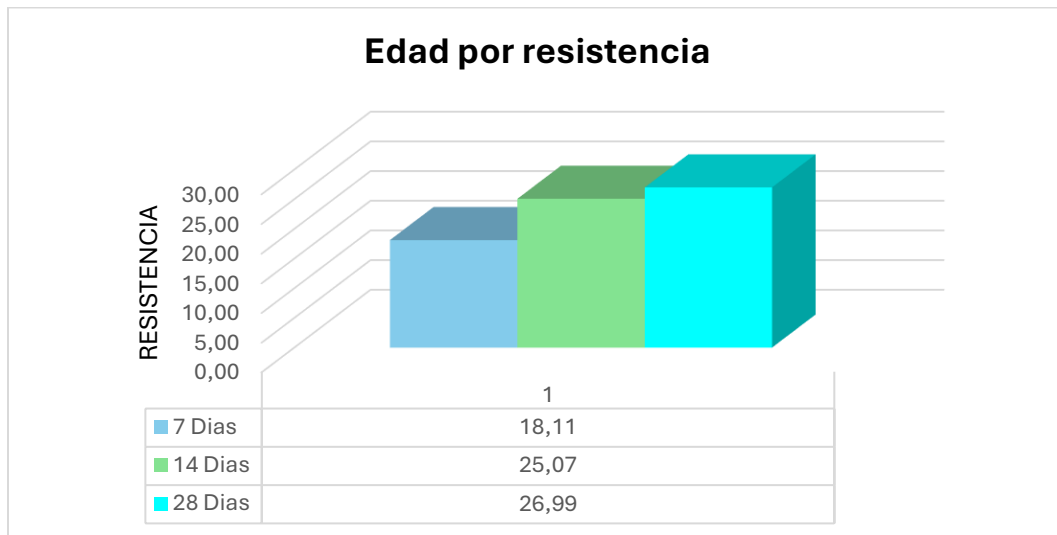
Ilustración 18. Desarrollo de la resistencia mecánica del concreto a 7, 14 y 28 días de curado con sustitución.



Fuente: Autoría propia

La gráfica ilustra el incremento progresivo de la resistencia del concreto en relación al tiempo de curado, mostrando una clara tendencia ascendente a medida que aumenta la edad de los especímenes. A los 7 días, se logró un 62% de la resistencia diseñada, lo cual sugiere una ganancia inicial adecuada típica de las primeras fases de hidratación del cemento. Al llegar a los 14 días, este porcentaje creció hasta el 85%, indicando una evolución positiva en el comportamiento mecánico del material. Finalmente, a los 28 días se alcanzó un 92%, cifra que representa la máxima resistencia obtenida durante el periodo de evaluación. En general, los resultados reflejan un desarrollo normal de la resistencia, aunque no se alcanza el 100% del valor proyectado; esto podría estar relacionado con factores como la dosificación, el proceso de curado o la calidad de los materiales utilizados.

Ilustración 19. Porcentaje de resistencia alcanzada del concreto según la edad de curado con sustitución.



Fuente: Autoría propia

El incremento de la resistencia a la compresión del material con el aumento de la edad de curado conduce a un avance acumulativo del comportamiento mecánico del concreto en este gráfico. A los 7 días, se obtuvo un valor de resistencia de 18.11 MPa, mostrando un desarrollo inicial adecuado en la etapa de hidratación debido a las reacciones iniciales de hidratación del cemento. A los 14 días, la resistencia aumentó a 25.07 MPa, un claro avance desde la edad temprana y afirmando la evolución positiva del proceso de endurecimiento. A los 28 días, se alcanzó una resistencia máxima de 26.99 MPa, correspondiente al valor máximo del período evaluado.

9.3 ELABORACIÓN Y CURADO DE ESPECÍMENES DE CONCRETO SIN SUSTITUCIÓN PARCIAL DEL CEMENTO, CONSIDERANDO EL REAJUSTE DE LA CANTIDAD DE CEMENTO Y LA HUMEDAD DE LOS AGREGADOS

De acuerdo con la norma NTC 1377, el proceso de curación y fabricación de muestras de concreto para ensayos en laboratorio es esencial para obtener especímenes que reflejen con precisión el comportamiento del concreto endurecido. En estas circunstancias, los especímenes sin sustitución se fabrican con materiales estándar como agua, cemento, agregado fino y agregado grueso. Estos ejemplares se utilizan como muestras representativas para analizar propiedades mecánicas como la resistencia a la compresión y a la tracción. Este proceso consiste en combinar los elementos, verterlos en moldes estandarizados, compactarlos apropiadamente y curarlos después en condiciones de temperatura y humedad controladas, lo que garantiza resultados confiables para asegurar la calidad del concreto.

Tabla 52. Registro fotográfico del ensayo para la creación de especímenes con reajuste de cemento.

Incorporación de agregados que componen la mezcla de concreto con el reajuste del cemento 	Comprobación del estado de la mezcla en el trompo 
Prueba del cono para determinar el asentamiento de la mezcla 	Registro fotográfico de la medición del asentamiento 
Preparación de moldes para la creación de muestras cilíndricas. 	Definición de los cilindros 

Fuente: Autoría propia

PROCEDIMIENTO

De acuerdo con la norma NTC 1377, el proceso de elaboración y curado de especímenes de concreto para ensayos de laboratorio es fundamental para garantizar resultados confiables y representativos del comportamiento del concreto en estado endurecido. Inicialmente, se fabricaron los especímenes sin sustitución, empleando materiales convencionales como cemento, agua, agregado fino y agregado grueso, con el fin de obtener una mezcla patrón para el análisis de la resistencia a la compresión.

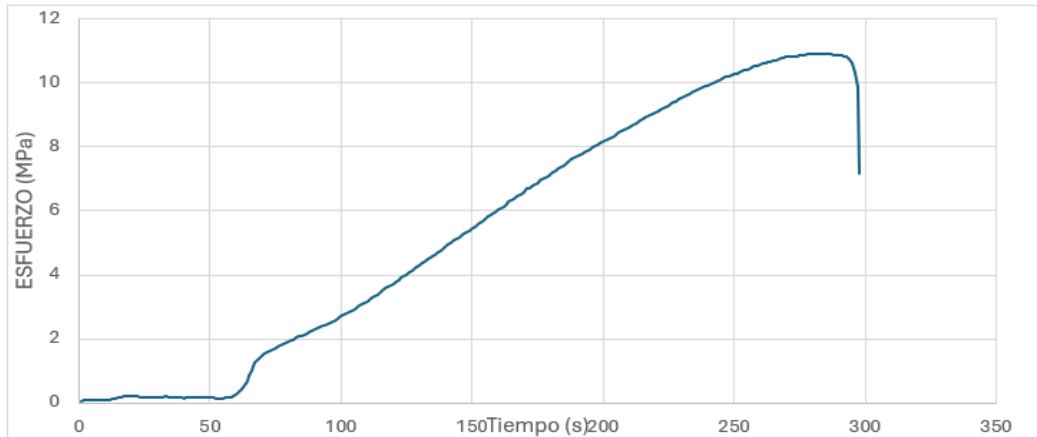
Para la elaboración de estos especímenes se tuvieron en cuenta las correcciones por humedad de los agregados y el reajuste realizado al diseño de mezcla, con el propósito de optimizar la dosificación de los materiales y lograr una resistencia acorde con la establecida en el diseño. El procedimiento consistió en el mezclado homogéneo de los materiales, seguido del vertido del concreto en moldes cilíndricos normalizados. Posteriormente, se realizó la compactación adecuada para minimizar la presencia de vacíos internos y garantizar que la mezcla se reparta de manera uniforme en los moldes.

Finalmente, los especímenes fueron sometidos a un proceso de curado bajo condiciones controladas de humedad y temperatura, permitiendo un adecuado desarrollo de la hidratación del cemento y garantizando condiciones apropiadas para la evaluación de la resistencia mecánica del concreto a diferentes edades de ensayo.

9.3.1 Análisis de resultados de ensayos en cilindros de concreto fallados

En esta fase se presentan los resultados obtenidos del ensayo de resistencia a la compresión realizado a los especímenes de concretos fabricados en laboratorio. Las muestras fueron elaboradas, compactadas y curadas bajo condiciones controladas, siguiendo el procedimiento establecido para garantizar resultados confiables durante la evaluación experimental. Con el fin de analizar y para estudiar la resistencia mecánica del concreto a lo largo del tiempo, se llevaron a cabo pruebas en cilindros a diversas edades de curado. A continuación, se presentan los resultados de las muestras analizadas después de siete días, que corresponden al primer periodo de ganancia en la resistencia del material.

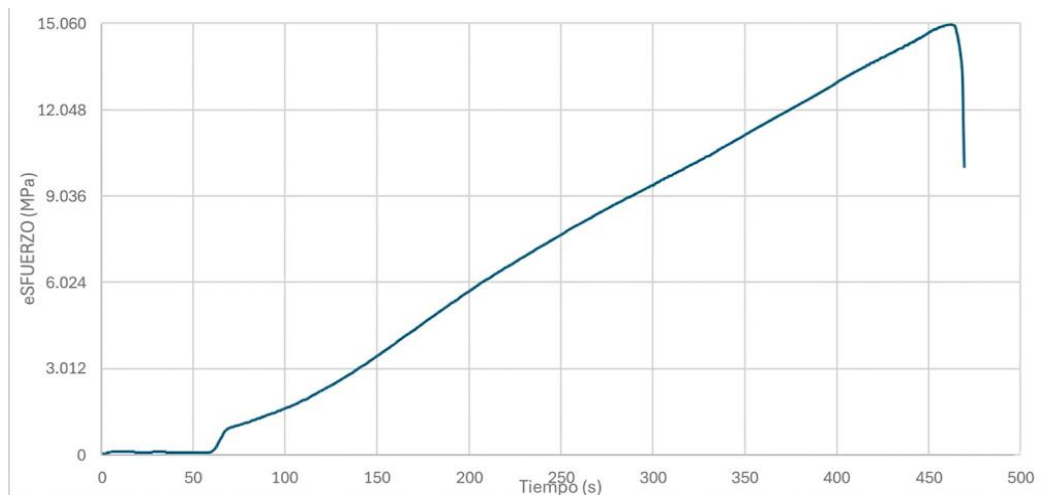
Ilustración 20. Curva de carga de rotura de probetas de concreto a 7 días sin sustitución con mezcla reajustada.



Fuente: Elaboración propia basada en los datos obtenidos mediante prensa hidráulica. La curva esfuerzo-tiempo muestra un comportamiento típico del concreto sometido a compresión. Inicialmente, se presenta una etapa de acomodación del espécimen, seguida de un incremento progresivo del esfuerzo a medida que aumenta la carga aplicada. El concreto alcanzó una resistencia máxima cercana a 10,8 MPa alrededor de los 280 segundos. Posteriormente, se observa una caída abrupta del esfuerzo, indicando la falla del espécimen y la pérdida de capacidad resistente del material.

Posteriormente, los especímenes fueron ensayados a los 14 días de curado, con el propósito de examinar cómo ha cambiado la resistencia mecánica del concreto respecto a la edad inicial de ensayo. A continuación, se presenta la gráfica correspondiente al comportamiento esfuerzo-tiempo obtenido durante la prueba de compresión.

Ilustración 21. Curva de carga de rotura de probetas de concreto a 14 días sin sustitución con mezcla reajustada.

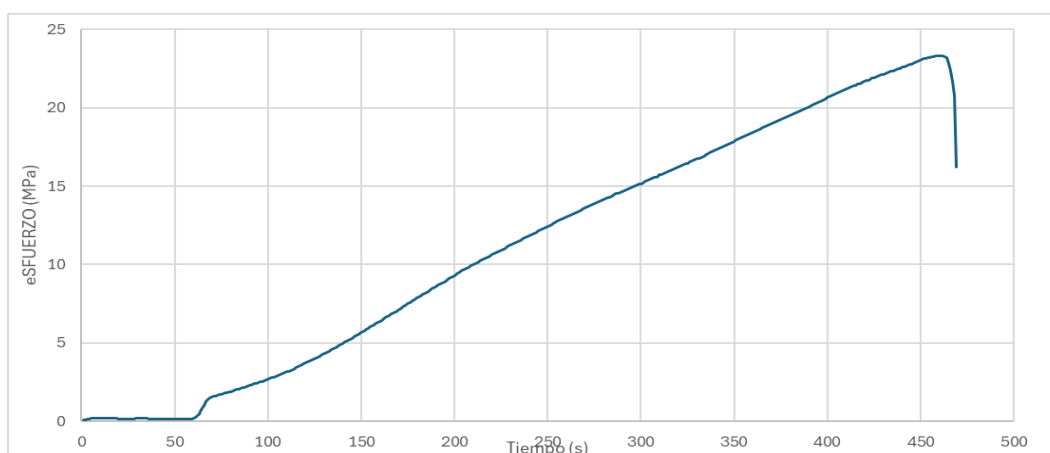


Fuente: Elaboración propia fundamentada en la información recogida a través de prensa hidráulica.

La gráfica muestra el comportamiento del esfuerzo del material en función del tiempo durante un ensayo de carga. Inicialmente, entre 0 y aproximadamente 60 segundos, el esfuerzo permanece casi constante y cercano a cero, lo que indica una etapa inicial de acomodación del equipo o aplicación gradual de la carga. A partir de los 60 segundos se observa un incremento progresivo del esfuerzo, evidenciando que el material comienza a resistir la carga aplicada. Posteriormente, entre los 100 y 450 segundos, la curva presenta un crecimiento prácticamente lineal, alcanzando un esfuerzo máximo cercano a 15 MPa. Este comportamiento indica que el material tuvo una respuesta estable y continua frente a la carga, mostrando buena capacidad de resistencia antes de alcanzar su punto máximo.

Y, por último, también se obtuvo la gráfica correspondiente a los 28 días, en la cual se evidencia el comportamiento del material bajo carga hasta alcanzar su resistencia máxima y posterior falla.

Ilustración 22. Curva de carga de rotura de probetas de concreto a 28 días sin sustitución con mezcla reajustada.



Fuente: Elaboración propia fundamentada en la información recogida a través de prensa hidráulica.

La gráfica a 28 días muestra un incremento progresivo y estable del esfuerzo hasta alcanzar una resistencia máxima cercana a 23–24 MPa, valor que coincide aproximadamente con la resistencia esperada después del reajuste de la dosificación. Esto evidencia que la modificación realizada en la mezcla mejoró significativamente el comportamiento del material, permitiendo alcanzar la resistencia proyectada. Finalmente, se observa una caída brusca del esfuerzo, indicando la falla del espécimen después de llegar a su capacidad máxima de carga.

Tabla 53. Resistencia a la compresión de cilindros de concreto sin reemplazo en diversas edades de curado.

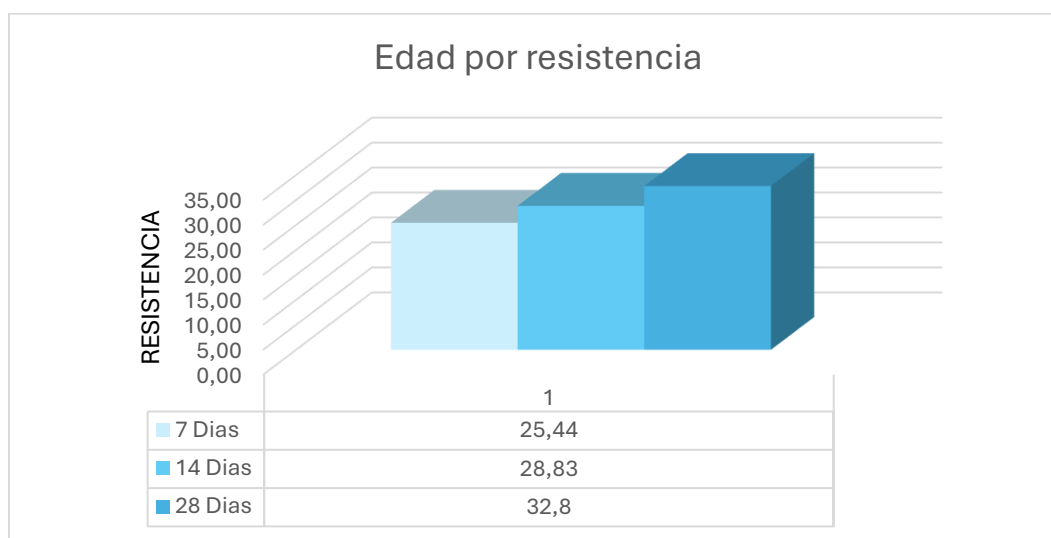
CILINDROS SIN SUSTITUCION			
N DE CILINDROS	EDAD	RESISTENCIA	% ALCANZADO
1	7 días	10,93	46%
2	14 días	15,06	63%
3	28 días	23,33	97%

Fuente: Autoría propia

Los hallazgos en los cilindros sin sustitución evidencian un incremento progresivo de la resistencia a la compresión del hormigón conforme avanzó el tiempo de curado. A los 7 días se registró una resistencia de 10,93 MPa, correspondiente al 46 %; a los 14 días se alcanzó una resistencia de 15,06 MPa, equivalente al 63 %; y finalmente, a los 28 días se obtuvo una resistencia de 23,33 MPa, representando el 97 % del valor máximo esperado.

Es importante considerar que, debido al reajuste realizado en la dosificación particularmente en la cantidad de cemento y en la corrección por humedad de los agregados, no se estableció una resistencia única de diseño, sino un rango estimado entre 21 MPa y 24 MPa. En este sentido, la resistencia obtenida a los 28 días se encuentra dentro del rango proyectado, lo que indica que el reajuste aplicado permitió alcanzar un comportamiento mecánico satisfactorio del concreto.

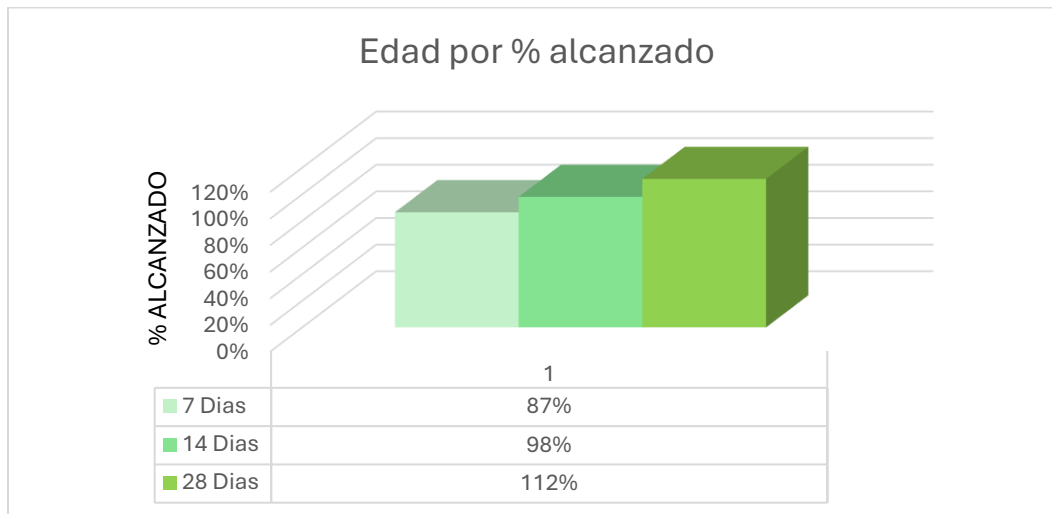
Ilustración 23. Desarrollo de la resistencia mecánica del concreto a 7, 14 y 28 días de curado con reajuste.



Fuente: Autoría propia

La gráfica evidencia el comportamiento del concreto sin sustitución a diferentes edades de curado. A los 7 días se obtuvo una resistencia de 10,93 MPa, lo que representa un desarrollo inicial relativamente bajo frente a la resistencia esperada del diseño. Posteriormente, a los 14 días, la resistencia aumentó a 15,06 MPa, mostrando una ganancia progresiva debido al avance del proceso de hidratación del cemento. Finalmente, a los 28 días se alcanzó una resistencia de 23,33 MPa, valor muy cercano a la resistencia de diseño aproximada de 24 MPa obtenida después del reajuste realizado en la dosificación de cemento y en la rectificación de la humedad de los agregados.

Ilustración 24. Porcentaje de resistencia alcanzada del concreto según la edad de curado con reajuste.



Fuente: Autoría propia

La gráfica del porcentaje alcanzado muestra la evolución de la resistencia del concreto respecto a la resistencia de diseño estimada. A los 7 días, el concreto alcanzó aproximadamente el 46 % de la resistencia esperada, reflejando un desarrollo inicial moderado. A los 14 días, el porcentaje aumentó al 63 %, evidenciando una ganancia progresiva de resistencia a medida que avanzó el proceso de curado.

Finalmente, a los 28 días se obtuvo un 97 % de la resistencia de diseño, lo cual demuestra que el concreto prácticamente alcanzó el valor objetivo establecido en la mezcla reajustada. Este comportamiento confirma que las correcciones realizadas en la cantidad de cemento y en la humedad de los agregados contribuyeron a mejorar el desempeño del concreto y a mantener una adecuada relación agua-cemento.

9.4 ELABORACIÓN Y CURADO DE ESPECÍMENES DE CONCRETO CON SUSTITUCIÓN PARCIAL DEL CEMENTO, CONSIDERANDO EL REAJUSTE DE LA CANTIDAD DE CEMENTO Y LA HUMEDAD DE LOS AGREGADOS

De acuerdo con la NTC 1377, el proceso de curado y elaboración de muestras de concreto para ensayos en laboratorio es esencial para obtener especímenes que reflejen de manera confiable el comportamiento del concreto endurecido. En este escenario, los modelos se desarrollan reemplazando el 10% del cemento con polvo de cáscara de huevo e incorporando también elementos convencionales como agua, agregado grueso y agregado fino. El objetivo es estudiar la manera en que estos materiales inciden en las propiedades mecánicas del concreto, poniendo un énfasis particular en la resistencia a la compresión y a la tensión.

Tabla 54. Registro fotográfico del ensayo para la creación de especímenes.

Preparación de la cáscara de huevo mediante tamizado con malla 200. 	Elaboración del ensayo de cono para verificar el cumplimiento del asentamiento. 
Evidencia del ensayo de asentamiento con el cono de Abrams. 	Elaboración de cilindros de acuerdo con la norma. 

Fuente: Autoría propia

PROCEDIMIENTO

Según lo estipulado en la NTC 1377, el proceso inició con la preparación de la cáscara de huevo, que fue desinflada, secada, molida y tamizada mediante un tamiz No. 200 para obtener un material fino y homogéneo, utilizado como sustituto parcial del cemento. Posteriormente, se realizó el pesaje de los materiales conforme al diseño de mezcla, efectuando un reajuste en la proporción de cemento y el grado de humedad de los componentes para asegurar que la proporción agua-cemento sea apropiada y garantizar la trabajabilidad del concreto.

Luego, los materiales fueron incorporados al trompo mezclador siguiendo el procedimiento establecido, agregando inicialmente parte del agua y la grava, y posteriormente la arena, el cemento y la cáscara de huevo. Finalmente, se adicionó el agua restante considerando las correcciones por humedad, completando el mezclado en aproximadamente cinco minutos hasta obtener una mezcla homogénea.

De acuerdo con la NTC 396, se llevó a cabo el ensayo de asentamiento utilizando el cono de Abrams, lo que resultó en un asentamiento de tres pulgadas, valor acorde con el diseño de

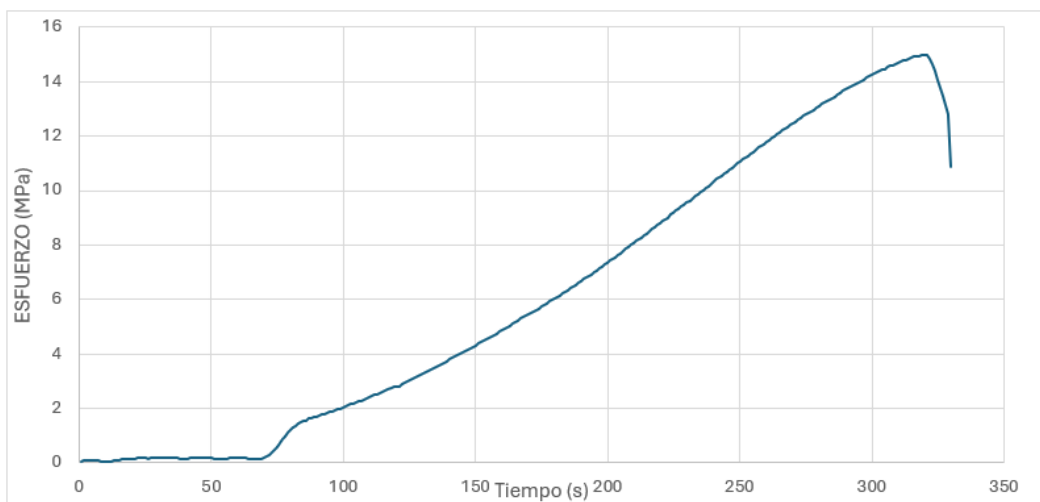
mezcla ajustado. Posteriormente, el concreto fue vaciado en moldes cilíndricos estandarizados y compactado adecuadamente para evitar vacíos y segregación.

Después de 24 horas, Las muestras fueron desmoldadas y se les aplicó un procedimiento de curado por inmersión en agua, de acuerdo con las normas (NTC, 2012) 550 y 673, garantizando condiciones adecuadas para el desarrollo de la resistencia del concreto que incluye cáscara de huevo.

Análisis de resultados de ensayos en cilindros de concreto fallados con el reajuste y con implementación de cascara de huevo

En esta fase se exponen los hallazgos de la evaluación de compresión que se realizó a los cilindros de concreto, que fueron fabricados y curados siguiendo las condiciones estipuladas en el procedimiento experimental. Las muestras se sometieron a ensayos a diversas edades de curado con el propósito de evaluar cómo varía la resistencia del material con el tiempo. Se obtuvo el siguiente resultado al cabo de siete días.

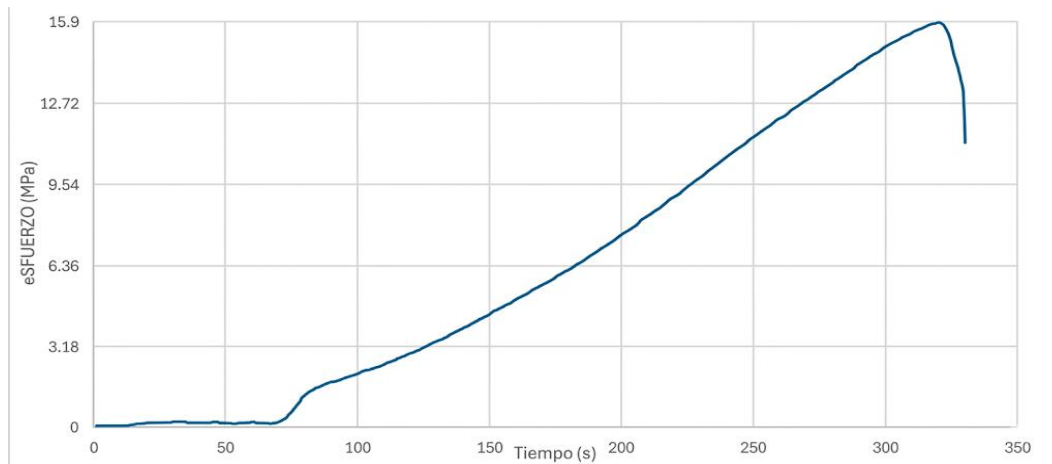
Ilustración 25. Curva de carga de rotura de probetas de concreto a 7 días con sustitución y reajuste.



Fuente: Elaboración propia fundamentada en la información recogida a través de prensa hidráulica.

La gráfica esfuerzo-tiempo muestra un incremento progresivo de la resistencia del concreto durante el ensayo, alcanzando un esfuerzo máximo cercano a los 15 MPa alrededor de los 320 segundos. Posteriormente, se observa una disminución brusca del esfuerzo, comportamiento que indica la falla de la muestra debido a la pérdida de capacidad resistente del cilindro sometido a compresión. El comportamiento ascendente de la curva evidencia que la mezcla presentó una adecuada ganancia de resistencia y una respuesta mecánica estable durante la aplicación de la carga. Asimismo, el desarrollo gradual del esfuerzo sugiere que el reajuste realizado en la dosificación, junto con la incorporación de la cáscara de huevo como sustituto parcial del cemento, permitió mantener una adecuada cohesión y compactación del concreto.

Ilustración 26. Curva de carga de rotura de probetas de concreto a 14 días con sustitución y reajuste.

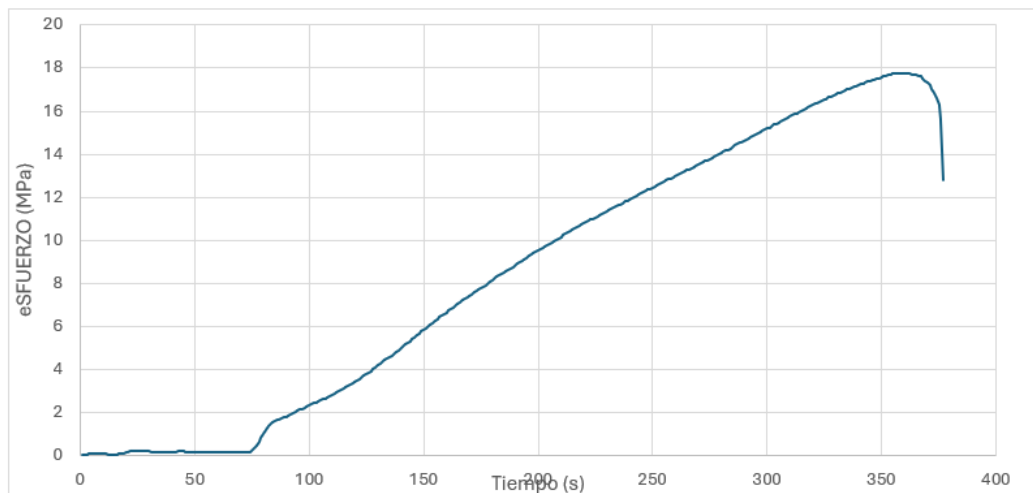


Fuente: Elaboración propia fundamentada en la información recogida a través de prensa hidráulica.

La gráfica esfuerzo-tiempo presenta una actitud constante y progresiva durante el ensayo de compresión, evidenciando un incremento gradual de la resistencia hasta alcanzar un esfuerzo máximo cercano a los 15,9 MPa aproximadamente a los 320 segundos. Posteriormente, se observa una disminución abrupta del esfuerzo, indicando el punto de falla de la muestra al perder su capacidad resistente.

El desarrollo uniforme de la curva demuestra que el concreto tuvo una adecuada respuesta mecánica frente a la aplicación de carga, reflejando una buena cohesión entre los materiales de la mezcla. Asimismo, el comportamiento obtenido sugiere que el reajuste realizado en la dosificación, tanto en la cantidad de cemento como en la rectificación de la humedad de los agregados posibilitó que se conservaran las condiciones apropiadas de trabajabilidad y compactación, aun con la incorporación de la cáscara de huevo como sustituto parcial del cemento.

Ilustración 27. Curva de carga de rotura de probetas de concreto a 28 días con sustitución y reajuste.



Fuente: Elaboración propia fundamentada en la información recogida a través de prensa hidráulica.

La curva obtenida durante el ensayo refleja un aumento constante del esfuerzo aplicado sobre la muestra hasta alcanzar un valor máximo cercano a los 17,8 MPa. Después de llegar a este punto máximo, Se observa una disminución rápida de la resistencia, lo cual es un efecto típico de la falla del concreto cuando se le aplica compresión.

La tendencia observada indica que la muestra soportó la carga de manera estable durante gran parte del ensayo, evidenciando una adecuada interacción entre los materiales de la mezcla. Además, el comportamiento alcanzado demuestra que la incorporación de cáscara de huevo y los ajustes realizados en la dosificación no afectaron significativamente la capacidad resistente del concreto.

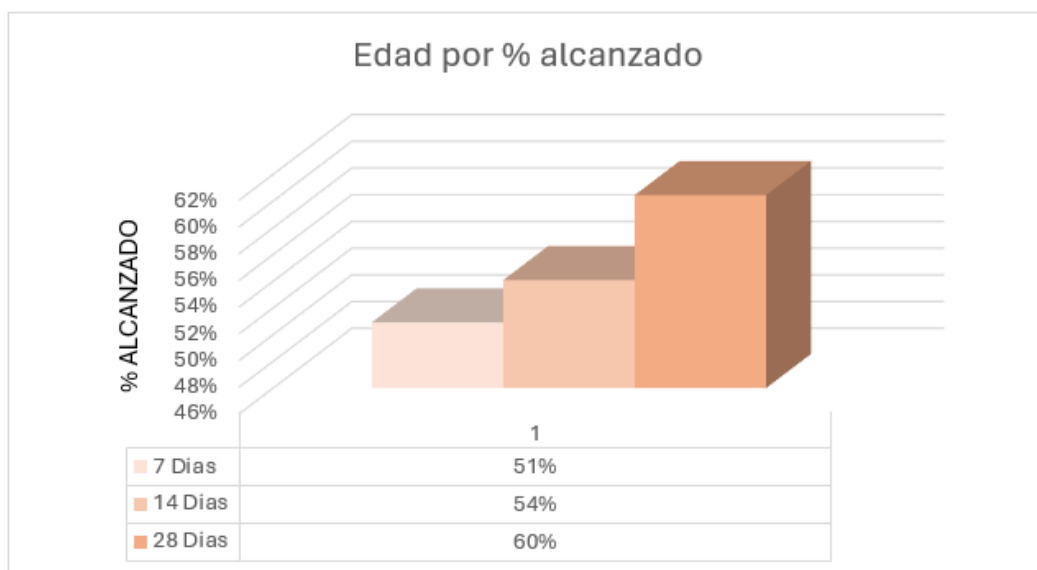
Tabla 55. Resistencia a la compresión de cilindros de concreto con sustitución a diferentes edades de curado y con el reajuste.

CILINDROS SIN SUSTITUCION			
N DE CILINDROS	EDAD	RESISTENCIA	% ALCANZADO
1	7 días	14,97	51%
2	14 días	15,9	54%
3	28 días	17,77	60%

Fuente: Autoría propia

Los resultados obtenidos muestran un incremento gradual de la resistencia del concreto con el avance de la edad de curado. A los 7 días se alcanzó una resistencia de 14,97 MPa, equivalente al 51 %; a los 14 días se obtuvo 15,9 MPa, correspondiente al 54 %; y finalmente, a los 28 días se registró una resistencia de 17,77 MPa, alcanzando el 60 % del valor estimado para la mezcla.

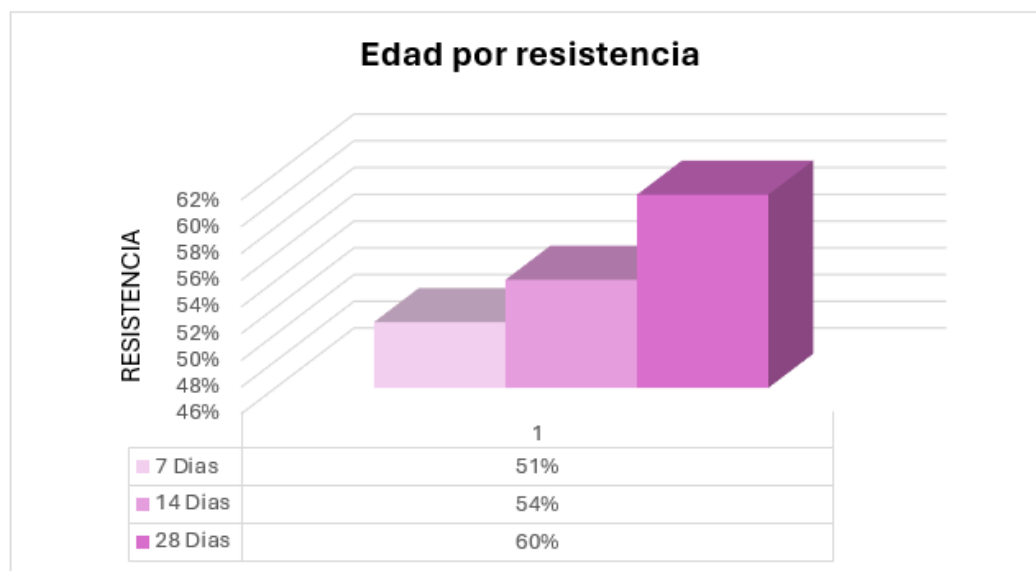
Ilustración 28. Desarrollo de la resistencia mecánica del concreto a 7, 14 y 28 días de curado con sustitución.



Fuente: Autoría propia

Las gráficas permiten observar que el desarrollo de resistencia fue progresivo, aunque el aumento entre edades no fue muy elevado, especialmente entre los 7 y 14 días. Esto puede relacionarse con el comportamiento de la mezcla tras el reajuste realizado en la dosificación y la inclusión de la cáscara de huevo como sustituto parcial del cemento, elementos que tienen un impacto directo en el proceso de hidratación y en la obtención de resistencia.

Ilustración 29. Porcentaje de resistencia alcanzada del concreto según la edad de curado con sustitución y reajuste.



Fuente: Autoría propia

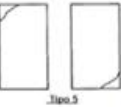
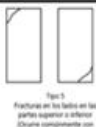
Aunque la resistencia final obtenida se mantuvo por debajo del rango esperado, el concreto presentó un comportamiento estable durante el ensayo, evidenciando que la mezcla logró desarrollar capacidad resistente y mantener cohesión entre sus componentes. Estos resultados permiten analizar la influencia de la cáscara de huevo en las propiedades

mecánicas del concreto y sirven como base para futuros ajustes en la dosificación y porcentaje de sustitución.

9.5 ANÁLISIS VISUAL

Se realizó una evaluación visual en los cilindros de concreto sometidos a compresión, correspondiente a la mezcla estándar sin sustitución y la mezcla en la que una décima parte del cemento fue reemplazada con cáscara de huevo tamizada, como parte complementaria de la investigación. En esta evaluación, se examinaron elementos como el tipo de falla, la aparición de grietas, el despegue del material y la existencia de orificios o vacíos que superen los 5 mm. Para ello se usaron como punto de referencia las normas de categorización y aceptación establecidas en la NSR-10. Esta investigación permitió establecer la conducta física de cada mezcla y vincularla con los resultados obtenidos en términos de resistencia.

Tabla 56. Análisis visual de los cilindros.

CILINDROS SIN SUSTITUCION										
DIAS	IMAGEN	ASENTAMIENTO (in)	N DE ORIFICIOS MAYOR A 5mm	RESISTENCIA (Mpa)	ADITIVO	TIPO DE FALLA	IMAGEN	ANTECEDENTES SS (Mpa)	EXPERIMENTAL SS (Mpa)	DIFERENCIA
7		3	26	24,44	NO			13,43	25	89%
14		3	24	28,83	NO			15,98	29	80%
28		2,36	30	32,38	NO			19,7	33	66%
CILINDROS CON SUSTITUCION TAMIZADO No 200										
DIAS	IMAGEN	ASENTAMIENTO (in)	N DE ORIFICIOS MAYOR A 5mm	RESISTENCIA	SUSTITUCION	TIPO DE FALLA	IMAGEN	ANTECEDENTES CS (Mpa)	EXPERIMENTAL CS (Mpa)	DIFERENCIA [%]
7		3	27	18,11	10% tamizado por N 200			13,31	18	36%
14		3	28	25,07	10% tamizado por N 201			15,95	25	57%
28		3	49	27	10% tamizado por N 200			19,98	27	35%

Fuente: Autoría propia

En los cilindros sin sustitución, el asentamiento se mantiene en 3 pulgadas a los 7 y 14 días, bajando ligeramente a 2.36 pulgadas a los 28 días. Esto muestra que la mezcla mantiene una buena posibilidad de trabajo con el paso del tiempo. Respecto a su capacidad de resistencia, se lograron valores de 24.44 MPa, 28.83 MPa y 32.38 MPa, los cuales aumentan de manera gradual en función del paso de los días; esto es lo que se espera en un concreto convencional. Se anotaron 30, 24 y 26 orificios mayores a 5 mm, lo que demuestra la existencia de algunos vacíos en la mezcla. Los resultados de los experimentos fueron más altos que los antecedentes (13.43, 15.98 y 19.7 MPa), con aumentos del 89%, el 80% y el 66%.

Por otro lado, en los cilindros con sustitución del 10% de cáscara de huevo tamizada, el asentamiento se mantiene constante en 3 pulgadas durante los 7, 14 y 28 días, lo que muestra que la mezcla es un poco más rígida. La resistencia alcanzada fue de 18.11 MPa al séptimo día, de 25.07 MPa al catorceavo y de 27 MPa al veintiochoavo. Aunque también hay un

aumento con el tiempo, estos valores son menores en comparación con los cilindros sin sustitución. No obstante, al contrastarlos con los antecedentes (13.31, 15.95 y 19.98 MPa), se observa un aumento del 36%, 57% y 35%, lo que señala que sí existe una mejora en la resistencia.

Con referencia a los orificios mayores de 5 mm, se registraron valores de 27, 28 y 49 en este grupo. Este último es relativamente alto a los 28 días, lo que sugiere la posibilidad de una mayor cantidad de vacíos en el concreto. Asimismo, se notaron sobre todo fallas inclinadas, lo cual indica que la conducta del material varía al añadirle la cáscara de huevo.

Por último, a pesar de que la cáscara de huevo contiene mucho calcio, no sustituye del todo al cemento porque este está creado para conseguir una unión más eficaz entre los materiales. Por otro lado, la cáscara de huevo no consigue el mismo nivel de adherencia, lo que puede hacer que la mezcla tenga más huecos y sea más susceptible a fallas si su uso no se controla adecuadamente.

9.6 COMPARACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN CILINDROS DE HORMIGÓN CON SUSTITUCIÓN Y SIN ELLA

El comportamiento mecánico del concreto se compara directamente, en este punto, con y sin reemplazar parcialmente el 10% del cemento por polvo de cáscara de huevo. Esto ayudará a establecer su impacto en la resistencia a la compresión durante varias edades de curado de 28, 14 y 7 días.

Tabla 57. Comparación de la resistencia a compresión en concreto con y sin sustitución parcial de cemento.

Edad de curado	Sin sustitución (MPa)	Con sustitución 10% cáscara de huevo (MPa)	Diferencia (MPa)	Variación aproximada
7 días	25,44	18,11	7,33	28,80%
14 días	28,83	25,07	3,76	13,00%
28 días	32,8	26,99	5,81	17,70%

Fuente: Autoría propia

En términos generales, se evidencia que ambas mezclas presentan un comportamiento ascendente en la ganancia de resistencia, lo cual es característico del proceso de hidratación del cemento. Sin embargo, las magnitudes alcanzadas difieren de manera significativa entre los dos tipos de concreto, lo que permite identificar el efecto real del material sustituyente.

La resistencia del concreto sin sustitución llegó a ser de 25,44 MPa al séptimo día, mientras que el concreto con sustitución registró 18,11 MPa. Esta diferencia indica una reducción aproximada del 29% en la resistencia inicial al incorporar la cáscara de huevo, lo cual sugiere que en edades tempranas el material sustituyente puede interferir ligeramente en el desarrollo inicial.

Para los 14 días, el concreto sin sustitución alcanzó 28,83 MPa, mientras que el concreto con sustitución llegó a 25,07 MPa. En esta etapa intermedia la diferencia se reduce, evidenciando

una recuperación progresiva del comportamiento resistente en la mezcla con sustitución, lo que indica que el proceso de hidratación continúa desarrollándose de manera estable.

El concreto sin sustitución llegó a 32,8 MPa al cumplir 28 días, lo que sobrepasó el valor de referencia de 29,4 MPa; por su parte, el concreto con sustitución logró alcanzar solo 26,99 MPa y no alcanzó el nivel de referencia. En este momento se nota la diferencia más grande entre las dos mezclas, lo que verifica que al reemplazar el 10% de cemento por cáscara de huevo reduce la resistencia final del hormigón. Sin embargo, esto no afecta su comportamiento estructural fundamental en el intervalo evaluado.

En términos porcentuales, el concreto sin sustitución supera el 112% de la resistencia de diseño, en tanto que el concreto con reemplazo alcanza aproximadamente el 92%, lo que representa una disminución global cercana al 18–20% en el desempeño final del material.

No obstante, el análisis comparativo permite establecer que, aunque el agregar cáscara de huevo disminuye la resistencia de la compresión, además el concreto mantiene un comportamiento progresivo y estructuralmente aceptable. Esto sugiere que el material puede ser considerado como una alternativa parcial de sustitución en aplicaciones donde no se requieran resistencias elevadas, aportando además un enfoque de sostenibilidad mediante el aprovechamiento de residuos.

9.7 ANÁLISIS VISUAL CON CORRECCIÓN DE CANTIDAD DE CEMENTO

Como parte adicional de la investigación, se efectuó una valoración visual de los especímenes de cilindros hechos de concreto que fueron sometidos a un ensayo de compresión. Estos cilindros pertenecían tanto a la mezcla patrón como a la mezcla que fue creada con un ajuste en el volumen de cemento. En esta evaluación se examinaron elementos tales como el tipo de avería, la aparición de grietas, si hubo desprendimiento de material y si había vacíos o agujeros con un tamaño superior a 5 mm. Con ese fin, se utilizaron como guía los parámetros de aceptación y clasificación establecidos en la NSR-10. Esta evaluación posibilitó la identificación del comportamiento físico de cada mezcla y su vinculación con las conclusiones en términos de resistencia mecánica.

Tabla 58. Análisis visual de los cilindros Ajustados

CILINDROS SIN SUSTITUCION						
Dias	IMAGEN	ASENTAMIENTO (in)	# DE ORIFICIOS MAYOR A 5MM	RESISTENCIA (Mpa)	TIPO DE FALLA	IMAGEN DEL FALLO
7		3	30	10,93	 Tipo 4	
14		3	39	15,06	 Tipo 5	
28		3	40	23,33	 Tipo 5	
CILINDROS CON SUSTITUCION TAMIS N° 200						
Dias	IMAGEN	ASENTAMIENTO (in)	# DE ORIFICIOS MAYOR A 5MM	RESISTENCIA (Mpa)	TIPO DE FALLA	IMAGEN DEL FALLO
7		3	56	14,97	 Tipo 3	
14		3	31	15,9	 Tipo 3	
28		3	28	17,77	 Tipo 5	

Fuente: Autoría propia

En los cilindros que corresponden a la corrección sin sustitución, el asentamiento se mantuvo invariable en 3 pulgadas en la preparación de la mezcla. Esto demuestra que la mezcla mantuvo un nivel apropiado de trabajabilidad a lo largo de todas las etapas de prueba. Con respecto a los valores obtenidos para la resistencia a la compresión fueron 10,93 MPa, 15,06 MPa y 23,33 MPa en ese orden; se observó un aumento constante con el tiempo de curado, lo cual es propio del concreto convencional. En cuanto a los orificios de más de 5 mm, se registraron 30, 39 y 40 vacíos; se notó un incremento en el número de porosidades con el paso del tiempo. Con respecto a la clase de falla, a los 7 días se registró un tipo 4, vinculada con una ruptura diagonal; en cambio, a los 14 y 28 días fue más frecuente del tipo 5, que se distingue por fisuras laterales y desgarramiento parcial del material, lo que señala una reacción más uniforme del cilindro durante la compresión.

Además, en los cilindros que fueron ajustados con el tamiz N.º 200 y la cantidad de cemento, el asentamiento se mantuvo igual en 3 pulgadas en la preparación de la mezcla para la prueba de los 7, 14 y 28 días de curado. Esto demuestra que la alteración no tuvo un impacto significativo en la manejabilidad de la mezcla. En cuanto en relación con la resistencia, se anotaron datos de 14,97 MPa, 15,9 MPa y 17,77 MPa. A pesar de que se notó un incremento progresivo con el tiempo, los resultados finales fueron más bajos que los conseguidos en la mezcla sin sustitución después de los 28 días. En cuanto a los orificios de tamaño mayor a 5 mm, se registraron 56, 31 y 28 vacíos, lo que evidencia una reducción gradual de las porosidades conforme el tiempo de curado aumentó.

Respecto a la clase de falla, se observó una falla tipo 3 en los días 7 y 14, la cual se caracteriza por presentar grietas verticales a lo largo del cilindro. Esto señala que el concreto se fracturó con mayor fragilidad. Se observó una falla de tipo 5 a los 28 días, parecida a la que se vio en los cilindros sin sustitución, lo cual mostró un comportamiento más estable del material con el paso del tiempo.

Los resultados de esta corrección, en última instancia, revelan que el ajuste del volumen de cemento posibilitó que la mezcla conservara una consistencia apropiada y mejorara en parte el comportamiento mecánico original del concreto. No obstante, la mezcla patrón continuó mostrando resistencias finales más elevadas, lo que evidencia que el contenido de cemento continúa siendo un elemento esencial para asegurar una adecuada adherencia entre los materiales y una mayor capacidad de durabilidad del concreto endurecido.

9.8 COMPARACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN EN CILINDROS DE HORMIGÓN CON SUSTITUCIÓN Y SIN ELLA CON EL AJUSTE DE CEMENTO

En esta etapa, se establece una comparación directa entre la mezcla convencional y la mezcla con sustitución parcial del concreto en términos de su comportamiento mecánico. Ambas mezclas son producidas con un reajuste en el volumen de cemento. Esto facilita el análisis del impacto que tiene la adición de cáscara de huevo en la resistencia a la compresión a distintas edades de curado (7, 14 y 28 días).

Evaluación entre la resistencia a compresión en concreto ordinario y en concreto con un reemplazo parcial de cáscara de huevo.

Tabla 59. Evaluación de la resistencia a compresión entre el concreto convencional y el concreto que incluye una sustitución parcial de cáscara de huevo con el reajuste de cemento

Edad de curado	Sin sustitución (MPa)	Con sustitución 10% cáscara de huevo (MPa)	Diferencia (MPa)	Variación aproximada
7 días	10,93	14,97	-4,04	37%
14 días	15,06	15,9	-0,84	6%
28 días	23,33	17,77	5,56	-24%

Fuente: Autoría propia.

Los resultados obtenidos permiten observar el comportamiento del concreto con y sin el cambio parcial de cemento con cascarón de huevo en el transcurso de las diferentes edades de curado. A los 7 días, la mezcla con sustitución alcanzó una resistencia de 14,97 MPa, superando en 4,04 MPa al concreto sin sustitución, lo que representa un incremento aproximado del 37 %. Este comportamiento indica que, en edades tempranas, La inclusión de la cáscara de huevo benefició el desarrollo inicial de resistencia, posiblemente debido al efecto de relleno de las partículas finas y a una mejor compactación de la mezcla.

A los 14 días, ambas mezclas presentaron resultados similares. El concreto con sustitución obtuvo una resistencia de 15,9 MPa frente a 15,06 MPa del concreto convencional, mostrando una diferencia de 0,84 MPa y una variación aproximada del 6 %. Esto evidencia que, en esta etapa, la mezcla con cáscara de huevo mantuvo un comportamiento mecánico cercano al concreto patrón, sin generar cambios significativos en la resistencia.

Sin embargo, a los 28 días se presentó una disminución importante en la resistencia del concreto con sustitución. Mientras el concreto sin sustitución alcanzó 23,33 MPa, la mezcla con cáscara de huevo obtuvo 17,77 MPa, registrando una diferencia de -5,56 MPa y una reducción aproximada del 24 %. Este comportamiento puede atribuirse a que la sustitución parcial del cemento disminuyó la cantidad de material cementante disponible para el proceso de hidratación, afectando el desarrollo de resistencia a edades más avanzadas.

Los resultados obtenidos permiten observar que tanto la mezcla convencional como la mezcla con sustitución parcial de cemento presentaron una disminución en la resistencia esperada respecto al diseño inicial. Sin embargo, al comparar ambos comportamientos, se evidencia que la incorporación del 10 % de cáscara de huevo no afectó de manera crítica el desempeño del concreto, especialmente en edades tempranas, donde incluso se registraron resistencias superiores frente a la mezcla sin sustitución.

A los 7 días, la mezcla con cáscara de huevo alcanzó una resistencia mayor que la mezcla convencional, lo que sugiere que las partículas finas de la cáscara contribuyeron a mejorar la compactación y cohesión interna del concreto. A los 14 días, ambas mezclas mostraron comportamientos similares, manteniendo diferencias poco significativas en la resistencia. Sin embargo, a los 28 días, aunque la mezcla con sustitución presentó una resistencia inferior frente al concreto patrón, esta continuó mostrando un comportamiento estable y adecuado para aplicaciones donde no se requieran altas exigencias estructurales.

Considerando que incluso la mezcla base presentó una reducción respecto a la resistencia proyectada inicialmente, se concluye que El uso de cáscara de huevo como reemplazo parcial del cemento supone una alternativa viable para elementos no estructurales, tales como andenes, bordillos, adoquines, senderos peatonales o elementos prefabricados de baja sollicitación. Además, su utilización aporta beneficios ambientales al aprovechar un residuo orgánico y reducir parcialmente el uso de cemento, lo que favorece la adopción de prácticas más sostenibles en la construcción.

10 CONCLUSIONES

- La evaluación de los materiales utilizados en la mezcla confirmó que los materiales de origen pétreos cumplieron con referencia a los parámetros establecidos en las Normas Técnicas Colombianas. El agregado grueso presentó un coeficiente de desgaste del 23,5 % en la Máquina de los Ángeles, por debajo del límite máximo admisible del 40 %, una densidad aparente de $2,63 \text{ g/cm}^3$ y una absorción de 1,28 %. Los agregados de tipo fino arrojaron una densidad de $2,62 \text{ g/cm}^3$, como también una absorción del 1,74 % y una equivalencia de arenas del 78 %, superando el mínimo recomendado del 75 %. Estos resultados garantizaron la uniformidad y confiabilidad del proceso experimental, validando la idoneidad de los agregados para el diseño de mezcla.
- El proceso de recolección, lavado, secado al aire libre durante 10 horas, trituración manual y tamizado en malla N.º 200 permitió obtener un polvo homogéneo con partículas inferiores a 0,075 mm, granulométricamente comparable al cemento. Este procedimiento, ejecutado sin tratamientos térmicos de alta demanda energética como la calcinación, demostró ser técnicamente suficiente para integrar el residuo en la matriz cementante sin afectar la trabajabilidad de la mezcla, la cual mantuvo un asentamiento constante de 3 pulgadas en todos los lotes de producción. La composición mayoritaria de carbonato de calcio CaCO_3 , superior al 90 % fundamenta su comportamiento como material de carácter puzolánico y respalda su uso como sustituto parcial del cemento.
- La aplicación del método ACI 211 permitió diseñar dos mezclas comparables y controladas. La mezcla patrón conservó los 381 kg/m^3 de cemento proyectados, mientras que la mezcla modificada sustituyó el 10 % de ese contenido $38,1 \text{ kg/m}^3$ por polvo de cáscara de huevo, manteniendo constantes la relación $a/c = 0,53$, el contenido de agregados y el volumen de agua 205 L/m^3 . Esta condición garantizó que la sustitución parcial fuera la única variable experimental, y el asentamiento estable de 3 pulgadas en ambas mezclas confirmó que la incorporación del residuo no alteró de forma significativa la trabajabilidad ni la cohesión del concreto en estado fresco.
- El concreto convencional alcanzó resistencias de 25,44 MPa, 28,83 MPa y 32,8 MPa a los 7, 14 y 28 días, equivalentes al 87 %, 98 % y 112 % de la resistencia de diseño, respectivamente, evidenciando un comportamiento mecánico favorable y una ganancia progresiva de resistencia superior a la esperada. En contraste, la mezcla con sustitución parcial presentó resistencias de 18,11 MPa, 25,07 MPa y 26,99 MPa, correspondientes al 62 %, 85 % y 92 % de la resistencia de diseño. Esto representa una disminución de 28,8 % a los 7 días, 13 % a los 14 días y 17,7 % a los 28 días respecto a la mezcla convencional, lo que evidencia que la sustitución redujo la capacidad resistente del concreto, aunque mantuvo una evolución mecánica continua y estable durante todo el periodo de curado.
- Los ensayos de compresión a los 7, 14 y 28 días demostraron que la mezcla convencional alcanzó 25,44 MPa, 28,83 MPa y 32,8 MPa, equivalentes al 87 %, 98 % y 112 % de la resistencia de diseño respectivamente, evidenciando un desempeño mecánico óptimo. La mezcla con sustitución del 10 % de cáscara de huevo obtuvo 18,11 MPa, 25,07 MPa y 26,99 MPa, correspondientes al 62 %, 85 % y 92 % del f'_c , con una reducción del 17,7 % frente a la mezcla patrón a los 28 días. En la configuración con

reajuste de cemento, la mezcla con sustitución superó en un 37 % la resistencia de la mezcla convencional a los 7 días, aunque a los 28 días fue un 24 % inferior, confirmando que la cáscara de huevo favorece el desarrollo inicial de resistencia, pero limita el desempeño mecánico en edades avanzadas. En conjunto, la sustitución parcial del 10 % representa una alternativa técnicamente viable para elementos no estructurales, con el beneficio adicional de reducir aproximadamente 34,3 kg de CO₂ por metro cúbico de concreto producido.

11 RECOMENDACIONES

- Se recomienda mantener la sustitución de un 10 % de cemento por cascarón de huevo, ya que fue el porcentaje que presentó el mejor comportamiento dentro del estudio, logrando un balance adecuado entre resistencia y aprovechamiento del residuo. Además, se evidenció que porcentajes menores no generan cambios significativos y porcentajes mayores afectan más la resistencia del concreto.
- Se aconseja seguir utilizando la cáscara de huevo en su estado original procesada, es decir, limpia, seca, triturada y tamizada, sin someterla a procesos como la calcinación, ya que estos generan mayor contaminación y disminuyen el beneficio ambiental que se busca con el aprovechamiento de este residuo.
- Se recomienda realizar más ensayos para conocer cómo se comporta este concreto con el paso del tiempo, especialmente frente a la humedad, el desgaste y otras condiciones que pueden presentarse durante su vida útil.
- Se recomienda mejorar el proceso de mezclado y compactación para reducir la cantidad de vacíos observados en algunos cilindros, ya que estos pueden afectar directamente la resistencia del concreto.
- Se sugiere considerar este tipo de concreto en elementos que no requieran altas exigencias estructurales, como andenes, bordillos, adoquines o prefabricados livianos, donde su resistencia puede ser suficiente y funcional.
- Se recomienda continuar estudiando esta alternativa desde el enfoque ambiental, ya que el uso de cáscara de huevo permite aprovechar un residuo que normalmente se desecha y al mismo tiempo reducir una parte del consumo de cemento.
- Se recomienda repetir el estudio con una mayor cantidad de muestras para obtener resultados más consistentes y reforzar la confiabilidad de la investigación.

REFERENCIAS

(s.f.).

- ACEVEDO MALDONADO, I. (2015). *MEMORIA DE CÁLCULO DISEÑO ESTRUCTURAL EDIFICIO M-001*. Bogota: Universidad de los Andes. Obtenido de <https://repositorio.uniandes.edu.co/server/api/core/bitstreams/338a9797-76c0-4134-80d5-40f993b1dad6/content>
- Aizpurua, L., Moreno, G., & Caballero, K. (2015). *Estudio del concreto de alta resistencia con el uso de cenizas de materiales orgánicos y polímeros*. Panama: CITEC.
- Álvarez, O. (15 de julio de 2021). *Densidad Enciclopedia Concepto*. Obtenido de concepto: <https://concepto.de/densidad/>
- American Concrete Institute. (2009). *ACI 211.1-91: Standard practice for selecting proportions for normal, heavyweight, and mass concrete*. Obtenido de <https://es.scribd.com/document/495637980/ACI-211-1-91-en-es>
- Antala. (19 de septiembre de 2023). *Antala Industria*. Obtenido de ¿Qué es el desgaste de maquinaria y cómo prevenirlo?: <https://www.antala.es/que-es-desgaste-maquinaria/>
- Anwar, C. (2005). *Efecto del polvo de cáscara de huevo sobre el potencial estabilizador de la cal en un suelo arcilloso expansivo*. Nigeria: Insinet .
- ARGOS. (2021). ARGOS. Recuperado el 30 de agosto de 2024, de ARGOS: <https://colombia.argos.co/autoconstructores/usos-del-concreto-en-tus-proyectos-de-construccion/#:~:text=El%20concreto%20es%20un%20material,%2C%20grandes%20estructuras%2C%20entre%20otras.>
- Arlington, U. o. (s.f.). *University of Texas at Arlington*. Obtenido de <https://uta.pressbooks.pub/soilmechanics/chapter/sieve-analysis/>
- Asamblea de las Naciones Unidas. (2023). *Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible*. Colombia: Naciones Unidas.
- ASTM-C127. (11 de Septiembre de 2007). *Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate*. Obtenido de Standard Test Method for Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse Aggregate: <https://ensayosdelaboratoriosuelos.wordpress.com/wp-content/uploads/2015/12/astm-c-127.pdf>
- Atencia, V., Támara, M., & González, F. (2024). *Evaluación de la utilización del polvo de cáscara de huevo como remplazo parcial del material cementante en mezclas de mortero*. Cucuta: Universidad Simón Bolívar.
- Binici, H., Aksogan, O., & Resatoglu, R. (2018). *EFEECTO DE LA CLARA DE HUEVO, LA PERLITA, EL YESO Y LAS CENIZAS VOLANTES EN MATERIALES AISLANTES ECOLÓGICOS*. Serbia: Facta Universitatis.
- Budhu, M. (23 de mayo de 2015). *Soil Mechanics Fundamentals - Metric Version*. Obtenido de Soil Mechanics Fundamentals - Metric Version: <http://ndl.ethernet.edu.et/bitstream/123456789/87967/13/Muni%20Budhu-Soil%20Mechanics%20Fundamentals%20-%20Metric%20Version-Wiley-Blackwell%20%282015%29.pdf>
- Burga, J., & Noé, i. P. (2018). *Aprovechamiento de residuos agroindustriales de cascara de huevo como insumo para la elaboracion de pintura latex de color*. Lima: Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Obtenido de <https://cybertesis.unmsm.edu.pe/item/40fcc4f0-6b08-47b5-9fb3-adc97b12c7b6>
- C131, A. (2020). *ASTM C 131-03 Desgaste de Los Angeles*. Mexico: Asociacion mexicana de asfalto .

- C136, A. (2023). *Método de prueba estándar para análisis de tamiz de agregados finos y gruesos*. Bogota: ASTM International.
- C618, A. (2021). *ASTM C618-21: Especificación estándar para cenizas volantes de carbón y puzolana natural cruda o calcinada para uso en concreto*. Bogota: ASTM International.
- Caicedo, E., Frias, E., Gomez, F., & Bravo, V. (26 de Enero de 2015). *Creacion de concreto con casacara de huevo*. Universidad del norte. Obtenido de <https://www.uninorte.edu.co/es/web/grupo-prensa/w/con-cascaras-de-huevo-crean-un-cemento-menos-danino-para-el-medio-ambiente>
- Caldas, U. D. (04 de octubre de 2017). *GUÍA DE LABORATORIO PARA LA DETERMINAR EL ASENTAMIENTO EN EL CONCRETO*. Obtenido de GUÍA DE LABORATORIO PARA LA DETERMINAR EL ASENTAMIENTO EN EL CONCRETO: <https://ftecologica.udistrital.edu.co/laboratorios/civiles/sites/lab-civiles/files/practica/2023-03/Asentamiento%20en%20el%20concreto.pdf>
- Calixto, M. (2022). *Implementación Cascaras de Huevo como Sustituto Parcial para el Material Cementante*. Tunja : Universidad Santo Tomás Seccional Tunja. Obtenido de file:///C:/Users/carolina%20roa/Downloads/2022RafaelCalixto%20(1).pdf
- Candelas, Luis . (16 de Febrero de 2017). *ADITIVOS PARA CONCRETO*. Obtenido de ADITIVOS PARA CONCRETO: https://www.ingenieria.unam.mx/luiscl/licenciatura_ic/1444_pcee/1444_material/aditivo_spresen.pdf
- Cemex. (2024). *Agregados para concreto*. Obtenido de Cemex: <https://www.cemexmexico.com/productos/agregados#:~:text=El%20agregado%20es%20un%20material,formar%20concreto%20o%20mortero%20hidr%C3%A1ulico>.
- Cesar, G., Pérez, S., Brotons, B., & Tanza, J. (2009). *Universidad de Alicante*. Recuperado el 18 de Mayo de 2025, de https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/10998/3/Práctica%20Nº%203%20_Granulometría%20I_.pdf
- Ciceron. (1 de noviembre de 2020). *Cementos Tequendama*. Obtenido de ¿Qué es el cemento y cuál es su composición? - Cementos Tequendama.: <https://cetesa.com.co/blog/que-es-el-cemento-y-cual-es-su-composicion/>
- Colombiano, S. G. (2015). SGC. Obtenido de SGC: <https://www.sgc.gov.co/>
- Communications. (13 de julio de 2023). *¿Qué es la sostenibilidad? Un camino urgente y sin marcha atrás*. . Obtenido de www.bbva.com/es/sostenibilidad/que-es-la-sostenibilidad-un-camino-urgente-y-sin-marcha-atras/
- concreto, A. c. (2024). *¿Como evitar la reaccion alcali agregado?* Obtenido de 360 Concreto: <https://360enconcreto.com/blog/detalle/como-evitar-la-reaccion-alkali-agregado-1/#:~:text=La%20reacci%C3%B3n%20%C3%A1lcali%2D%20agregado%2C%20es,p%C3%A9rdida%20de%20su%20vida%20%C3%BAtil>.
- Construpedia. (17 de 11 de 2024). *CONSTRUMATICA*. Obtenido de CONSTRUMATICA.COM: https://www.construmatica.com/construpedia/Cemento_Puzol%C3%A1nico
- Cordero, D. G., Cardenas, A. J., & Suarez, R. P. (2022). *Diseño de mezclas de concreto aplicando el método ACI*. Santander : Universidad Francisco de Paula Santander.
- Corral, t. (2010). *Caraterizacion granulometrica de las plantas productoras de arena*. Obtenido de Ciencia y Sociedad: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=87024622003>
- DANE. (29 de Abril de 2023). *dane.gov*. Obtenido de dane.gov.co: <https://www.dane.gov.co/>
- Delgadillo, F., & Martinez, A. (2010). *Manual de Procedimientos Analíticos*. Mexico: Universidad Nacional Autonoma de Mexico .

Departamento Administrativo de la Función Pública. (12 de junio de 2015). *Decreto 1072 de 2015: Decreto Único Reglamentario del Sector Trabajo*. Obtenido de https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma_pdf.php?i=62885

Designation C535. (2024). *Ensayo ASTM C535*. Bogota: Univercidad de veracruz .

donconcreto. (4 de mayo de 2022). *¿Qué es el concreto?* Obtenido de <https://www.donconcreto.com/que-es-el-concreto>

Dra. Lilit Pogosyan, D. S. (s.f.). *Porosidad, DR y DA - University of Malaga*. Obtenido de Laboratorio de Geomorfología y Suelos: <https://www.inecol.mx/index.php/divulgacion/ciencia-hoy/los-poros-del-suelo>

E-133-13, I. (27 de marzo de 2022). *Equivalencia de arenas de sueltos y agregados finos*. Obtenido de <https://www.da-lab.co/wp-content/uploads/2021/04/INV-133-13.pdf>

EL TIEMPO . (27 de febrero de 1999). El centenario de girardot. Obtenido de <https://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-881772>

Ennomotive. (14 de septiembre de 2019). *Ennomotive.com*. Obtenido de Ennomotive.com: <https://www.ennomotive.com/es/produccion-de-cemento/>

Federación Nacional de Avicultores de Colombia. (28 de abril de 2025). *Fenavi.org*. Obtenido de Fenavi.org: <https://www.fenavi.org/>

FLOTTWEG. (2024). *FLOTTWEG*. Recuperado el 30 de agosto de 2024, de FLOTTWEG: <https://www.flottweg.com/es/wiki/tecnica-de-separacion/ley-de-stokes/>

Fonseca, G., & Ramirez, A. (2023). *Proceso de selección de criterios y metodologías para la construcción de edificaciones*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Obtenido de https://d1wqtzts1xzle7.cloudfront.net/33803759/La_construccion_sostenible-libre.pdf?1401189444=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DLa_construccion_sostenible.pdf&Expires=1723093431&Signature=J6bXSdAvoLO2KAJa~4Jxnst~wg5E8vee9GS0IXHrpdY0hymSQ

Forumnatura natour. (31 de Enero de 2019). *Materiales de construcción hechos con cáscara de huevo y otros residuos*. Obtenido de <https://forumnatura.org/2019/01/31/materiales-de-construccion-hechos-con-cascara-de-huevo-y-otros-residuos/>

GARCÍA ANDREU, S. P. (2008). *Prácticas de Materiales de Construcción – I.T. Obras Públicas* . Alicante.

García, M. D., Morrillo, G., & Guerra, M. (2023). CARACTERÍSTICAS DE DOS AGREGADOS GRUESOS TRITUR. *Revista Científica INGENIAR*. Obtenido de <https://share.google/IDWU23T0WztPKKL4L>

Garcia, O. J., Quito, R. J., & Perdomo, M. J. (2020). *Análisis de la huella de carbono en la construcción y su impacto sobre el ambiente*. Bogota: Univercidad estatal.

Garcia, O., Rodriguez, Q., & Perdomo, M. (2020). *Análisis de la huella de carbono en la construcción y su impacto sobre el ambiente*. Melgar: Univercidad de la sabana.

GEO. (2020). *GEO*. Recuperado el 30 de agosto de 2024, de GEO: <https://geo-webonline.com/sistema-unificado-de-clasificacion-del-suelo/>

Gobierno de colombia. (25 de julio de 2024). *colombiaenmaps*. Recuperado el 10 de 03 de 2026, de GOV.CO: <https://www.colombiaenmapas.gov.co/>

Gomez, F., Steven, F., & Pacheco, C. (2018). *Uso de cáscara de huevo como reemplazo parcial de material cementante en cubos mortero decemento hidráulico*. Rioja, españa: Dialnet.

GOV.CO. (2019). *Autoridad Nacional de Licencias Ambientales*. Obtenido de Autoridad Nacional de Licencias Ambientales: https://www.anla.gov.co/01_anla/tramites-y-servicios/servicios/estudio-de-impacto-ambiental

- Guanajuato, A. i. (20 de Febrero de 2017). *Tipos de desgaste y su solucion*. Obtenido de Industrial: <https://adhesivosindustriales.com.mx/blog/soluciones-industriales/100-tipos-desgaste.html>
- Gupioc, A., & Moya, Z. (2023). *Evaluación de las propiedades físico-mecánicas del concreto sustituyendo parcialmente el cemento por residuo ceramicos reforzado con cascara de huevo*. peru: FACULTAD DE INGENIERÍA, ARQUITECTURA Y URBANISMO.
- Holcim Mexico. *So the world builds better*. (4 de junio de 2024). Obtenido de Agregados del concreto: definición, características y tipos: <https://www.holcim.com.mx/agregados>
- ICONTEC. (1994). *NTC 77*. Obtenido de MÉTODO DE ENSAYO PARA EL ANÁLISIS POR : https://www.academia.edu/14595154/NTC_77_MÉTODO_DE_ENSAYO_PARA_EL_A_NÁLISIS_POR_TAMIZADO_DE_LOS_AGREGADOS_FINOS_Y_GRUESOS
- ICONTEC. (1995). *NTC 176*. Obtenido de MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR LA DENSIDAD Y LA ABSORCIÓN DEL AGREGADO GRUESO: <https://es.scribd.com/document/141287545/norma-ntc-176>
- ICONTEC. (1995). *NTC 237*. Obtenido de MÉTODO PARA DETERMINAR LA DENSIDAD Y LA ABSORCIÓN DEL AGREGADO FINO: https://www.academia.edu/37098066/NORMA_TÉCNICA_NTC_COLOMBIANA_237_I_NGENIERÍA_CIVIL_Y_ARQUITECTURA_MÉTODO_PARA_DETERMINAR_LA_DEN_SIDAD_Y_LA_ABSORCIÓN_DEL_AGREGADO_FINO
- ICONTEC. (2006). *NTC 98*. Obtenido de MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR LA RESISTENCIA AL DESGASTE DE AGREGADOS GRUESOS HASTA DE 37,5 mm, UTILIZANDO LA MÁQUINA DE LOS ÁNGELES : https://www.academia.edu/27252829/NORMA_TÉCNICA_NTC_COLOMBIANA_98_IN GENIERÍA_CIVIL_Y_ARQUITECTURA_MÉTODO_DE_ENSAYO_PARA_DETERMIN AR_LA_RESISTENCIA_AL_DESGASTE_DE_AGREGADOS_GRUESOS_HASTA_DE _37_5_mm_UTILIZANDO_LA_MÁQUINA_DE_LOS_ÁNGELES
- ICONTEC. (2017). *NTC 174, ESPECIFICACIONES DE LOS AGREGADOS PARA CONCRETO* . Obtenido de <https://es.scribd.com/document/359996341/NTC-174-Concretos-Especificaciones-de-los-Agregados-Para-Concreto-pdf>
- ICONTEC. (2023). *Concretos. Método de ensayo para el análisis por tamizado de los agregados finos y gruesos*. CARTAGENA . Obtenido de NTC .
- INCONTEC. (1995). *NTC 92*. Obtenido de DETERMINACION DE LA MASA UNITARIA Y VACÍOS ENTRE PARTÍCULAS DE AGREGADOS: <https://es.scribd.com/document/420869614/NTC-92-Determinacion-Peso-Unitario-y-Vacios-en-Agregados-pdf>
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). (16 de Marzo de 2022). *ecollection-icontec-org.unipiloto.basesdedatosezproxy.com*. Obtenido de <https://ecollection-icontec-org.unipiloto.basesdedatosezproxy.com/pdfview/viewer.aspx?locale=es-ES&Q=A465F2DDA6B0FDB83A33B01BCED1EBDEC9E021851AB8BA96&Req=>
- instrumentos, M. (04 de Febrero de 2019). *MyM instrumentos tecnicos*. Obtenido de MyM instrumentos tecnicos: <https://www.myminstrumentostecnicos.com/equipos-de-laboratorio/tamices/%E2%96%B6-tamiz-que-es/#:~:text=El%20tamiz%20es%20un%20Utensilio,conocido%20por%20cedazo%20o%20criba>.
- INVIAS. (15 de Noviembre de 2013). *Sección 200*. Obtenido de Sección 200: https://www.umv.gov.co/sisgestion2019/Documentos/APOYO/GLAB/GLAB-DE-002_V1_Normas__Invia_Seccion__200-13.pdf

- Jacobi, P. (2018). *Aprovechamiento de residuos agroindustriales de cascara de huevo como insumo para la elaboracion de pintura latex de color*. Peru : Univercidad Nacional Mayor de san Marcos .
- JAIME GUALTEROS, J. G. (2020). *ESTADO DEL CONOCIMIENTO ACERCA DE LOS MÉTODOS MECANICOS MAS COMUNES PARA LA DETERMINACION DE LA RESISTENCIA AL DESGASTE, DURABILIDAD Y EROSION EN MATERIALES DE AGREGADOS GRUESOS* . Bogota : Universidad catolica de colombia.
- JavierSilva, O. (7 de julio de 2022). *360 EN CONCRETO*. Obtenido de TIPOS DE AGREGADOS y SU INFLUENCIA EN EL DISEÑO DE MEZCLA DEL CONCRETO: <https://360enconcreto.com/blog/detalle/tipos-de-agregados-y-su-influencia-en-mezcla-de-concreto/>
- Kosmatka, S., Kerkhoff, B., & Sepulveda, W. (17 de Mayo de 2014). *Diseño y Control de Mezclas de Concreto*. Obtenido de Diseño y Control de Mezclas de Concreto: <https://ingenierosciviles.com.mx/Biblioteca/files/original/4e03b9ddedc81f98353a2e65478f0c50.pdf>
- Kosmatka, S., Kerkhoff, B., Panarese, W., & Tanesi, J. (2004). *Diseño y Control de Mezclas de Concreto*. Portland Cement Association.
- Kosmatka, S., Kerkhoff, B., Panarese, W., & Tanesi, J. (2004). *Diseño y Control de Mezclas de Concreto*. Bogota : Portland Cement Association.
- LEÓN, R. (2008). *ROLLIER*. Recuperado el 30 de agosto de 2024, de ROLLIER: <https://www.rollier.com/es/gradacion-la-importancia-de-la-curva-granulometrica-en-el-hormigon-y-las-carreteras/>
- Martha Abril, A. R. (2017). *IDENTIFICACIÓN DE LA VARIACIÓN EN LA RESISTENCIA DEL CONCRETO DEBIDO AL ORIGEN DEL AGREGADO GRUESO*. Bogota D.C: Universidad Católica de Colombia.
- Martínez, R. A. (2022). *Implementación Cascaras de Huevo como Sustituto Parcial para el Material Cementante*. Tunja: Universidad Santo Tomás Seccional Tunja. Obtenido de [file:///C:/Users/carolina%20roa/Downloads/2022RafaelCalixto%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/carolina%20roa/Downloads/2022RafaelCalixto%20(1).pdf)
- Montoya, V. (2017). *Elementos de concreto reforzado 1*. Ibage : Universidad de Ibagué. Obtenido de <https://elibro.net/es/ereader/unipiloto/117761?prev=as>
- MOP, I. T. (2001). *Ensayo del equivalente de arena*. chile: Ministerio de Obras Públicas.
- MORENO, A. (2024). *360 En concreto*. Recuperado el 30 de agosto de 2024, de 360 En concreto: <https://360enconcreto.com/blog/detalle/que-es-la-curva-granulometrica-de-los-agregados-y-como-asegurarte-de-que-sea-la-correcta-para-tu-proyecto-1/>
- NAN Arquitectura. (29 de Agosto de 2024). *NAN*. Obtenido de Historia de la arquitectura sostenible - NAN: <https://nanarquitectura.com/2024/04/24/historia-de-la-arquitectura-sostenible/33007>
- Normas incontec NTC 722. (21 de 06 de 2008). *SCRIBD*. Obtenido de Metodo de Ensayo para determinar la resistencia a la tension indirecta: <https://es.scribd.com/document/465894382/NTC-722-pdf>
- NSR-10. (enero de 2010). *REGLAMENTO COLOMBIANO DE CONSTRUCCIÓN SISMORESISTENTE*. Obtenido de REGLAMENTO COLOMBIANO DE CONSTRUCCIÓN SISMORESISTENTE: <https://www.unisdr.org/campaign/resilientcities/uploads/city/attachments/3871-10684.pdf>
- NTC. (17 de agosto de 2012). *Incontec*. Obtenido de Incontec.org: <https://tienda.icontec.org/gp-valor-equivalente-de-arena-en-suelos-y-agregado-fino-ntc6179-2016.html>

- NTC, N. T. (2007). *MÉTODO DE ENSAYO PARA EL ANÁLISIS POR TAMIZADO DE LOS AGREGADOS FINOS Y GRUESOS*. Bogota D.C: Icontec.
- NTC176. (1995). *NTC176 Metodo para determinar la densidad y la absorción del agregado grueso*. BOGOTA: INCINTEC.
- NTC-396. (15 de Enero de 1992). *MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR EL ASENTAMIENTO DEL CONCRETO*. Obtenido de MÉTODO DE ENSAYO PARA DETERMINAR EL ASENTAMIENTO DEL CONCRETO: <https://es.slideshare.net/slideshow/ntc-396/45026034>
- NTC-92. (2015). *Determinación Peso Unitario y Vacíos en Agregados*. Obtenido de Determinación Peso Unitario y Vacíos en Agregados: <https://es.scribd.com/document/420869614/NTC-92-Determinacion-Peso-Unitario-y-Vacios-en-Agregados-pdf>
- Ojeda, R. &. (2017). *Evaluación experimental de las características mecánicas de matrices cementicias con adición de cáscara de huevo pulverizado deshidratado y sus aplicaciones en la arquitectura*. Obtenido de <https://www.semanticscholar.org/paper/Evaluación-experimental-de-las-características-de-y-Ojeda-Verónica/a9014b96d9b01adabcd4ec42104e9237832ee8ec>
- Olana, G. (2024). *Libro de concreto*. Bogota: SCRIBD. Obtenido de Argos: <https://360enconcreto.com/blog/detalle/que-es-el-concreto/>
- Oliveria, L., & Benillo, P. (2012). *Revisión bibliográfica sobre cómo agregar valor a los residuos sólidos: cáscaras de huevo*. Brasil: ELSEVIER.
- Palacio, L. Ó., Chávez, P. Á., & Velásquez, C. Y. (25 de agosto de 2017). *Revista Tecnura*. Obtenido de Evaluación y comparación del análisis granulométrico obtenido de agregados naturales y reciclados.: https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/Tecnura/article/view/8195/13454#content/contributor_reference_1
- Perez, R. R. (2023). *Influencia de la sustitución del cemento por cenizas de cascarón de huevo triturado en las propiedades físicas y mecánicas del concreto 210 kg/cm²*. Peru: Universidad César vallejo.
- Pole, K. (2009). *Diseño de metodologías mixtas. Una revisión de las estrategias para combinar metodologías cuantitativas y cualitativas*. Guadalajara : Revista Renglones.
- Porto, J. P. (13 de abril de 2023). *Definición.de*. Obtenido de Abrasión - Qué es, en la geología, definición y concepto: <https://definicion.de/abrasion/#:~:text=Para%20la%20geolog%C3%ADa%2C%20la%20abrasion%C3%B3n,externos%20arrancan%20fragmentos%20de%20materia.>
- Posso, V. (2020). *Método de Reutilización de la Cascara de Huevo*. Pereira: Universidad Católica de Pereira. Obtenido de <https://repositorio.ucp.edu.co/server/api/core/bitstreams/54b63744-a2e3-4064-b5c6-64e24b5d6a85/content>
- pública, F. (26 de mayo de 2015). *Decreto 1077 de 2015 Sector Vivienda, Ciudad y Territorio*. Obtenido de Decreto 1077 de 2015 Sector Vivienda, Ciudad y Territorio: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=77216>
- Quinteros, M. (24 de marzo de 2023). *ANÁLISIS DE TAMAÑO DE PARTÍCULAS POR TAMIZADO*. Nicaragua: UNIVERSIDAD CENTROAMERICANA. Obtenido de COTECNO | Equipamiento Científico | Prospecciones, Auscultación, Geofísica, Ingeniería: <https://www.cotecno.cl/granulometria-analisis-granulometrico-suelos/>
- Rafael, A. (2022). *Implementación de Cáscaras de Huevo en Concreto Arquitectónico - Tesis 2022*. Tunja: Universidad Santo Tomás Seccional Tunja.

- Reiban, O., & Veronica, D. (2017). *Evaluacion experimental de las características mecánicas de matrices cementicias con adición de cascara de huevo pulverizado deshidratado y sus aplicaciones en la arquitectura*. ECUADOR: Universidad técnica particular de Loja.
- Saíenz, G., Petrement, J., & Saiz, R. (2014). *Materiales de construcción: problemas de granulometría*. España : Universidad de Burgos. Obtenido de <https://elibro.net/es/ereader/unipiloto/59484>
- sanches, A. (22 de agosto de 2024). Encuesta de vivienda . (M. Rocha, Entrevistador)
- Sandoval, M. (22 de agosto de 2024). Encuesta de vivienda. (J. Roa, Entrevistador)
- SGC. (2015). *Servicio Geológico Colombiano*. Obtenido de Servicio Geológico Colombiano: <https://www.sgc.gov.co/>
- Tecnal. (2018). *Tecnal*. Obtenido de https://tecnal.com.br/es/blog/294_textura_y_granulometria_del_suelo_comprenda_esta_relacion
- Toledo, D. (2023). *Metodo de prueba para el valor equivalente de arena* . Ecuador : Univercidad ccentral de ecuador .
- Torices, C. (1 de Febrero de 2023). *Concreto hidráulico: ¿qué es y cómo se utiliza en pavimentación?* Obtenido de Cementos Torices: <https://cementostorices.com/blog/construccion/concreto-hidraulico-que-es-y-como-se-utiliza-en-pavimentacion/#:~:text=El%20concreto%20hidr%C3%A1ulico%20es%20un%20material%20utilizado%20en%20pavimento%20y,al%20circular%20por%20una%20vialidad.>
- Torrallbo, G. (2018). *Mecánica de suelos: conceptos básicos y aplicaciones*. Bogota : Dextra Editorial. Obtenido de <https://www-ebooks7-24-com.unipiloto.basesdedatosezproxy.com/?il=7824>
- VARGAS, J., & CUELLAR MELGAREJO, D. (2021). *COMPARACIÓN DEL COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL Y ECONÓMICO DE LOS DIFERENTES SISTEMAS DE LOSAS DE ENTREPISO, USADOS EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO PARA EDIFICIOS DE CINCO PISOS DE ALTURA*. Bogota: UNIVERSIDAD DISTRITAL FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS. Obtenido de <https://repository.udistrital.edu.co/server/api/core/bitstreams/9c91bcc6-354c-4a20-82b7-6d2f055abede/content>
- Vargas, L. (22 de agosto de 2024). Encuesta de vivienda . (K. Lombana, Entrevistador)
- Vélez, L. M. (3 de Diciembre de 2010). *Permeabilidad y porosidad del concreto*. Obtenido de Permeabilidad y porosidad del concreto: file:///C:/Users/HP/Downloads/ojsitm,+Gestor_a+de+la+revista,+06+Art%C3%ADculo+09.pdf
- Vergara, A. R. (2020). *Método de Reutilización de la Cascara de Huevo*. Pereira: Universidad Católica de Pereira.
- waste, C. (2023). *Servicio de aprovecha la utilizacion de materiales para un reciclaje sostenible* . Obtenido de CWS: <https://circularwaste.es/reutilizacion-de-materiales-en-el-reciclaje/>
- Wikipedia, C. d. (19 de junio de 2024). *Girardot*. Obtenido de Wikipedia la Enciclopedia Libre: [https://es.wikipedia.org/wiki/Girardot#/media/Archivo:Colombia_Cundinamarca_localization_map_\(+locator_map\).svg](https://es.wikipedia.org/wiki/Girardot#/media/Archivo:Colombia_Cundinamarca_localization_map_(+locator_map).svg)
- Wikipedia., c. d. (13 de julio de 2024). *Libre, Wikipedia la Enciclopedia*. Obtenido de El colegio: https://es.wikipedia.org/wiki/El_Colegio
- X, C. E. (s.f.). *The Unified Soil Classification System (USCS)*. Obtenido de The Unified Soil Classification System (USCS): <https://civilengineeringx.com/geotechnical-engineering/the-unified-soil-classification-system-uscs/>
- Yerramala, A. (2014). *Polvo de cáscara de huevo como sustituto del cemento*. India : SCRIBD.

yohana, L., & Sepulveda, D. (2024). *Carateristicas fisicas de diferentes muestras de agregados petreos*. Recuperado el 15 de Junio de 2025, de Repositorio universidad catolica: <https://repository.ucatolica.edu.co/server/api/core/bitstreams/5459d72d-a9ca-477c-990a-edb216399a05/content#:~:text=Los%20agregados%20finos%20consisten%20en,o%20el%20de%2025%20mm>