



UNIVERSIDAD DEL AZUAY

FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

Hormigón Alivianado: Evaluación del desempeño mecánico y de durabilidad a través del reemplazo del agregado grueso y fino por piedra pómez.

Trabajo previo a la obtención del grado académico de:

INGENIERO CIVIL

Autor:

GABRIELA NATALIA PIZARRO REDROVÁN

Director:

ING. BERNARDO FEIJOO

CUENCA, ECUADOR

2026

Dedicatoria

A mi mami Nelly, dedico este trabajo con todo mi amor y gratitud, por ser mi ejemplo de fortaleza y de constancia. Todo lo que soy tiene algo tuyo, por tus palabras de aliento y la calma. Este logro no existiría sin los tuyos.

A mi tía Raquel, mi segunda madre, y una de las personas más importantes en mi vida. Por haber cuidado de mí de esa manera discreta y constante que solo hacen quienes aman de verdad. Gracias por sus consejos dados con cariño y sin condiciones, y por hacerme sentir siempre acompañada. Su confianza en mí fue, muchas veces, más grande que la yo tuve en mí misma.

A mis hermanas Andrea y Paula; a Andrea por ser mi fuente de inspiración y perseverancia, por acompañarme y ayudarme en esta etapa de mi vida, a Paula por cada palabra de amor y compañía.

A mi pareja, por haber conocido la versión mas cansada, mas dudosa y mas humana de mi a lo largo de este proceso, y haber elegido ser parte de este camino juntos. Por escucharme, acompañarme y ser mi refugio en todo momento. Llegué hasta aquí, en parte, porque tú me demostraste que era posible.

Agradecimientos

A mi familia, por ser la certeza más constante que tuve durante este proceso. No siempre fue fácil, y ustedes lo saben mejor que nadie, porque estuvieron ahí cuando el camino se puso cuesta arriba. Gracias por no soltarme, por creer antes que yo, por cada bendición antes de cada examen, gracias por estar, por celebrar conmigo y recordarme, sin decirlo siempre con palabras, que no camino sola.

A mi director de tesis, Ing. Bernardo Feijoo, extendiendo mi más sincera gratitud, por acompañar este proceso con paciencia y criterio, y por orientarme en cada etapa. Su guía no solo estuvo presente en las recomendaciones o indicaciones técnicas, sino también en la forma de mirar el trabajo con rigor y con calma.

Al Ing. William Lituma, por recibirme en el laboratorio con disposición y generosidad. Gracias por tomarse el tiempo de explicarme cada procedimiento, por acompañarme en la ejecución de los ensayos y aportar con ese conocimiento práctico sin el cual esta investigación no habría tenido los mismos resultados. Su apoyo fue determinante en la parte más concreta y exigente de este trabajo.

A mi pareja, por celebrar cada uno de mis logros con una alegría y orgullo que a veces superó a la mía propia. Gracias por emocionarte con mis avances, por notar lo que yo ya daba por sentado y por recordarme, en los momentos de mayor agotamiento, que lo que estaba construyendo tenía valor. Compartir contigo cada etapa de este proceso hizo que todo valiera el doble.

A cada uno de mis compañeros y profesores de la Universidad del Azuay, que estuvieron a mi lado, que me ayudaron a estudiar, a devolverme la confianza de creer en mí, gracias por sus consejos y por compartirme sus conocimientos cuando más lo necesitaba. Fueron un pilar fundamental en todo este crecimiento profesional.

Finalmente, a mí misma. Por nunca rendirme cuando sí quise hacerlo. Por levantarme después de cada duda, cada desvelo y cada momento en que sentí que no era suficiente. Me agradezco por la constancia, por el esfuerzo sostenido en silencio y por haber recuperado, en el camino, la confianza que creí haber perdido. Hoy reconozco todo lo que he superado y valoro la persona en la que me he convertido durante este proceso. Este logro también es mío, fruto de mi dedicación y perseverancia.

Resumen

En la presente investigación se evaluó el desempeño mecánico y de durabilidad del hormigón alivianado mediante el reemplazo del agregado grueso y fino convencional por pómez grueso y polvo de pómez en diferentes porcentajes de sustitución. Se diseñaron ocho mezclas, incluyendo una de control, y se elaboraron 72 cilindros ensayados a 7, 14 y 28 días mediante resistencia a la compresión, resistencia a la tracción indirecta y absorción capilar. Los resultados evidenciaron reducciones de densidad de hasta el 44.1%, con caídas de resistencia más severas en las mezclas con reemplazo del agregado grueso que en las de agregado fino. La mezcla con reemplazo total de ambos agregados en proporción 60:40 presentó el mejor desempeño relativo del grupo, con una durabilidad capilar a 28 días equivalente a la del hormigón convencional. Todos los ensayos fueron realizados en el Laboratorio de Suelos de la Universidad del Azuay.

Palabras clave: HORMIGÓN ALIVIANADO, PESO ESPECÍFICO, PIEDRA PÓMEZ, AGREGADO GRUESO, DURABILIDAD, RESISTENCIA, ABSORCIÓN CAPILAR

Abstract

This study evaluated the mechanical performance and durability of lightweight concrete produced by replacing conventional coarse and fine aggregates with volcanic pumice and pumice powder at varying substitution percentages. Eight mix designs were developed, including a control mix, and 72 cylinders were tested at 7, 14, and 28 days for compressive strength, indirect tensile strength, and capillary water absorption. Results showed density reductions of up to 44.1%, with more severe strength losses in mixes where coarse aggregate was replaced than in those with fine aggregate substitution. The mix with total replacement of both aggregates in a 60:40 ratio showed the best relative performance, achieving a 28-day capillary absorption coefficient equivalent to that of conventional concrete. All tests were conducted at the Soils Laboratory of the Universidad del Azuay.

Keywords: LIGHTWEIGHT CONCRETE, PUMICE STONE, COMPRESSIVE STRENGTH, DENSITY, DURABILITY, CAPILLARY ABSORPTION.

Índice de contenidos

	i
Dedicatoria	ii
Agradecimientos	iii
Resumen	iv
Abstract	iv
Índice de contenidos	v
Índice de tablas	ix
Índice de figuras	xi
1. Introducción	1
1.1. Descripción del problema	3
1.2. Formulación del problema	4
1.2.1. Problema general	4
1.2.2. Problemas específicos	4
1.3. Justificación	4
1.4. Objetivos	6
1.4.1. Objetivo General	6
1.4.2. Objetivos Específicos	6
2. Marco Teórico	6
2.1. Hormigón Convencional	6
2.2. Hormigón Alivianado	7
2.2.1. Clasificación	8
2.2.2. Tipos de hormigón alivianados	8
2.2.3. Ventajas del hormigón alivianado	9
2.2.4. Desventajas del hormigón alivianado	9
2.2.5. Empleo y Propósito	9
2.3. Hormigón Alivianado: propiedades físicas y químicas	10

2.3.1.	Requisitos Estructurales _____	10
2.3.2.	Hormigón alivianado con piedra pómez _____	11
2.3.3.	Características de la piedra pómez _____	11
2.3.4.	Conductividad Térmica _____	12
2.3.6.	Resistencia al fuego _____	12
2.3.7.	Retracción _____	13
2.3.8.	Absorción de agua _____	13
2.3.9.	Durabilidad _____	13
2.3.10.	Módulo de Elasticidad _____	14
2.3.11.	Agua: amasado y curado _____	14
2.3.12.	Cemento Portland _____	15
2.3.13.	Análisis Granulométrico _____	15
2.4.	Módulo de Finura _____	16
2.5.	Curva Granulométrica _____	16
2.6.	Tamaño Máximo _____	16
2.7.	Tamaño Máximo Nominal _____	16
2.8.	Pesos Específicos _____	16
2.9.	Peso Volumétrico Suelto _____	17
2.10.	Estado del arte _____	17
2.11.	Conclusión del Estado del Arte _____	20
3.	Metodología _____	22
3.1.	Propiedades físicas de los materiales _____	23
3.1.1.	Pesos específicos _____	29
3.1.2.	Pesos Volumétricos _____	32
3.2.	Propiedades del cemento _____	34
3.3.	Caracterización morfológica de la piedra pómez _____	35
3.4.	Diseño y elaboración de las mezclas _____	36

3.5.	Diseño de mezclas	36
3.5.1.	Estimación del contenido de agua	37
3.5.2.	Estimación del tamaño máximo del agregado	37
3.5.3.	Estimación de contenido de aire	38
3.5.4.	Determinación de la resistencia de diseño	39
3.5.5.	Selección de la relación agua-cemento	39
3.5.6.	Cálculo de contenido de cemento	40
3.6.	Diseño de mezclas mediante el método gráfico	43
3.7.	Análisis de los diseños de mezcla mediante el método gráfico	53
3.8.	Cierre de la etapa de diseño de mezclas	55
3.9.	Fabricación y curado de cilindros	56
3.10.	Ensayo de resistencia a la compresión	56
3.12.	Ensayo de durabilidad: absorción de agua por capilaridad	57
3.13.	Equipos y materiales de laboratorio	58
4.	Resultados	62
4.1.	Resultados de caracterización de los agregados	62
4.2.	Resistencia a la compresión	63
4.3.	Resistencia a la tracción	68
4.4.	Ensayo de Durabilidad: absorción de agua por capilaridad	72
4.5.	Resultados a 7 días de curado	73
4.6.	Resultados a los 14 días de curado	77
4.7.	Resultados a los 28 días de curado	80
4.8.	Implicaciones de los resultados de absorción capilar frente a agentes agresivos del entorno	84
5.	Conclusiones	86
6.	Recomendaciones	88
7.	Anexos	89

Índice de tablas

Tabla 1. Descripción de metodología.....	22
Tabla 2. Granulometría Agregado Grueso: Grava Convencional	24
Tabla 3. Granulometría Agregado Fino: Arena Convencional.....	25
Tabla 4. Granulometría Agregado Grueso: Pómez Grueso	26
Tabla 5. Granulometría Agregado Fino: Polvo Pómez	27
Tabla 6. Resultados del ensayo de pesos específicos de los agregados	30
Tabla 7. Resultados del ensayo de pesos volumétricos de los agregados	33
Tabla 8. Propiedades Físicas del cemento hidráulico ATENAS tipo GU	34
Tabla 9. Pasos de procedimiento para diseño de mezclas	36
Tabla 10. Requerimiento aproximado de agua de mezclado para diferentes asentamientos y tamaños máximos de agregado, con partículas de forma angular y textura rugosa, e concreto sin aire incluido.....	37
Tabla 11. Cantidad aproximada de aire esperado en concreto sin aire incluido y niveles de aire incluido para diferentes tamaño máximos de agregado.....	38
Tabla 12. Resistencia requerida de diseño cuando no hay datos que permitan determinar la desviación estándar.....	39
Tabla 13. Correspondencia entre la resistencia a la compresión a los 28 días de edad y la relación agua-cemento para los cementos colombianos, portland tipo I, en concreto sin aire incluido.	40
Tabla 14. Dosificación Hormigón Convencional	41
Tabla 15. Dosificación Hormigón Alivianado	42
Tabla 16. Esquema de diseño de mezclas – Método Gráfico.....	44
Tabla 17. Método Gráfico mezcla de control	45
Tabla 18. Proporciones finales mezcla de control.....	46
Tabla 19. Método Gráfico Mezcla 2 Reemplazo parcial del agregado fino.....	46
Tabla 20. Proporciones finales Mezcla 2 Reemplazo Parcial del agregado fino.	47
Tabla 21. Método Gráfico Mezcla 3 Reemplazo total del agregado fino.....	47
Tabla 22. Proporciones Finales Mezcla 3 Reemplazo total del agregado fino.....	48
Tabla 23. Método Gráfico Mezcla 4 Reemplazo parcial del agregado grueso.....	48
Tabla 24. Proporciones finales Mezcla 4 Reemplazo parcial del agregado grueso	49
Tabla 25. Método Grafico Mezcla 5 Reemplazo total del agregado grueso	49
Tabla 26. Proporciones finales Mezcla 5 Reemplazo total del agregado grueso	50

Tabla 27. Método Gráfico Mezcla 6 Reemplazo parcial de los agregados grueso y fino	50
Tabla 28. Proporciones finales Mezcla 6 Reemplazo parcial del agregado grueso y fino.	51
Tabla 29. Método Gráfico Mezcla 7 Reemplazo total de los agregados grueso y fino..	51
Tabla 30. Proporciones finales Mezcla 7 Reemplazo total de los agregados.....	52
Tabla 31. Método Gráfico Mezcla 8 Reemplazo total de los agregados.....	52
Tabla 32. Proporciones finales Mezcla 8 reemplazo total de los agregados	53
Tabla 33. Tabla resumen de las propiedades físicas de los agregados analizados	63
Tabla 34. Resistencia a la compresión por mezcla a los 7,14 y 28 días	63
Tabla 35. Resistencia a la tracción indirecta a los 7,14,28 días por mezcla.....	69
Tabla 36. Ensayo de durabilidad de las 8 mezclas estudiadas 7 días de curado	73
Tabla 37. Ensayo de durabilidad de las 8 mezclas estudiadas 14 días de curado	77
Tabla 38. Ensayo de durabilidad de las 8 mezclas estudiadas 28 días de curado	81

Índice de figuras

Figura 1. Curva Granulométrica Agregado Grava	24
Figura 2. Curva Granulométrica Agregado Fino: Arena Convencional.....	25
Figura 3. Curva Granulométrica Agregado Grueso: Pómez Grueso	26
Figura 4. Curva Granulométrica Agregado Fino: Polvo Pómez	27
Figura 5. Selección de materiales para el ensayo de granulometría	28
Figura 6. Pesaje de la muestra inicial previo al análisis granulométrico.....	28
Figura 7. Fracciones retenidas por tamiz de la arena convencional durante el análisis granulométrico.....	28
Figura 8. Muestra de arena convencional S.S.S lista para ensayo de peso específico ...	29
Figura 9. Muestra de polvo pómez S.S.S lista para ensayo de peso específico.	29
Figura 10. Pesaje del matraz con agua y muestra durante el ensayo de peso específico de arena convencional.	31
Figura 11. Pesaje del matraz con agua y muestra durante el ensayo de peso específico del polvo pómez.	31
Figura 12. Saturación de la piedra pómez gruesa y polvo pómez durante 24 horas previo al ensayo de peso específico.....	32
Figura 13. Medición de temperatura del agua durante el ensayo de peso específico del agregado grueso (ASTM C127).	32
Figura 14. Observación microscópica del polvo pómez.....	35
Figura 15. Observación microscópica de la piedra pómez.....	35
Figura 16. Curva Granulométrica Mezcla de control	45
Figura 17. Curva Granulométrica Mezcla 2 Reemplazo Parcial del agregado fino	46
Figura 18. Curva Granulométrica Mezcla 3 Reemplazo total del agregado fino	47
Figura 19. Curva Granulométrica Mezcla 4 Reemplazo parcial del agregado grueso ...	48
Figura 20. Curva Granulométrica Mezcla 5 Reemplazo total del agregado grueso	49
Figura 21. Curva Granulométrica Mezcla 6 Reemplazo parcial del agregado grueso y fino	50
Figura 22. Curva Granulométrica Mezcla 7 Reemplazo total de los agregados	51
Figura 23. Curva Granulométrica Mezcla 8 Reemplazo total de los agregados	52
Figura 24. Cilindros de hormigón recién elaborados en moldes metálicos, previo al proceso de curado.	56
Figura 25. Máquina de ensayo Resistencia a la Compresión	58

Figura 26. Máquina de ensayo Resistencia a la Tracción.....	59
Figura 27. Balanza de pesaje de probetas grandes	59
Figura 28. Balanza analítica con precisión de 0.01 g	60
Figura 29. Horno de secado Humbolt.....	60
Figura 31. Recipiente utilizado en el ensayo de durabilidad.....	61
Figura 30. Concretera para la elaboración del mezclado.....	61
Figura 32. Microscopio utilizado para la caracterización morfológica de la piedra pómez	61
Figura 33. Comparativa de evolución de Resistencia a la Compresión de las 8 mezclas.	63
Figura 34. Resistencia a la Compresión de la mezcla de control a diferentes edades....	64
Figura 35. Resistencia a la Compresión M1-M8 a los 7 días de curado	65
Figura 36. Resistencia a la Compresión M1-M8 a los 14 días de curado.	65
Figura 37. Resistencia a la Compresión M1-M8 a los 28 días de curado.	66
Figura 38. Comparación de pesos de todas las mezclas estudiadas (M1-M8)	67
Figura 39. Comparativa de evolución de la Resistencia a la tracción de las 8 mezclas .	69
Figura 40. Resistencia a la Tracción M1-M8 a los 7 días de curado.....	70
Figura 41. Resistencia a la Tracción M1-M8 a los 14 días de curado.....	70
Figura 42. Resistencia a la Tracción M1-M8 a los 28 días de curado.....	71
Figura 43. Curva de absorción de agua por capilaridad a los 7 días de curado (M1)	74
Figura 44. Curva de absorción de agua por capilaridad a los 7 días de curado (M2)	74
Figura 45. Curva de absorción de agua por capilaridad a los 7 días de curado (M3)	74
Figura 46. Curva de absorción de agua por capilaridad a los 7 días de curado (M4)	75
Figura 47. Curva de absorción de agua por capilaridad a los 7 días de curado (M5)	75
Figura 48. Curva de absorción de agua por capilaridad a los 7 días de curado (M6)	75
Figura 49. Curva de absorción de agua por capilaridad a los 7 días de curado (M7)	76
Figura 50. Curva de absorción de agua por capilaridad a los 7 días de curado (M8)	76
Figura 51. Curva de absorción de agua por capilaridad a los 14 días de curado (M1) ..	77
Figura 52. Curva de absorción de agua por capilaridad a los 14 días de curado (M3) ..	78
Figura 53. Curva de absorción de agua por capilaridad a los 14 días de curado (M2) ..	78
Figura 54. Curva de absorción de agua por capilaridad a los 14 días de curado (M4) ..	78
Figura 55. Curva de absorción de agua por capilaridad a los 14 días de curado (M5) ..	79
Figura 56. Curva de absorción de agua por capilaridad a los 14 días de curado (M6) ..	79
Figura 57. Curva de absorción de agua por capilaridad a los 14 días de curado (M7) ..	79

Figura 58. Curva de absorción de agua por capilaridad a los 14 días de curado (M8) ..	80
Figura 59. Curva de absorción de agua por capilaridad a los 14 días de curado (M1) ..	81
Figura 60. Curva de absorción de agua por capilaridad a los 14 días de curado (M2) ..	81
Figura 61. Curva de absorción de agua por capilaridad a los 14 días de curado (M3) ..	82
Figura 62. Curva de absorción de agua por capilaridad a los 14 días de curado (M4) ..	82
Figura 63. Curva de absorción de agua por capilaridad a los 14 días de curado (M5) ..	82
Figura 64. Curva de absorción de agua por capilaridad a los 14 días de curado (M6) ..	83
Figura 65. Curva de absorción de agua por capilaridad a los 14 días de curado (M7) ..	83
Figura 66. Curva de absorción de agua por capilaridad a los 14 días de curado (M8) ..	83
Figura 67. Preparación de los moldes cilindros para el vertido de la mezcla.....	89
Figura 68. Pesaje de los agregados previo al mezclado.	89
Figura 69. Mezclado de las diferentes dosificaciones mediante el uso de la concretera.	90
Figura 70. Endurecido de los cilindros durante 24 horas.	90
Figura 71. Cilindros de la Mezcla de control M1 previo al ensayo de compresión, tracción y durabilidad, tras ser extraído del tanque de curado por inmersión de agua.....	91
Figura 72. Cilindros de la Mezcla 2 previo al ensayo de compresión, tracción y durabilidad, tras ser extraído del tanque de curado por inmersión de agua.....	91
Figura 73. Cilindros de la Mezcla 3 previo al ensayo de compresión, tracción y durabilidad, tras ser extraído del tanque de curado por inmersión de agua.....	92
Figura 74. Cilindros de la Mezcla 4 previo al ensayo de compresión, tracción y durabilidad, tras ser extraído del tanque de curado por inmersión de agua.....	92
Figura 75. Cilindros de la Mezcla 5 previo al ensayo de compresión, tracción y durabilidad, tras ser extraído del tanque de curado por inmersión de agua.....	93
Figura 76. Cilindros de la Mezcla 6 previo al ensayo de compresión, tracción y durabilidad, tras ser extraído del tanque de curado por inmersión de agua.....	93
Figura 77. Cilindros de la Mezcla 7 previo al ensayo de compresión, tracción y durabilidad, tras ser extraído del tanque de curado por inmersión de agua.....	94
Figura 78. Cilindros de la Mezcla 7 previo al ensayo de compresión, tracción y durabilidad, tras ser extraído del tanque de curado por inmersión de agua.....	94
Figura 79. Rotura del cilindro mediante el Ensayo a Compresión.....	95
Figura 80. Rotura del cilindro mediante el Ensayo de Tracción indirecta	95
Figura 81. Cilindros Mezcla 7 finalizado el ensayo de durabilidad: absorción de agua hasta obtener masa constante.....	96

1. Introducción

A lo largo de la historia, el hormigón pasó de las mezclas puzolánicas romanas a los hormigones contemporáneos de cemento Portland, consolidándose como el material estructural más empleado en la construcción moderna. Sin embargo, este desarrollo se ha apoyado en su mayoría en áridos naturales densos, dando lugar a hormigones de elevada densidad que incrementan las cargas muertas, condicionan el diseño de cimentaciones y elementos sísmicos, y contribuyen al elevado consumo de cemento, responsable de las emisiones globales de CO₂. Frente a este escenario, los hormigones estructurales alivianados se proponen como una alternativa capaz de reducir el peso propio de los elementos sin dejar de lado su aptitud estructural, y, por ende, mitigar la acción sísmica que depende de la masa. Los hormigones alivianados están compuestos de materiales que poseen características particulares, los cuales son capaces de reducir notablemente su peso y densidad, logrando aligerar el hormigón, sin arriesgar su resistencia y logrando su viabilidad técnica como material de construcción.

En la actualidad, la industria de la construcción enfrenta el desafío de desarrollar materiales que no solo cumplan con los requisitos estructurales tradicionales, sino que además contribuyan a la reducción del impacto ambiental, optimicen el consumo de recursos naturales y mejoren el desempeño funcional de las estructuras. Dicho esto, el hormigón, como material predominante en obras civiles, ha sido objeto de múltiples investigaciones orientadas a mejorar sus propiedades físicas, mecánicas y de durabilidad mediante la incorporación de materiales alternativos y de origen natural.

Uno de los enfoques más relevantes en el desarrollo de nuevos materiales es el uso del hormigón alivianado, mediante el cual, se obtiene principalmente mediante el reemplazo total o parcial de los agregados convencionales por agregados livianos, los cuales presentan una estructura interna altamente porosa. Entre estos materiales, la piedra pómez destaca por ser un recurso natural de origen volcánico, abundante en varias regiones del país, de baja densidad, alta porosidad y buenas propiedades térmicas y acústicas. Estas características la convierten en un material con alto potencial para ser utilizado como agregado grueso y fino en la elaboración de hormigones livianos.

Diversas investigaciones como (Ahmed y Basher, 2023); (Parhizkar et al., 2012); (Gaus et al., 2022); han demostrado que la incorporación de piedra pómez en mezclas de hormigón permite reducir considerablemente la densidad del material, mejorando propiedades como el aislamiento térmico y la resistencia al fuego. Sin embargo, esta sustitución puede influir de manera directa en el comportamiento mecánico del hormigón, especialmente en la resistencia a la compresión, la resistencia a la flexión y el módulo de elasticidad, debido a la menor rigidez y resistencia intrínseca del agregado liviano en comparación con los agregados convencionales.

Además del desempeño mecánico, la durabilidad del hormigón alivianado constituye un aspecto crítico para su aplicación estructural. La alta porosidad de la piedra pómez puede incrementar la absorción de agua y la permeabilidad del hormigón, afectando su comportamiento frente a agentes agresivos, ciclos de humedad-sequedad, ataque químico y procesos de degradación al paso del tiempo. Por ello, resulta fundamental evaluar de manera integral cómo el reemplazo del agregado grueso y fino por piedra pómez incide tanto en las propiedades resistentes como en los parámetros asociados a la durabilidad del material.

A pesar de los avances reportados en estudios previos, aún existe la necesidad de establecer criterios claros sobre los porcentajes óptimos de sustitución del agregado convencional por piedra pómez, que permitan lograr un balance adecuado entre reducción de peso, resistencia mecánica y durabilidad. Esta necesidad se vuelve más relevante considerando las condiciones locales de los materiales disponibles y las exigencias normativas aplicables al diseño y construcción de estructuras de hormigón.

En este sentido, la presente investigación tiene como objetivo la evaluación del desempeño mecánico y de durabilidad del hormigón alivianado mediante el reemplazo del agregado grueso y fino por piedra pómez, analizando su influencia en propiedades fundamentales como la resistencia a la compresión, la resistencia a la tracción y durabilidad por absorción capilar, parámetros relevantes para su comportamiento en servicio. Los resultados de este estudio buscan aportar información técnica que contribuya al desarrollo y aplicación eficiente del hormigón alivianado, promoviendo el uso de materiales alternativos sostenibles y fortaleciendo el conocimiento sobre su comportamiento estructural.

1.1. Descripción del problema

En el diseño y construcción de estructuras de hormigón, uno de los principales inconvenientes técnicos es el elevado peso propio de los elementos estructurales, el cual influye directamente en la magnitud de las cargas que deben ser resistidas por la estructura y la cimentación. Esta condición genera mayores demandas estructurales, incrementa el consumo de materiales y puede afectar el comportamiento de las edificaciones, especialmente en zonas donde las acciones sísmicas representan un factor determinante de diseño.

Frente a esta situación, se ha incrementado el interés por el empleo de materiales de menor densidad que permitan optimizar el desempeño estructural sin comprometer la seguridad. Dentro de estas alternativas, el uso de agregados livianos naturales ha demostrado ser una opción a tomar en cuenta. Sin embargo, su incorporación en mezclas de hormigón requiere un control riguroso debido a las variaciones que pueden producirse en las propiedades del material resultante.

La piedra pómez, al presentar una estructura altamente porosa y una baja masa específica, cambia de forma significativa el comportamiento del hormigón cuando se utiliza como reemplazo de los agregados convencionales. Estas modificaciones pueden reflejarse en una disminución de la resistencia mecánica, cambios en la trabajabilidad de la mezcla y una mayor susceptibilidad a la absorción de agua, lo cual podría afectar el desempeño del hormigón frente a condiciones ambientales adversas y reducir su vida útil si no se establecen parámetros adecuados de dosificación.

Asimismo, la mayor parte de las aplicaciones prácticas del hormigón alivianado con piedra pómez se ha realizado sin una evaluación integral que considere simultáneamente las propiedades resistentes y los aspectos relacionados con la durabilidad del material. En muchos casos, las decisiones de diseño se basan en criterios empíricos o en resultados parciales, lo que limita la confiabilidad del material para usos estructurales y restringe su implementación a elementos no portantes.

Adicionalmente, la variabilidad en las características físicas de la piedra pómez, asociada a su origen volcánico y a los procesos de extracción y procesamiento, introduce incertidumbre en el comportamiento del hormigón elaborado con este agregado. Esta falta de información técnica específica dificulta la definición de porcentajes de sustitución

óptimos del agregado grueso y fino que permitan garantizar un desempeño adecuado tanto en términos mecánicos como de durabilidad.

En consecuencia, se identifica la necesidad de analizar de manera sistemática el comportamiento del hormigón alivianado, con el fin de evaluar su desempeño mecánico y su respuesta frente a factores que influyen en la durabilidad. La ausencia de estudios que integren estos aspectos de forma conjunta constituye el problema central de la presente investigación.

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Problema general

- ¿De qué manera el reemplazo del agregado grueso y fino por piedra pómez influye en el desempeño mecánico y de durabilidad del hormigón alivianado?

1.2.2. Problemas específicos

- ¿Cómo incide la sustitución del agregado grueso por piedra pómez en la resistencia mecánica del hormigón alivianado?
- ¿Cuál es el efecto del reemplazo del agregado fino por piedra pómez en las propiedades de durabilidad del hormigón?
- ¿Qué comportamiento presenta el hormigón alivianado cuando se reemplazan simultáneamente el agregado grueso y fino por piedra pómez en diferentes porcentajes?
- ¿Es técnicamente viable el uso de piedra pómez como agregado alternativo en la producción de hormigón alivianado para aplicaciones estructurales?

1.3. Justificación

El desarrollo de esta investigación surge ante la necesidad de profundizar en el conocimiento del comportamiento del hormigón alivianado elaborado mediante el reemplazo del agregado grueso y fino por piedra pómez, considerando que la reducción del peso propio de los elementos estructurales constituye un aspecto clave en la optimización del diseño y desempeño de las estructuras. La ausencia de criterios técnicos definidos que permitan evaluar de manera conjunta las propiedades mecánicas y de

durabilidad del hormigón con agregados livianos limita su aplicación en elementos estructurales, haciendo necesario un análisis experimental que permita establecer parámetros confiables para su uso.

El empleo de piedra pómez, debido a su origen natural y a sus características físicas particulares, introduce variaciones significativas en el comportamiento del hormigón, las cuales deben ser evaluadas de forma sistemática para garantizar un desempeño adecuado frente a las sollicitaciones mecánicas y las condiciones ambientales. Analizar estos efectos contribuye a generar información técnica que permita comprender la relación entre la sustitución de los agregados convencionales y la respuesta del material, aportando al desarrollo de soluciones constructivas más eficientes y seguras.

Asimismo, la disponibilidad local de la piedra pómez y su potencial como material alternativo representan una oportunidad para optimizar el uso de recursos naturales, reducir la dependencia de agregados tradicionales y disminuir el impacto ambiental asociado a su explotación y transporte. La aplicación de hormigón alivianado con agregados livianos puede favorecer la reducción de cargas muertas, mejorar el comportamiento estructural en zonas sísmicas y contribuir a una construcción más sostenible, alineada con las necesidades actuales del sector de la ingeniería civil.

Los resultados de esta investigación permitirán contar con información técnica que sirva de apoyo para futuras aplicaciones del hormigón alivianado en obras civiles, así como para el desarrollo de investigaciones posteriores orientadas a mejorar el desempeño y la durabilidad de materiales de construcción alternativos, fortaleciendo el conocimiento técnico y científico en el ámbito del hormigón liviano.

Establecer las proporciones de los distintos componentes para la elaboración de una mezcla de hormigón ligero que satisfaga las condiciones de favorabilidad, que sea homogéneo, que sea duradero, que tenga una cohesión y una consistencia adecuadas y alcance las resistencias características esperadas.

Por esta razón, los componentes que conforman el hormigón, fundamentalmente los áridos ligeros, sus proporciones y el procedimiento de preparación para el mezclado, deben ser estudiados con anterioridad detalladamente a fin de obtener un tipo de hormigón aligerado que posea las propiedades y características mecánicas

deseadas para ser utilizados con los fines y exigencias para lo cual se ha creado.

El hormigón de piedra pómez puede ayudar a ciudades de la sierra donde existe mayor cantidad de canteras con este material, lo cual significaría un ahorro al momento de construir puesto a que obtendrían los agregados de un mismo lugar.

Debido a que es una tecnología prácticamente nueva no se encontró normas por lo que se trabajara por medio de dosificaciones. Con la culminación del trabajo se establecerá una metodología para obtener una mezcla óptima para la fabricación de hormigones ligeros utilizando como agregados: cemento, piedra pómez triturada (agregado grueso y agregado fino) y agua.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

- Evaluar el desempeño mecánico y de durabilidad del hormigón alivianado con reemplazo del agregado grueso y fino por piedra pómez en diferentes porcentajes de sustitución, para determinar su viabilidad técnica como material de construcción.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar físicamente la piedra pómez (gruesa y fina): granulometría, densidad, absorción y peso unitario.
- Analizar la influencia de la sustitución de piedra pómez en propiedades mecánicas del hormigón como agregado grueso y fino mediante un análisis comparativo con la mezcla de control.
- Determinar la influencia de la incorporación de piedra pómez en la durabilidad del hormigón, mediante ensayos de absorción y permeabilidad para establecer su potencial aplicación en obras civiles.

2. Marco Teórico

2.1. Hormigón Convencional

El hormigón convencional es uno de los materiales más utilizados en la construcción por su facilidad de moldeo y su relación costo–beneficio. Se obtiene la mayor resistencia en cuanto a trabajabilidad al pasar el tiempo, su comportamiento depende de la correlación

entre sus componentes como el cemento, agua y agregados. Para su dosificación los factores a tomar en cuenta son: trabajabilidad, consistencia, resistencia y durabilidad.

Una forma práctica de diferenciar el hormigón convencional frente a otros tipos es mediante su densidad. Se presenta la clasificación por densidades, indicando que el hormigón de áridos normales se sitúa típicamente entre 2300 y 2500 kg/m³. (ACI 213R-03, 2003).

Podemos decir que el alto peso propio del hormigón convencional se puede convertir en una desventaja cuando la carga muerta gobierna el diseño, por ejemplo: las losas y edificios, puentes, parqueaderos o estructuras donde el peso incrementa demandas en vigas, columnas y cimentación.

En el desempeño del hormigón convencional, la relación agua-cemento es determinante porque controla la porosidad de la pasta endurecida y, por tanto, influye en la trabajabilidad y durabilidad. (Loaiza, 2015) define la permeabilidad como la capacidad del hormigón de no permitir el ingreso de líquidos y gases, indicando que la relación entre agua añadida y cemento es el factor que más influye: al aumentar la relación agua-cemento, aumenta la permeabilidad y con ello la posibilidad de penetración de elementos dañinos.

2.2. Hormigón Alivianado

El uso del hormigón alivianado va creciendo a la par con los avances tecnológicos, este viene de una familia de hormigones cuyo rasgo distintivo es la reducción de densidad respecto al hormigón convencional, optimizando de esa manera el diseño estructural, reduciendo la carga muerta y a su vez las secciones de columnas, zapatas y cimentaciones, esto se logra principalmente mediante el uso de agregados de baja densidad, reuniendo cualidades apreciables de ligereza, económicas y aislantes.

Su clasificación suele considerar simultáneamente la densidad y el nivel de resistencia alcanzado; La norma (ACI 213R-03, 2003) reporta umbrales típicos de uso estructural una densidad en el rango 1440–1840 kg/m³ y una resistencia mínima aproximada de 17.2 MPa a 28 días.

La presencia de vacíos entre las partículas del agregado grueso, ocasiona la disminución de la densidad en este tipo de hormigón. Al existir estos vacíos, provoca una disminución

en la resistencia del hormigón, también debido a su morfología vesicular, van a tender a absorber agua más de lo que lo haría un agregado convencional, lo cual llega a ser una condición importante para estos hormigones, ya que la resistencia se llega a sacrificar en muchos casos.

En la construcción, el peso propio del hormigón representa una gran proporción en la carga total de la estructura, reducir la densidad de esta, sería beneficioso en términos constructivos y de seguridad, ya que ayuda a mitigar la acción sísmica.

2.2.1. Clasificación

Para el propósito que tenga el hormigón alivianado se emplea en: (Valdéz et al., 2010)

- Hormigón de Relleno: Posee una resistencia menor que un hormigón estructural, se usa principalmente para llenar espacios o cavidades, nivelar o dar volumen.
- Hormigón Aislante: Diseñado para aislar térmica y acústicamente, posee una baja resistencia a la compresión y menor densidad que el hormigón convencional.
- Hormigón Estructural: Se encuentran en función de una resistencia mínima, cuya masa por unidad de volumen del material seco, por lo general no sobrepasa los 1840 kg/m³.

2.2.2. Tipos de hormigón alivianados

Su tipo de producción se clasifica en tres maneras: (Valdéz et al., 2010)

- Hormigón de agregado liviano: Uso de agregados livianos de alta porosidad y baja densidad, de origen natural o artificial.
- Hormigón celular: Introducción de vacíos dentro del hormigón.
- Hormigón sin agregado fino: No se utiliza el agregado fino, por la presencia de vacíos intersticiales.

Podemos decir que todas las investigaciones que se han realizado para la fabricación de hormigones alivianados, no se han incluido del todo en el ámbito profesional o constructivo. El objetivo del estudio es difundir los hallazgos, para exponer como se usan típicamente los hormigones alivianados.

2.2.3. Ventajas del hormigón alivianado

La producción de este tipo de hormigón presenta características físicas y químicas que se generan por la adición de agregados ligeros o el tipo de mezcla, por esto existen varias ventajas a tomar en cuenta para su utilización: (Valdéz et al., 2010)

- Permite reducir el peso propio de los elementos estructurales y cargas en la cimentación.
- Ahorro importante en el consumo de energía eléctrica.
- Baja densidad.
- Es capaz de comportarse como un aislante térmico y acústico.
- Baja densidad, importante para la aplicación constructiva en zonas de alta demanda sísmica.
- Su colocación y acabado son más económicos.
- Mayor resistencia al fuego que el hormigón convencional.
- Excelente trabajabilidad.

2.2.4. Desventajas del hormigón alivianado

- No son resistentes a la abrasión.
- Posee un módulo de elasticidad bajo, lo que puede producir mayores deformaciones que las del hormigón convencional.
- Los agregados ligeros son altamente absorbentes de agua.
- Se obtienen resistencias elevadas con la adición de grandes cantidades de cemento. Existe la posibilidad de necesitarse hasta un 70% más que con hormigones convencionales.
- Se requiere de un meticuloso control, ya que las propiedades del hormigón se ven afectadas por el contenido de cemento, la relación agua/cemento y los agregados ligeros.
- La ubicación y transportación de los agregados ligeros, requiere de un cuidadoso estudio y de encontrar un lugar que ofrezcan materiales de alta calidad.

2.2.5. Empleo y Propósito

Para realizar este tipo de hormigón es importante el diseño de mezcla que se utilice y el tipo de agregados que empleemos en la mezcla para su elaboración. Entre los usos está la

fabricación de elementos estructurales que necesitan reducir el peso propio y por consiguiente la carga muerta, elementos estructurales de relleno para soportar cargas estructurales, en obras donde su característica principal sea un aislante térmico, construcción de zonas residenciales, casas, edificios en zonas de altas sismicidad, puentes, hormigonado de capas de losas y pisos, incluyendo muros de carga y sin carga. (Valdéz et al., 2010)

2.3. Hormigón Alivianado: propiedades físicas y químicas

Las propiedades físicas y químicas del hormigón ligero dependen directamente de los agregados seleccionados y de las proporciones utilizadas en el diseño de la mezcla. Estas particularidades deben ser evaluadas de manera meticulosa, de tal manera que, podamos determinar cómo se comporta el material estructuralmente y frente al entorno. (Valdéz et al., 2010).

2.3.1. Requisitos Estructurales

La resistencia es una condición indispensable al fabricar elementos estructurales. El empleo del hormigón alivianado en la construcción tiene como objetivo principal, la reducción de la carga muerta de la estructura, como consecuencia de esto, permite que el diseñador reduzca dimensiones en columnas, zapatas y otros elementos que se sometan a carga.

Aunque el hormigón destaca frente a otros materiales por su extensa vida útil, alcanzar esta longevidad requiere de un control estricto durante su preparación. De esta forma, se garantiza que el material cumpla con los estándares de calidad del proyecto, soporte las cargas de diseño y resista las condiciones ambientales adversas del entorno.

Las propiedades mecánicas a evaluar serán; la resistencia a la compresión, a la tracción, y ensayo de durabilidad. Estos parámetros se determinan mediante una máquina de ensayos, en la cual se someten a presión cilindros de prueba tras 7,14 y 28 días de curado.

Durante la preparación del hormigón, es vital regular detalladamente la dosificación de agua y cemento. Alcanzar un equilibrio óptimo en esta proporción permite que el material cumpla con los niveles de resistencia requeridos y tolere la agresividad del entorno. El control riguroso de estos parámetros es clave para asegurar una durabilidad prolongada y satisfactoria de la estructura.

El hormigón ligero en construcciones como edificios garantiza una mayor resistencia al fuego, además al usar piedra pómez como material principal para alivianar el hormigón, debido a su alta porosidad funciona como un depósito de humedad, lo que ayuda para el curado interno del hormigón y favorece el incremento constante de su resistencia y durabilidad. (Valdéz et al., 2010)

2.3.2. Hormigón alivianado con piedra pómez

Dentro de los agregados livianos naturales, la piedra pómez destaca por su origen volcánico y por su estructura vesicular, la cual le otorga una baja densidad y una elevada porosidad. Estas características permiten reducir el peso propio del hormigón cuando se emplea como reemplazo parcial o total de los agregados convencionales; sin embargo, también modifican el comportamiento de la mezcla en estado fresco y endurecido.

De acuerdo con (ACI 213R-03, 2003), los agregados livianos presentan una estructura interna porosa que les permite absorber mayores cantidades de agua que los agregados convencionales. Por esta razón, el control de humedad y la pre-humectación del agregado son aspectos importantes antes del mezclado, ya que la piedra pómez puede absorber parte del agua de amasado y alterar la relación agua-cemento efectiva, afectando la trabajabilidad, la resistencia y la durabilidad del hormigón.

En investigaciones similares, (Parhizkar et al., 2012) y (Ahmed y Basher, 2023) señalan que el uso de piedra pómez permite obtener hormigones de menor densidad; no obstante, el incremento del porcentaje de reemplazo de los agregados puede disminuir la resistencia mecánica si no se controla adecuadamente la dosificación, el contenido de cemento y la humedad del agregado. De igual forma, (Loaiza, 2015) destaca la importancia de humedecer previamente la piedra pómez para reducir la pérdida de agua durante el mezclado y mejorar el comportamiento de la mezcla.

Por tanto, el empleo de piedra pómez en hormigones alivianados representa una alternativa viable para disminuir la densidad del material, siempre que se realice una adecuada caracterización física del agregado y se controle cuidadosamente la absorción de agua durante el diseño y elaboración de la mezcla.

2.3.3. Características de la piedra pómez

La piedra pómez proviene de una roca ígnea volcánica, su principal característica es su alta porosidad, ya que contiene numerosas cavidades o vesículas generadas por burbujas

de gas atrapadas en la lava, lo que otorga una densidad muy baja y permite incluso que flote en el agua. Presenta colores claros como blanco o gris debido a su alto contenido sílice. Además, posee una textura áspera y abrasiva, buena capacidad de aislamiento térmico y acústico, y gran resistencia química. (Valdéz et al., 2010)

2.3.4. Conductividad Térmica

La piedra pómez se caracteriza por presentar gran capacidad de aislamiento térmico. Para la regulación de temperatura y eficiencia, gracias a su alta porosidad, los hormigones ligeros atrapan importantes volúmenes de aire en su interior, lo que reduce su densidad y les otorga excelentes propiedades térmicas.

Su baja conductividad minimiza las alteraciones físicas causadas por los cambios de temperatura y contribuye significativamente a la eficiencia energética de las edificaciones, ya que reduce la dependencia de sistemas de climatización artificial para conservar el confort interior (Loaiza, 2015).

2.3.5. Aislante Acústico

El aumento de la población, junto con la demanda vehicular han provocado contaminación acústica en el entorno. En la construcción, fabricar estructuras alivianadas gracias a la presencia de cavidades de aire en su composición dota a estos hormigones a controlar el ruido ambiental. Al ofrecer una alta resistencia a la propagación del sonido y amortiguar las vibraciones, resultan un material ideal para la fabricación de paneles y elementos de cubierta en edificios.

En los entornos urbanos modernos, el exceso de ruido ambiental suele interferir negativamente con la calidad de vida y el desarrollo de actividades diarias como el descanso o el estudio. Ante esto, el uso de estructuras aligeradas se presenta como una solución práctica; su capacidad para absorber los sonidos molestos favorece la creación de espacios interiores mucho más tranquilos y habitables (Loaiza, 2015).

2.3.6. Resistencia al fuego

Una de las características del hormigón alivianado es que tiene la capacidad de resistir de mejor manera y mantener sus propiedades físicas frente al fuego, gracias a su configuración interna particular. Su tolerancia térmica supera a la de los hormigones convencionales elaborados con áridos silíceos, ya que presenta una menor tendencia al desprendimiento o astillamiento al ser expuesto a altas temperaturas (Loaiza, 2015).

2.3.7. Retracción

El proceso de retracción en los hormigones ligeros suele ser el doble en comparación con el hormigón tradicional. Esto se debe a que su alta porosidad demanda una mayor cantidad de agua durante el mezclado, lo que a su vez incrementa su capacidad de deformación ante las tensiones internas. Para compensar este fenómeno, es fundamental realizar una selección minuciosa de los áridos. Adicionalmente, para evitar un endurecimiento demasiado acelerado que potencie la contracción del material, se recomienda mantener la mezcla bajo un proceso de hidratación o curado constante (Loaiza, 2015).

2.3.8. Absorción de agua

Por lo general, este indicador se evalúa calculando el porcentaje de agua en función del volumen aparente del material, ya que el peso específico de los hormigones aligerados presenta grandes variaciones. Mientras que en los hormigones tradicionales este valor oscila entre el 7,5 % y el 23 %, en los ligeros se sitúa en un rango mayor, del 18 % al 30 %.

La cantidad de humedad retenida en las cavidades porosas está estrechamente ligada al desgaste estructural, especialmente cuando el material se somete a ciclos de congelación. En consecuencia, se establece un vínculo directo y proporcional entre la capacidad de absorción de agua del hormigón y su vida útil. (Valdéz et al., 2010).

2.3.9. Durabilidad

La durabilidad estructural se define como la capacidad que tiene una estructura para resistir, todo el tiempo para el que fue diseñada, las diversas condiciones del entorno. Esto implica soportar factores de desgaste químicos y físicos que no están relacionados con las cargas o tensiones calculadas en el diseño estructural original.

La integridad del hormigón puede verse comprometida por múltiples factores externos e internos, entre los cuales destacan:

- Daños derivados de un uso incorrecto, golpes o impactos directos sobre la estructura.
- Alteraciones causadas fundamentalmente por los cambios de temperatura o acciones térmicas.

- Desgaste provocado por la acción de microorganismos como bacterias, hongos, algas y musgos.
- Exposición a elementos corrosivos como ácidos, sulfatos, compuestos alcalinos, aguas con un pH menor a 5 o fluidos que contengan burbujas de gas.
- Fenómenos que alteran directamente la matriz del material, siendo la corrosión de las armaduras uno de los más críticos en el caso del hormigón reforzado.

Dado que el deterioro de las estructuras de hormigón armado es un proceso natural con el paso del tiempo, es indispensable aplicar medidas preventivas y correctivas en cada una de las etapas del proyecto. Solo a través de esta gestión integral se puede asegurar que la obra alcance la durabilidad proyectada. (Valdéz et al., 2010).

2.3.10. Módulo de Elasticidad

El módulo de elasticidad en los hormigones ligeros estructurales, son en cierto grado bajos, ya que se relaciona únicamente con el tipo de árido que tenga el hormigón. (ACI 213R-03, 2003)

2.3.11. Agua: amasado y curado

El agua es un elemento indispensable en la formulación del hormigón estructural, representando entre un 10 % y un 25 % del volumen total de la mezcla, según el diseño utilizado. Su incorporación tiene dos propósitos esenciales: primero, hidratar el cemento para desencadenar el proceso químico de fraguado; y segundo, otorgar la fluidez y trabajabilidad necesarias para su correcta colocación en obra. Al unirse con el cemento, genera una pasta aglomerante que cohesiona los áridos y define las propiedades mecánicas del material (Kosmatka et al., 2004).

El cálculo riguroso de la cantidad de agua es crítico. El exceso de agua provoca que, al evaporarse, se formen vacíos y redes capilares internas que merman drásticamente la resistencia del hormigón. Por el contrario, un déficit de agua produce una mezcla seca, poco trabajable y difícil de compactar. Además, la adherencia que se obtiene entre la mezcla y los agregados es mayor a la de los hormigones convencionales, por lo tanto, hay que ser más cuidadosos al momento hacer la mezcla. (Loaiza, 2015).

El proceso de curado de los hormigones alivianados proporciona una provisión de agua que ayuda al aumento de resistencia y de la vida útil del hormigón, ya que tendrá un curado interno por sus cavidades altamente porosas.

2.3.12. Cemento Portland

El cemento actúa como el aglutinante fundamental en la construcción, encargado de cohesionar el resto de los componentes de la mezcla. Su estructura base está conformada por caliza, sílice y alúmina. El proceso de producción inicia con la trituración de estas materias primas, seguida de una calcinación en hornos industriales a temperaturas que oscilan entre los 1300°C y 1400°C. Este tratamiento térmico da origen al clinker, el cual, al ser molido conjuntamente con yeso y otros aditivos químicos, produce el cemento final. Este material tiene la capacidad de reaccionar químicamente con el agua para iniciar su proceso de fraguado y endurecimiento. Su uso es universal en las edificaciones modernas debido a su excelente durabilidad y su alta capacidad para soportar esfuerzos de compresión (Kosmatka et al., 2004).

2.3.13. Análisis Granulométrico

Este procedimiento tiene como finalidad clasificar las partículas del árido en función de su tamaño. Mediante el uso de un sistema de tamizado, es posible calcular de forma precisa tanto los porcentajes de material retenido de manera individual y acumulada como los porcentajes pasantes en cada malla.

- **Equipos Requeridos:**

- ✓ Balanza de alta precisión.
- ✓ Juego de tamices normalizados.
- ✓ Bandejas metálicas.
- ✓ Horno para el secado de las muestras.

- **Procedimiento de Ejecución:**

1. El agregado se introduce en el horno para eliminar por completo su humedad. Una vez seco, se extrae y se registra su peso inicial exacto.
2. Se ensambla la columna de tamices ordenándolos de mayor a menor abertura (en forma descendente). Es decir, la malla con los orificios más grandes se ubica en la parte superior, finalizando en la base con un recipiente ciego (fondo) destinado a recolectar el material más fino.
3. La muestra seca se vierte en el tamiz superior. Posteriormente, se empieza a tamizar, de manera que hagamos vibrar los tamices, durante un periodo de tiempo

determinado, el cual dependerá de las características específicas y la granulometría del material.

4. Al concluir la vibración, se pesa minuciosamente la porción de agregado que quedó atrapada en cada malla, así como el polvo fino recolectado en la bandeja del fondo, llevando un registro detallado para los cálculos posteriores.
5. Como paso final, se cuantifica y anota el peso exacto del agregado acumulado en cada malla de la serie, así como el polvo residual depositado en el recipiente base.

2.4. Módulo de Finura

El módulo de finura permite estimar que tan fino o grueso está el agregado. Se obtiene de la suma de los porcentajes retenidos acumulados en el tamiz N.º 4, N.º 8, N.º 16, N.º 30, N.º 50, N.º 100 y es dividido para 100, no se incluye el fondo o bandeja (“pan”), este parámetro se obtiene solo del análisis granulométrico de la arena.

2.5. Curva Granulométrica

Los resultados del análisis granulométrico se representan gráficamente mediante una curva o línea de cribado, en el eje de las ordenadas se representa el porcentaje acumulado que pasa por los tamices y en el eje de las abscisas se indican las aberturas de los tamices. (Sánchez de Guzmán, 2001)

2.6. Tamaño Máximo

El tamaño máximo de los agregados viene dado por los valores del análisis granulométrico y corresponde a la abertura del menor tamiz de la serie que permite el paso del 100 % del material (Sánchez de Guzmán, 2001).

2.7. Tamaño Máximo Nominal

El tamaño máximo nominal se define como la abertura del tamiz inmediatamente superior a aquel que retiene acumuladamente el 15 % o más del material. Este parámetro se emplea ampliamente en la caracterización de agregados, ya que refleja de mejor manera el tamaño representativo de las partículas más gruesas presentes en la muestra (Sánchez de Guzmán, 2001).

2.8. Pesos Específicos

El ensayo de pesos específicos de los agregados consiste en determinar la relación entre la masa del material y el volumen que ocupa, considerando los vacíos permeables e

impermeables de las partículas. Este ensayo es fundamental para el diseño de mezclas de hormigón, ya que permite conocer la densidad real de los agregados y su capacidad de absorber agua.

2.9. Peso Volumétrico Suelto

El ensayo de peso volumétrico suelto consiste en determinar la relación entre la masa y el volumen que ocupa un agregado cuando se coloca libremente en un recipiente sin necesidad de compactar. Este ensayo se utiliza para conocer las propiedades de manejo y dosificación de los agregados en mezclas de hormigón y mortero.

2.10. Estado del arte

(Ahmed y Basher, 2023), en su investigación evaluaron la viabilidad de producir hormigón alivianado estructural sustituyendo los agregados tradicionales por piedra pómez, considerándose un material volcánico de alta porosidad y baja densidad. Mediante el análisis de 25 mezclas con reemplazos volumétricos del 10% al 100% en agregados finos, gruesos y su combinación, determinaron que la sustitución del 80% al 100% del agregado grueso, o de ambos agregados simultáneamente, logra clasificar al material como hormigón alivianado portante. Específicamente, el reemplazo total (100%) de ambos agregados redujo la densidad a 1357 kg/m^3 , un 45% menos que el hormigón normal, manteniendo una resistencia a la compresión de 13 MPa, la cual es aceptable para soportar cargas. Sin embargo, los autores observaron que a mayor cantidad de piedra pómez gruesa disminuye significativamente la trabajabilidad de la mezcla, debido a la alta absorción de agua generada por los vacíos de aire propios de este material. (Ahmed y Basher, 2023)

En su investigación, Parhizkar y otros analizaron las propiedades físicas, mecánicas y de durabilidad del hormigón estructural utilizando agregados de piedra pómez volcánica, evaluando mezclas con sustitución únicamente de agregado grueso y mezclas con reemplazo de ambos agregados (fino y grueso). Los resultados demostraron que el reemplazo de ambos agregados reduce el peso del hormigón entre un 35% y 40%, mientras que la sustitución parcial lo reduce en un 25% a 30%. Aunque la resistencia a la compresión disminuye frente al hormigón tradicional, los autores comprobaron que las mezclas diseñadas con un alto contenido de cemento y una baja relación agua/cemento

alcanzan resistencias de hasta 30.2 MPa, cumpliendo satisfactoriamente con los requisitos normativos para ser clasificadas como hormigón alivianado estructural. El estudio destaca como hallazgo clave que la dosificación de cemento es el parámetro fundamental para el éxito de este material; un mayor volumen de cemento no solo garantiza la viabilidad mecánica, sino que mejora drásticamente su durabilidad al disminuir la absorción capilar, reducir la penetración de cloruros y mitigar la expansión por ataque de sulfatos, logrando contrarrestar los problemas derivados de la alta absorción de agua propia de la piedra pómez. (Parhizkar et al., 2012)

Loaiza, evaluó las características físicas y mecánicas del hormigón ligero utilizando piedra pómez como reemplazo del agregado grueso y fino. Los resultados indicaron que la utilización exclusiva de piedra pómez tanto fina como gruesa logra reducir la densidad del hormigón a 1450 kg/m³, una disminución del 23.65% en comparación con las mezclas que emplean arena de río convencional. Curiosamente, aunque la mezcla con piedra pómez como único agregado experimentó una leve reducción del 2.78% en su resistencia a la compresión frente a la mezcla con arena tradicional, presentó un incremento extraordinario del 92.73% en su resistencia a la flexión. A pesar de este excelente desempeño a la flexión, el autor concluye que no es recomendable sustituir totalmente la arena por piedra pómez fina en elementos que requieran soportar grandes cargas de compresión estructural, y advierte enfáticamente que se debe evitar el uso de aditivos plastificantes, ya que la alta absorción de agua propia de este material volcánico altera la mezcla e impide un curado correcto. (Loaiza, 2015)

Parmo y otros, evaluaron las propiedades mecánicas del hormigón alivianado utilizando piedra pómez volcánica como reemplazo del agregado grueso. Los resultados demostraron que el uso de este material permite obtener un hormigón con un peso volumétrico de 1850 kg/m³, lo que confirma su aptitud como agregado para la fabricación de hormigón estructural ligero. En cuanto a su desempeño mecánico, las pruebas a los 28 días revelaron que la mezcla alcanzó una resistencia a la compresión de 13.88 MPa y una resistencia a la tracción por hendimiento de 4.71 MPa. Basándose en estos valores, los autores concluyen que el hormigón elaborado con piedra pómez se clasifica como un hormigón estructural de resistencia moderada, siendo totalmente viable como material de construcción. Adicionalmente, el estudio comprobó que existe una relación directa en sus propiedades mecánicas, determinando que, a mayor valor de resistencia a la compresión

del material, se obtiene también un incremento en su resistencia a la tracción. (Parmo et al., 2022)

La elevada porosidad de la piedra pómez genera niveles de absorción de agua significativamente superiores a los de los áridos convencionales, convirtiendo el control de humedad previo al mezclado en un factor crítico para garantizar la trabajabilidad del hormigón y mantener estable la relación agua-cemento efectiva. En su investigación, Karthika y otros, evaluaron la viabilidad de utilizar piedra pómez como reemplazo del agregado grueso en un hormigón de grado M30, sustituyéndolo en proporciones volumétricas del 50%, 80% y 100%. Para contrarrestar la alta porosidad del material volcánico, sumergieron los agregados en agua durante 24 horas antes del mezclado y utilizaron un aditivo superplastificante, sometiendo posteriormente las muestras a diversas pruebas mecánicas destructivas y no destructivas. Los resultados demostraron la viabilidad técnica de sustituir hasta el 100% del agregado grueso convencional por piedra pómez, un hallazgo crucial que confirma que este reemplazo no solo reduce drásticamente el peso propio de las estructuras, sino que también aporta propiedades de aislamiento térmico, consolidando a la mezcla como un material de construcción altamente útil y económico. (Karthika R.B et al., 2020)

Diversos autores respaldan la necesidad de pre-humectar este material para evitar que el agregado "robe" el agua de la pasta; por ejemplo, Loaiza recomienda sumergir la piedra pómez durante 48 horas y dejarla escurrir al aire por 24 horas para alcanzar la condición de saturado con superficie seca (SSS). Emplear el agregado en este estado minimiza la pérdida de asentamiento en el tiempo. Además, este autor destaca un dato práctico para estimaciones rápidas en obra: la absorción del material a los 30 minutos equivale aproximadamente al 65 % de su absorción total a las 24 horas (Loaiza, 2015).

Martínez y Caiza, estudiaron la factibilidad del uso de materiales de origen volcánico para la fabricación de hormigones alivianados y destacan que este tipo de hormigón ligero tiene una ventaja significativa para el comportamiento sismorresistente, tanto en la disminución de acción sísmica como en desplazamientos de piso. (Martinez Ruiz y Caiza Sánchez, 2015)

En su estudio sobre el uso de arena de piedra pómez como reemplazo del agregado fino, Gaus y otros, demostraron que la sustitución paulatina de la arena regular permite reducir el peso volumétrico del material a menos de 1900 kg/m³, clasificándolo exitosamente

como hormigón alivianado. Sin embargo, los investigadores advierten que este beneficio de reducción de carga muerta conlleva una disminución significativa en las propiedades mecánicas de la mezcla. Específicamente, observaron que una sustitución del 100% del agregado fino disminuye la resistencia a la compresión en un 81.10% alcanzando 56.63 kg/cm² y la resistencia a la tracción por hendimiento en un 52.05% en comparación con la mezcla de control. Este hallazgo indica que, si bien la arena de piedra pómez es excelente para aligerar el hormigón, las dosificaciones con altos porcentajes de reemplazo deben ser cuidadosamente evaluadas según las exigencias estructurales del proyecto. (Gaus et al., 2022)

A nivel internacional, las investigaciones compiladas ratifican la eficiencia de este material frente a los avances tecnológicos actuales; mediante el análisis de múltiples dosificaciones y combinaciones de reemplazo, se comprueba que el agregado de pómez es una alternativa altamente eficiente para la producción moderna de hormigón aligerado.

Para garantizar la idoneidad de estos materiales en el entorno ecuatoriano, se emplean normativas internacionales como la ASTM, las cuales exigen la ejecución de ensayos de control fundamentales que evalúan la forma, gravedad específica, granulometría, absorción, pesos unitarios y el desgaste. Por consiguiente, si los agregados suministrados no cuentan con el respaldo de estas especificaciones normalizadas, es indispensable proceder con su respectiva evaluación en laboratorio.

2.11. Conclusión del Estado del Arte

A partir de la revisión de las investigaciones actuales, se concluye de manera contundente que la piedra pómez es una alternativa altamente viable y eficiente para la producción de hormigón estructural aligerado. Su incorporación no solo responde a una necesidad de innovación tecnológica y económica, sino que aporta beneficios directos en el comportamiento sismorresistente de las edificaciones al reducir significativamente la carga muerta y los desplazamientos de piso. Sin embargo, el éxito de su implementación depende estrictamente de la técnica de preparación y del diseño de la mezcla.

La altísima porosidad de la piedra pómez representa el mayor desafío técnico, ya que su capacidad de absorber agua puede arruinar la relación agua-cemento y destruir la trabajabilidad de la mezcla. La literatura coincide en que la pre-humectación no es opcional, es obligatoria.

Sumergir los agregados en agua por 24 horas antes del mezclado es la estrategia más efectiva para saturar los poros y evitar que el agregado "robe" el agua de la pasta de cemento. Para optimizar este proceso y evitar la pérdida de asentamiento, se aconseja buscar la condición de Saturado con Superficie Seca (SSS), lo cual puede lograrse combinando la inmersión prolongada escurrimiento al aire. Como regla práctica de obra, es vital recordar que, a los 30 minutos de inmersión, la piedra pómez ya ha alcanzado aproximadamente el 65% de su absorción total.

Por otro lado, las tasas de sustitución más agresivas del 80% y 100% han demostrado resultados prometedores, pero cada una tiene un propósito específico según las exigencias del proyecto:

Las mezclas que sustituyen el 100% de los agregados por agregados livianos demuestran la reducción de peso logrando densidades de hasta 1357 kg/m³, un 45% menos que el hormigón tradicional y mejora excepcionalmente las propiedades de aislamiento térmico. Además, el reemplazo total puede generar un incremento extraordinario en la resistencia a la flexión hasta un 92.73%.

Un reemplazo total del 100%, especialmente en el agregado fino (polvo de pómez), provoca una caída drástica (hasta un 81%) en la resistencia a la compresión. Por lo tanto, el 100% es ideal para elementos divisorios, de cerramiento, o estructuras donde prime la ligereza y la resistencia a la flexión sobre las cargas de compresión puras.

Sustituir el 80% del agregado grueso se consolida como el umbral óptimo para clasificar al material como hormigón alivianado. Permite una reducción sustancial del peso volumétrico manteniendo la trabajabilidad de la mezcla en rangos aceptables y conservando una resistencia a la compresión estructuralmente útil y segura.

Para garantizar la viabilidad mecánica y la durabilidad del hormigón con piedra pómez, se deben aplicar los mejores parámetros extraídos del estado del arte, y, podemos empezar con la sobredosificación del cemento el cual se considera un paso fundamental ya que utilizar un alto contenido de cemento combinado con una baja relación agua-cemento es la clave para alcanzar resistencias superiores a los 30 MPa. Esto no solo asegura la viabilidad estructural, sino que ayuda a sellar la red capilar, protegiendo al material contra el ataque de sulfatos y la penetración de cloruros. Al momento de considerar el uso de aditivos, llega a ser una alternativa a considerar por los desafíos técnicos que tiene. Mientras que algunos superplastificantes modernos pueden ayudar si se combinan con

pre-humectación de 24 horas, la recomendación general es evitar el uso de aditivos plastificantes comunes, ya que la absorción capilar de la pómez altera su funcionamiento y puede impedir un curado correcto del hormigón.

Una conclusión que hemos visto en las investigaciones sobre la sustitución de piedra pómez, enfocada en el tema de reemplazos es, si la estructura debe soportar grandes cargas de compresión, no se recomienda sustituir totalmente la arena natural por pómez fina, es preferible enfocar el reemplazo en el agregado grueso.

A pesar del amplio respaldo internacional, las variaciones geológicas de la piedra pómez exigen que cualquier suministro local sea estrictamente evaluado en laboratorio bajo normas internacionales como la ASTM para controlar su granulometría, desgaste y peso unitario antes de ser vertido en obra.

3. Metodología

Se propone la sustitución de los agregados convencionales por agregados alivianados, en este caso usaremos piedra pómez como reemplazo en el diseño de mezcla para cilindros de hormigón, en donde analizaremos la influencia de la sustitución con diferentes ensayos de laboratorio.

Tabla 1. Descripción de metodología

ETAPA	ACTIVIDAD	OBJETIVO
CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES	Ensayos de granulometría, densidad, absorción y peso unitario de la piedra pómez (gruesa y fina).	Determinar propiedades físicas de los materiales para definir proporciones de mezcla
	Determinar propiedades físicas de cemento, agregado fino y agregado grueso de referencia.	
	Caracterización morfológica de la piedra pómez.	
DISEÑO Y ELABORACIÓN DE MEZCLAS	Diseño de hormigón hidráulico.	Obtener mezclas experimentales que permita evaluar el efecto del reemplazo de piedra pómez en agregado grueso y fino.
	Obtención y sustitución de agregado fino convencional por pómez.	
	Obtención y sustitución de agregado grueso convencional por pómez.	
ENSAYOS DE LABORATORIO	Resistencia a la compresión	Analizar la influencia de la sustitución de piedra pómez en la trabajabilidad, propiedades mecánicas y de durabilidad del hormigón alivianado.
	Resistencia a la tracción	
	Durabilidad	

3.1. Propiedades físicas de los materiales

Para realizar nuestra investigación presentamos los ensayos de granulometría, pesos específicos y volumétricos, de cada uno de los agregados que se usaron para la elaboración de mezclas

El análisis granulométrico de los cuatro materiales se realizó mediante el uso de tamices normalizados ASTM, como se muestra en la Figura 2.




Figura 2. Juego de tamices utilizados para el análisis granulométrico de los agregados.



Figura 3. Recipientes para separar los agregados pasantes en cada tamiz.

Tabla 2. Granulometría Agregado Grueso: Grava Convencional

UNIVERSIDAD DEL AZUAY						ENSAYO DE MATERIALES					
		PROYECTO:		Hormigón Aliviado: Evaluación del desempeño mecánico y de durabilidad a través del reemplazo del agregado grueso y fino por piedra pómez.							
		ENSAYO:		Granulometría Agregado Grueso: Grava Convencional							
		MUESTRA:		Grava Triturada Convencional							
		FECHA:		5/3/2026							
		DOCENTE:		Ing. Bernardo Feijoo							
ELABORADO:		Gabriela Pizarro Redrován									
Información Inicial				Comprobación							
Peso inicial seco		6700		gr	6700	100					
Peso para lavar		205			6681	99.71641791					
Peso seco después de lavar		176.32			0.28358209	Cumple					
TAMIZ		Peso Retenido parcial (gr)	Peso Acumulado (gr)	% Retenido	% que pasa						
Pulgada	Mm										
2 ½	63.5	0	0	0	100						
2	50.8	0	0	0	100						
1 ½	38.1	0	0	0	100						
1	25.4	0	0	0	100						
¾	19	954	954	14.24	85.76						
½	12.5	3061	4015	59.93	40.07						
3/8	9.53	1190	5205	77.69	22.31						
# 4	4.75	1271	6476	96.66	3.34						
Fondo	-	205	6681								
8	2.38	84.58	84.58	98.26	1.74						
16	1.19	25.55	110.13	98.74	1.26						
30	0.59	25.03	135.16	98.22	0.78						
50	0.295	21.75	156.91	99.63	0.37						
100	0.149	12.93	169.84	99.88	0.12						
200	0.08	6.18	176.02	99.99	0.01						
Fondo	-	0.34	176.36	100	0						

LÍMITES	
Máximo	Mínimo
100	100
100	100
100	100
100	100
90	85
78	68
71	58
56	40
44	27
34	19
27	13
21	9
16	6
0	0

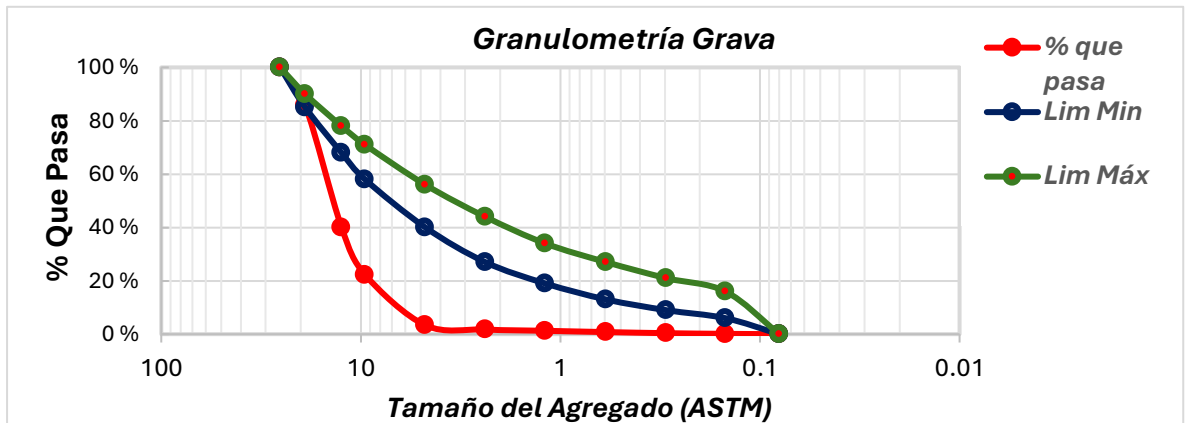



Figura 1. Curva Granulométrica Agregado Grava.

Tabla 3. Granulometría Agregado Fino: Arena Convencional

ENSAYO DE MATERIALES						
 UNIVERSIDAD DEL AZUAY	PROYECTO:	Hormigón Alivianado: Evaluación del desempeño mecánico y de durabilidad a través del reemplazo del agregado grueso y fino por piedra pómez.				
	ENSAYO:	Granulometría Agregado Fino: Arena Convencional				
	MUESTRA:	Arena				
	FECHA:	5/3/2026				
	DOCENTE:	Ing. Bernardo Feijoo				
	ELABORADO:	Gabriela Pizarro Redrován				
Información Inicial				Comprobación		
Peso inicial seco		1000.62		gr	1000.62	100
Peso para lavar		513.38			1000.2	99.958
Peso seco después de lavar		476.45			0.041973976	Cumple
TAMIZ		Peso retenido parcial (gr)	Peso Acumulado (gr)	% Retenido	% Pasa	
Pulg	Mm					
2 ½	63.5	0	0	0		100
2	50.8	0	0	0		100
1 ½	38.1	0	0	0		100
1	25.4	0	0	0		100
¾	19	0	0	0		100
½	12.5	0	0	0		100
⅜	9.53	0	0	0		100
# 4	4.75	9.62	9.62	0.96		99.04
Fondo	-	990.58	1000.2			
8	2.38	17.6	17.6	4.62		95.38
16	1.19	48.52	66.12	14.71		85.29
30	0.59	114.35	180.47	38.48		61.52
50	0.295	187.54	368.01	77.46		22.54
100	0.149	88.26	456.26	95.81		4.19
200	0.08	19.8	476.07	99.92		0.08
Fondo	-	0.38	476.45	100		0

LÍMITES	
Máximo	Mínimo
100	100
100	100
100	100
100	100
100	100
100	100
100	100
100	100
79	68
62	47
48	32
38	22
30	15
23	10
0	0

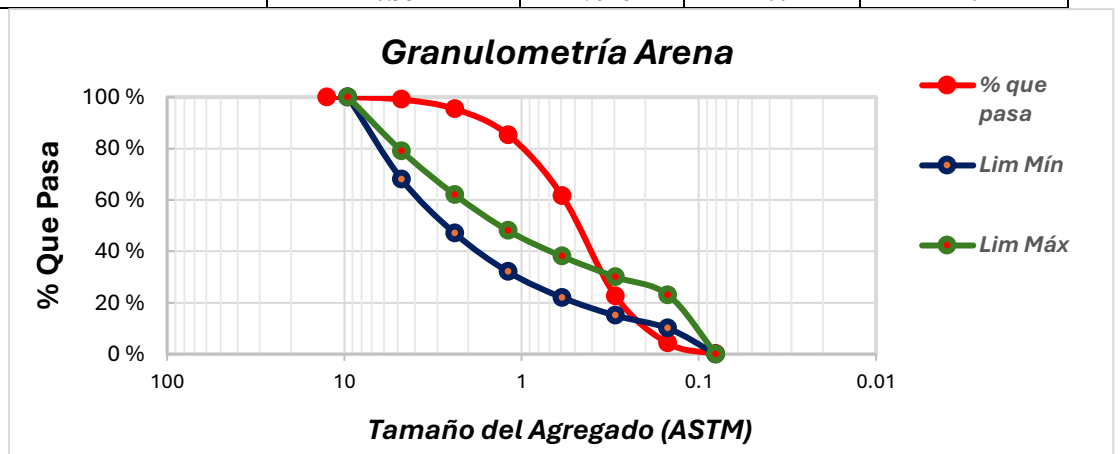



Figura 2. Curva Granulométrica Agregado Fino: Arena Convencional

MF	2.32
----	------

Tabla 4. Granulometría Agregado Grueso: Pómez Grueso

ENSAYO DE MATERIALES					
 UNIVERSIDAD DEL AZUAY	PROYECTO: Hormigón Aliviado: Evaluación del desempeño mecánico y de durabilidad a través del reemplazo del agregado grueso y fino por piedra pómez.				
	ENSAYO: Granulometría Agregado Grueso: Pómez Grueso				
	MUESTRA: Piedra Pómez Gruesa				
	FECHA: 07/03/2026				
	DOCENTE: Ing. Bernardo Feijoo				
ELABORADO: Gabriela Pizarro Redrován					
Información Inicial				Comprobación	
Peso inicial seco		3372		3372	100
Peso para lavar		141		3368	99.88137
Peso después de lavar		66.08		0.11862	Cumple
TAMIZ		Peso Retenido parcial (gr)	Peso Acumulado (gr)	% Retenido	% que pasa
pulg	mm				
2 ½	63.5	-	-	-	-
2	50.8	-	-	-	100
1 ½	38.1	31	31	0.92	99.08
1	25.4	511	542	16.07	83.93
¾	19	1398	1940	57.53	42.47
½	12.5	1086	3026	89.74	10.26
⅜	9.53	132	3158	93.65	6.35
# 4	4.75	69	3227	95.70	4.30
Fondo	-	141	3368		
8	2.38	15.38	15.38	96.70	3.30
16	1.19	5.32	20.7	97.03	2.95
30	0.59	5.55	26.25	97.41	2.59
50	0.295	9.21	35.46	98.01	1.99
100	0.149	22.89	58.35	99.50	0.50
200	0.08	5.3	63.65	99.84	0.16
Fondo	-	1.88	65.53	99.96	0.04

LÍMITES	
Máximo	Mínimo
100	100
100	100
90	85
78	68
71	58
61	46
56	40
44	27
34	19
27	13
21	9
15	6
13	4
0	0

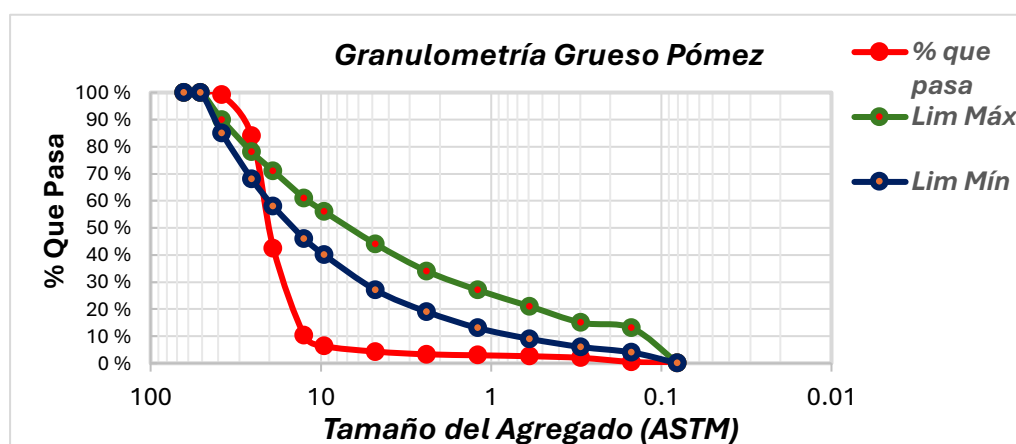



Figura 3. Curva Granulométrica Agregado Grueso: Pómez Grueso

Tabla 5. Granulometría Agregado Fino: Polvo Pómez

ENSAYO DE MATERIALES					
 UNIVERSIDAD DEL AZUAY	PROYECTO: Hormigón Alivianado: Evaluación del desempeño mecánico y de durabilidad a través del reemplazo del agregado grueso y fino por piedra pómez.				
	ENSAYO: Granulometría Agregado Fino: Polvo Pómez				
	MUESTRA: Polvo Pómez				
	FECHA: 7/3/2026				
	DOCENTE: Ing. Bernardo Fejoo				
ELABORADO: Gabriela Pizarro Redrován					
Información Inicial			Comprobación		
Peso inicial seco		504.12	Gr	500.12	100
Peso para lavar		500.12		504.12	100.799808
Peso seco después de lavar		293.48		-0.799808	Cumple
TAMIZ		Peso retenido parcial (gr)	Peso Acumulado (gr)	% Retenido	% Pasa
Pulg	mm				
2 ½	63.5	0	0	0	100
2	50.8	0	0	0	100
1 ½	38.1	0	0	0	100
1	25.4	0	0	0	100
¾	19	0	0	0	100
½	12.5	0	0	0	100
3/8	9.53	0	0	0	100
# 4	4.75	4	4	0.79	99.21
Fondo	-	500.12	504.12		
8	2.38	1.12	5.12	2.52	97.48
16	1.19	28.09	33.21	12.02	87.98
30	0.59	45.2	78.41	27.3	72.70
50	0.295	60.78	139.19	47.85	52.15
100	0.149	107.43	246.62	84.15	15.84
200	0.08	40.16	286.78	97.74	2.26
Fondo	-	6.67	293.45	99.99	0.01

LÍMITES	
Máximo	Mínimo
100	100
100	100
100	100
100	100
100	100
100	100
100	100
100	100
100	100
79	68
62	47
48	32
38	22
30	15
23	10
0	0

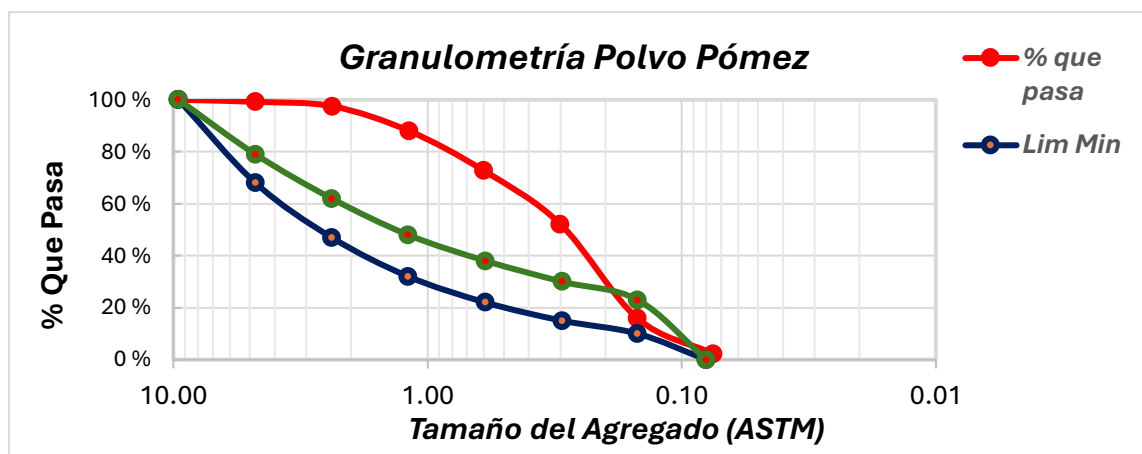


Figura 4. Curva Granulométrica Agregado Fino: Polvo Pómez

- El agregado fino referente a la arena convencional presentó un módulo de finura de 2.32, lo que quiere decir que se ubica dentro del rango recomendado de 2.3-3.1, aunque está en el límite inferior de la especificación, esto indica una arena relativamente fina, por lo que fue necesario tener un control del contenido de agua para mantener la trabajabilidad de la mezcla.



Figura 5. Selección de materiales para el ensayo de granulometría



Figura 6. Pesaje de la muestra inicial previo al análisis granulométrico



Figura 7. Fracciones retenidas por tamiz de la arena convencional durante el análisis granulométrico.

3.1.1. Pesos específicos

El ensayo de peso específico y absorción se realizó para los cuatro materiales utilizados en la investigación: grava convencional, arena convencional, piedra pómez gruesa y polvo de pómez. Para los agregados finos (arena convencional y polvo de pómez) se siguió el procedimiento establecido en la norma ASTM C128 (ASTM International C128, 2001), utilizando un matraz volumétrico de 500 ml. La muestra fue previamente saturada durante 24 horas y llevada a condición superficialmente seca mediante el ensayo del cono, el cual consiste en apisonar el material en un molde cónico y verificar que al retirarlo el cono se derrumbe, indicando que no existe agua libre en la superficie de las partículas. Para los agregados gruesos (grava convencional y piedra pómez gruesa) se siguió la norma ASTM C127 (ASTM International C127, 2024), utilizando un picnómetro. La muestra fue igualmente saturada durante 24 horas previo al ensayo. Los resultados obtenidos fueron utilizados como datos de entrada para el diseño de mezclas y se presentan en la Tabla 6.



Figura 8. Muestra de arena convencional S.S.S lista para ensayo de peso específico



Figura 9. Muestra de polvo pómez S.S.S lista para ensayo de peso específico.

Tabla 6. Resultados del ensayo de pesos específicos de los agregados


ENSAYO DE MATERIALES			
 UNIVERSIDAD DEL AZUAY	PROYECTO:	Hormigón Alivianado: Evaluación del desempeño mecánico y de durabilidad a través del reemplazo del agregado grueso y fino por piedra pómez.	
	ENSAYO:	Pesos Específicos	
	MUESTRA:	Piedra Pómez - Polvo Pómez - Grava Convencional - Arena Convencional	
	FECHA:	11/3/2026	
	DOCENTE:	Ing. Bernardo Feijoo	
ELABORADO:	Gabriela Pizarro Redrován		
GRAVA CONVENCIONAL			
DATOS			
Peso del material superficie satura seca=	1503.630	Gr	A
Peso del picnómetro + agua + material=	8354.0	Gr	B
Peso del picnómetro + agua=	7448	Gr	C
Peso del material seco=	1449.2	Gr	D
RESULTADOS		Fórmulas	
Peso específico seco =	$D/(A-(B-C))$	2.42	g/cm ³
Peso específico S. S. S=	$A/(A-(B-C))$	2.52	g/cm ³
Peso específico aparente=	$D/(D-(B-C))$	2.668	g/cm ³
% de Absorción de agua =	4%		
PÓMEZ GRUESO			
DATOS			
Peso del material superficie satura seca=	1338	Gr	A
Peso del picnómetro + agua + material=	7287	Gr	B
Peso del picnómetro + agua=	7448	Gr	C
Peso del material seco=	763.22	Gr	D
RESULTADOS		Fórmulas	
Peso específico seco =	$D/(A-(B-C))$	0.51	g/cm ³
Peso específico S.S.S=	$A/(A-(B-C))$	0.89	g/cm ³
Peso específico aparente=	$D/(D-(B-C))$	0.826	g/cm ³
% de Absorción de agua	75%		
ARENA CONVENCIONAL			
DATOS			
Peso del material superficie satura seca=	500.56	Gr	A
Peso del picnómetro + agua + material=	958.5	Gr	B
Peso del picnómetro + agua=	654.4	Gr	C
Peso del material seco=	486.93	Gr	D
RESULTADOS		Fórmulas	
Peso específico seco =	$D/(A-(B-C))$	2.48	g/cm ³
Peso específico S.S.S=	$A/(A-(B-C))$	2.55	g/cm ³
Peso específico aparente=	$D/(D-(B-C))$	2.663	g/cm ³
% de Absorción de agua	3%		
POLVO PÓMEZ			
DATOS			
Peso del material superficie satura seca=	150.18	Gr	A
Peso del picnómetro + agua + material=	727.02	Gr	B
Peso del picnómetro + agua=	648.81	Gr	C
Peso del material seco=	146.32	Gr	D
RESULTADOS		Fórmulas	
Peso específico seco =	$D/(A-(B-C))$	2.03	g/cm ³
Peso específico S.S.S=	$A/(A-(B-C))$	2.09	g/cm ³
Peso específico aparente=	$D/(D-(B-C))$	2.148	g/cm ³
% de Absorción de agua	3%		



Figura 10. Pesaje del matraz con agua y muestra durante el ensayo de peso específico de arena convencional.



Figura 11. Pesaje del matraz con agua y muestra durante el ensayo de peso específico del polvo pómez.




Figura 12. Saturación de la piedra pómez gruesa y polvo pómez durante 24 horas previo al ensayo de peso específico.



Figura 13. Medición de temperatura del agua durante el ensayo de peso específico del agregado grueso (ASTM C127).

3.1.2. Pesos Volumétricos

Tabla 7. Resultados del ensayo de pesos volumétricos de los agregados

ENSAYO DE MATERIALES		
 UNIVERSIDAD DEL AZUAY	PROYECTO:	Hormigón Alivianado: Evaluación del desempeño mecánico y de durabilidad a través del reemplazo del agregado grueso y fino por piedra pómez.
	ENSAYO:	Pesos Volumétricos
	MUESTRA:	Piedra Pómez - Polvo Pómez - Grava Convencional - Arena Convencional
	FECHA:	11/3/2026
	DOCENTE:	Ing. Bernardo Feijoo
	ELABORADO:	Gabriela Pizarro Redrován
GRAVA CONVENCIONAL		
DATOS		
Peso del material suelto + peso del molde		
Prueba #1	21234	g
Prueba #2	21344	g
Prueba #3	21285	g
Prueba #4	21274	g
Prueba #5	21388	g
PROMEDIO=	21305	g
Peso de la muestra suelta	7464	g
Volumen del molde	5301.44	cm ³
Peso del molde	13841	g
Peso Volumétrico Suelto	2.854	g/cm ³
PÓMEZ GRUESO		
DATOS		
Peso del material suelto + peso del molde		
Prueba #1	16606	g
Prueba #2	16676	g
Prueba #3	16558	g
Prueba #4	16564	g
Prueba #5	16518	g
PROMEDIO=	16584.4	g
Peso de la muestra suelta	1913.4	g
Volumen del molde	5301.44	cm ³
Peso de molde	14671	g
Peso Volumétrico Suelto	0.361	g/cm ³
ARENA CONVENCIONAL		
DATOS		
Peso del material suelto + peso del molde		
Prueba #1	4568	g
Prueba #2	4617	g
Prueba #3	4513	g
Prueba #4	4440	g
Prueba #5	4572	g
PROMEDIO=	4542	g
Peso de la muestra suelta	2419	g
Volumen del molde	1908.54	cm ³
Peso del molde	2123	g
Peso Volumétrico Suelto	1.267	g/cm ³
POLVO PÓMEZ		
Peso del material suelto + peso del molde		
Prueba #1	3340	g
Prueba #2	3265	g
Prueba #3	3328	g
Prueba #4	3338	g
Prueba #5	3283	g
PROMEDIO=	3310.8	g
Peso de la muestra suelta	1189.80	g
Volumen del molde	1908.54	cm ³
Peso del molde	2121	g
Peso Volumétrico Suelto	0.623	g/cm ³

El ensayo de peso volumétrico suelto se realizó siguiendo la norma ASTM C29, para los cuatro materiales: grava convencional, arena convencional, piedra pómez gruesa y polvo de pómez. El procedimiento consistió en llenar un molde cilíndrico metálico de volumen conocido con el agregado en condición suelta, sin compactación, dejando caer el material desde una altura aproximada de 5 cm sobre el borde del molde. Una vez llenado, se enrasó la superficie y se pesó el conjunto. El peso volumétrico suelto se obtuvo dividiendo el peso neto del agregado para el volumen del molde, expresándose el resultado en kg/m³.

Este ensayo es importante para el diseño de mezclas porque permite estimar la cantidad de agregado grueso por unidad de volumen de hormigón, dato requerido en el método ACI 211 de (Sánchez de Guzmán, 2001). Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 7.

3.2. Propiedades del cemento

Para la elaboración de las mezclas optamos por usar Cemento Hidráulico “ATENAS” Tipo GU, el cuál cumple con los requisitos específicos de la NTE INEN 2380:2011, sus propiedades físicas son:

Tabla 8. Propiedades Físicas del cemento hidráulico ATENAS tipo GU

REQUISITO	NTE INEN 2380	Cemento Atenas
Finura		
Retenido en tamiz 45 µm (%)	A	4,00
Superficie específica (cm ² /g)	A	4200
Peso específico (g/cm³)	A	3,15
Tiempo de fraguado		
Inicial, no menos de, minutos	45	220
Inicial, no más de, minutos	420	280
Contenido de aire en mortero	A	3,50
Resistencia a la compresión		
3 días	13	15
7 días	20	22
28 días	28	31
Expansión en barra de mortero (% máx.)	0,020	0,018

Fuente: Cemento Atenas Tipo GU

3.3. Caracterización morfológica de la piedra pómez

Se realizará un análisis mediante Microscopía Óptica con el fin de determinar las características físicas de la piedra pómez, tales como la forma, porosidad, textura superficial y tamaño de las partículas. Durante la observación microscópica se identificó la presencia de minerales como aluminosilicatos, micas y hierro. La muestra analizada fue recolectada en Riobamba, Ecuador. La presencia de aluminosilicatos sugiere que el material pudo haber estado en contacto con formaciones arcillosas o suelos ricos en minerales volcánicos, lo que evidencia el origen natural y externo de la muestra.



Figura 14. Observación microscópica del polvo pómez.



Figura 15. Observación microscópica de la piedra pómez.

3.4. Diseño y elaboración de las mezclas

La sustitución de los agregados finos y gruesos convencionales por agregados de piedra pómez, considerados materiales alivianados, constituyen uno de los factores principales a analizar en el diseño de mezclas. Para ello, las dosificaciones se dividieron en dos mezclas principales: hormigón convencional y hormigón alivianado. Se tomó en consideración que el tamaño de las partículas, el contenido de cemento, el asentamiento y el contenido de agua varían en cada caso. Asimismo, la humedad y la absorción de los agregados influyen significativamente en la dosificación de cada mezcla.

3.5. Diseño de mezclas

Para el diseño de mezclas se siguió el procedimiento establecido por el Comité ACI 211, descrito por (Sánchez de Guzmán, 2001), el cual define las proporciones de cada ingrediente por metro cúbico de hormigón requeridas para la elaboración de las mezclas de ensayo.

El procedimiento recomendado se indica en la tabla 10, a continuación:

Tabla 9. Pasos de procedimiento para diseño de mezclas

DESCRIPCIÓN
○ Selección de asentamiento
○ Selección del tamaño máximo del agregado
○ Estimación del contenido de aire
○ Estimación del contenido de agua de mezclado
○ Determinación de la resistencia de diseño
○ Selección de la relación agua-cemento
○ Cálculo del contenido de cemento
○ Estimación de las proporciones de agregados
○ Ajuste por humedad de los agregados
○ Ajustes a las mezclas de prueba

Fuente: Tecnología del concreto y del mortero pág. 227

3.5.1. Estimación del contenido de agua

La dosificación de agua está directamente relacionada con el asentamiento seleccionado para la mezcla. Su contenido es fundamental, ya que permite la hidratación del cemento y de los agregados, además de proporcionar la trabajabilidad necesaria al hormigón fresco. La cantidad de agua requerida depende, del tamaño máximo del agregado y del asentamiento escogido, en este caso de 10 cm, por esta razón, al emplear dos tipos distintos de agregados se obtendrán diferentes requerimientos de agua para las mezclas de hormigón convencional y hormigón alivianado.

Cabe destacar que, en el caso del hormigón alivianado, la dosificación de agua puede requerir ajustes debido a que la piedra pómez presenta una absorción aproximada del 75 %. Por esta razón, los agregados fueron previamente hidratados antes de su incorporación a la mezcla, con el fin de evitar una absorción excesiva del agua de amasado. Para la estimación del contenido de agua se empleó la tabla de requerimiento de agua propuesta por (Sánchez de Guzmán, 2001).

3.5.2. Estimación del tamaño máximo del agregado

El tamaño máximo del agregado convencional es de 1 pulgada (25.4 mm) y el tamaño máximo del agregado de piedra pómez es de 2 pulgadas (50.8 mm), estos datos se obtuvieron de los resultados del análisis granulométrico de la tabla 2 y tabla 4.

Tabla 10. Requerimiento aproximado de agua de mezclado para diferentes asentamientos y tamaños máximos de agregado, con partículas de forma angular y textura rugosa, e concreto sin aire incluido.

Asentamiento		Tamaño máximo del agregado, en mm (pulg.)							
mm	pulg	3/8	1/2	3/4	1	1 1/2	2	2 1/2	3
0	0	223	201	186	171	158	147	141	132
25	1	231	208	194	178	164	154	147	138
50	2	236	214	199	183	170	159	151	144
75	3	241	218	203	188	175	164	156	148
100	4	244	221	207	192	179	168	159	151
125	5	247	225	210	196	183	172	162	153
150	6	251	230	214	200	187	176	165	157
175	7	256	235	218	205	192	181	170	163
200	8	260	240	224	210	197	186	176	168

Fuente: Tecnología del concreto y del mortero pág. 234

Para la mezcla elaborada con agregado grueso convencional (grava) se obtuvo un contenido de agua de 192 kg/m³, mientras que para la mezcla con agregado grueso de piedra pómez se determinó inicialmente un contenido de agua de 168 kg/m³. Sin embargo, durante el proceso de mezclado se observó que la mezcla con piedra pómez presentaba una baja trabajabilidad y escasa fluidez, por lo que fue necesario realizar ajustes en la dosificación de agua. Este comportamiento se atribuye a la elevada capacidad de absorción de la piedra pómez, la cual demanda una mayor cantidad de agua disponible en la mezcla para mantener condiciones adecuadas de trabajabilidad.

3.5.3. Estimación de contenido de aire

El aire queda naturalmente atrapado en el interior del hormigón durante el proceso de mezclado, por lo que su volumen debe ser considerado en el diseño de la dosificación. La estimación del contenido de aire depende principalmente del tamaño máximo nominal del agregado empleado. Para los agregados convencionales se adoptó un tamaño máximo nominal de ¾", mientras que para los agregados livianos de piedra pómez se consideró un tamaño máximo nominal de 1½". La determinación del contenido de aire se realizó mediante las tablas presentadas en el libro *Tecnología del concreto y del mortero*.

Tabla 11. Cantidad aproximada de aire esperado en concreto sin aire incluido y niveles de aire incluido para diferentes tamaño máximos de agregado

Tamaño máximo nominal del agregado		Contenido de aire en porcentaje (por volumen)			
mm	pulg	Naturalmente atrapado	Exposición ligera	Exposición moderada	Exposición severa
9.51	3/8 "	3.0	4.5	6.0	7.5
12.7	½	2.5	4.0	5.5	7.0
19	¾	2.0	3.5	5.0	6.0
25.4	1	1.5	3.0	4.5	6.0
38.1	1 ½	1.0	2.5	4.5	5.5
50.8	2	0.5	2.0	4.0	5.0
76.1	3	0.3	1.5	3.5	4.5
152	6	0.2	1.0	3.0	4.0

Fuente: *Tecnología del concreto y del mortero* pág. 232

Porcentaje de contenido de aire para agregado convencional= 2%

Porcentaje de contenido de aire para agregado liviano= 1%

3.5.4. Determinación de la resistencia de diseño

La resistencia a la compresión constituye uno de los parámetros fundamentales para el diseño de mezclas de hormigón, ya que establece las propiedades mecánicas que debe alcanzar el material una vez endurecido. Para la presente investigación se adoptó una resistencia especificada a la compresión de 210 kg/cm² (21 MPa) a los 28 días de curado, valor ampliamente utilizado en elementos estructurales y no estructurales de edificaciones convencionales. Por lo tanto, cuando no existen datos que nos permitan realizar una desviación estándar, la resistencia de diseño de la mezcla se obtiene mediante una mayoración, de acuerdo a la tabla 13.

Tabla 12. Resistencia requerida de diseño cuando no hay datos que permitan determinar la desviación estándar

Resistencia especificada $f'c$ (kg/cm ²)	Resistencia de diseño de la mezcla $f'c$ (kg/cm ²)
Menos de 210 kg/cm ²	$f'c + 70$ kg/cm ²
De 210 kg/cm ² a 350 kg/cm ²	$f'c + 85$ kg/cm ²
Más de 350 kg/cm ²	$f'c + 100$ kg/cm ²

Fuente: *Tecnología del concreto y del mortero* pág. 237

La selección de esta resistencia permitió establecer los parámetros necesarios para el diseño de la mezcla, tales como la relación agua-cemento y el contenido de cemento.

3.5.5. Selección de la relación agua-cemento

Este parámetro determinará los requisitos de resistencia, durabilidad y acabados del hormigón. Dicho eso, para encontrar la relación agua-cemento de acuerdo a nuestra resistencia de diseño, tomamos los valores de las tablas del libro *Tecnología del mortero y del concreto*, el cuál presenta datos de resistencia a la compresión a los 28 días de curado para concreto sin aire incluido, como se muestra a continuación en la tabla 14.

Tabla 13. Correspondencia entre la resistencia a la compresión a los 28 días de edad y la relación agua-cemento para los cementos colombianos, portland tipo I, en concreto sin aire incluido.

Relación agua-cemento			
Resistencia a la compresión	Límite superior	Línea media	Límite inferior
140	-	0.72	0.65
175	-	0.65	0.58
210	0.7	0.58	0.53
245	0.64	0.53	0.49
280	0.59	0.48	0.45
315	0.54	0.44	0.42
350	0.49	0.4	0.38

Fuente: Tecnología del mortero y del concreto pág. 238

3.5.6. Cálculo de contenido de cemento

El contenido de cemento se obtiene a partir de los valores obtenidos de la relación agua-cemento y el contenido de agua en la mezcla, a partir de ecuación:

$$C = \frac{A}{(A/C)} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

C= Contenido de cemento en kg/cm³

A= Requerimiento de agua de mezclado en kg/m³

A/C= Relación agua-cemento, por peso

Dosificaciones

Se presentan los datos preliminares para la dosificación de cada mezcla con sus respectivos agregados, junto son sus características físicas:

Tabla 14. Dosificación Hormigón Convencional



UNIVERSIDAD DEL AZUAY								ENSAYO DE MATERIALES			
				PROYECTO: Hormigón Alivianado: Evaluación del desempeño mecánico y de durabilidad a través del reemplazo del agregado grueso y fino por piedra pómez.							
				ENSAYO: Dosificación Hormigón Convencional							
				MUESTRA: Grava Convencional – Arena Convencional							
				FECHA: 8/4/2026							
				DOCENTE: Ing. Bernardo Feijoo							
ELABORADO: Gabriela Pizarro Redrován											
MEZCLA HORMIGÓN CONVENCIONAL											
Material		GRUESO				FINO					
Forma		Angular				Angular					
Peso Unitario Suelto		2.854	g/cm ³		1.267	g/cm ³					
Peso Unitario Compacto		3.036	g/cm ³		1.301	g/cm ³					
Peso Específico		2.668	g/cm ³		2.663	g/cm ³					
Absorción		4%	porcentaje		3%	porcentaje					
Módulo de Finura		-				2.15					
Tamaño Máximo Nominal		3/4"	pulgada		3/8"	pulgada					
Tamaño Máximo		1"	pulgada		#4	pulgada					
Humedad		1.39%	porcentaje		2.96%	porcentaje					
DISEÑO HORMIGÓN											
Resistencia Solicitada		210				kg/cm ²					
Asentamiento		5 a 10				cm					
Peso Específico del Cemento		3.15				g/cm ³					
CÁLCULOS											
ASENTAMIENTO		10				cm					
TAMAÑO MÁXIMO		1				pulgada					
ESTIMACIÓN CONTENIDO DE AIRE		2				%					
ESTIMACIÓN CONTENIDO DE AGUA		192				kg/m ³					
DETERMINAR RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN		295				kg/cm ²					
RELACION AGUA - CEMENTO		0.46				por peso					
CONTENIDO DE CEMENTO		418.70				kg/m ³					
TABLA 11.13 Correspondencia entre la resistencia a la compresión a los 28 días de edad y la relación agua-cemento para los cementos colombianos, portland tipo 1, en concretos sin aire incluido				DATOS VOLÚMEN CILINDROS							
Relación agua-cemento				Datos pesos para Cilindros (Durabilidad)		Datos pesos para Cilindros (Resistencias)					
Resistencia Compresión	Límite superior	Línea media	Límite inferior	10	78.54	15	176.71				
140	-	0.72	0.65	20	1570.80	30	5301.44				
175	-	0.65	0.58	0.001570796		0.005301438					
210	0.7	0.58	0.53	Mayorar	1.15	Mayorar	1.15				
245	0.64	0.53	0.49	# cilindros	1	# cilindros	1				
280	0.59	0.48	0.45	Requerido	0.00180641	Requerido	0.00609665				
315	0.54	0.44	0.42								
350	0.49	0.4	0.38								

Tabla 15. Dosificación Hormigón Alivianado

ENSAYO DE MATERIALES							
 UNIVERSIDAD DEL AZUAY	PROYECTO: Hormigón Alivianado: Evaluación del desempeño mecánico y de durabilidad a través del reemplazo del agregado grueso y fino por piedra pómez.						
	ENSAYO: Dosificación Hormigón Alivianado						
	MUESTRA: Pómez Grueso - Polvo Pómez						
	FECHA: 10/4/2026						
	DOCENTE: Ing. Bernardo Feijoo						
ELABORADO: Gabriela Pizarro Redrován							
MEZCLA HORMIGÓN ALIVIANADO							
Material	GRUESO PÓMEZ			POLVO PÓMEZ			
Forma	Angular			Angular			
Peso Unitario Suelto	0.361	g/cm ³	0.623	g/cm ³			
Peso Unitario Compacto	0.972	g/cm ³	1.038	g/cm ³			
Peso Específico	0.826	g/cm ³	2.148	g/cm ³			
Absorción	75%	porcentaje	3%	porcentaje			
Módulo de Finura	-			-			
Tamaño Máximo Nominal	1 1/2"	pulgada	3/8"	pulgada			
Tamaño Máximo	2"	pulgada	#4	pulgada			
Humedad	0.27%	porcentaje	0.92%	porcentaje			
DISEÑO HORMIGÓN							
Resistencia Solicitada	210			kg/cm ²			
Asentamiento	5 a 10			cm			
Peso Específico del Cemento	3.15			g/cm ³			
CÁLCULOS							
ASENTAMIENTO			10		cm		
TAMAÑO MÁXIMO			2		pulgada		
ESTIMACIÓN CONTENIDO DE AIRE			2%		porcentaje		
ESTIMACIÓN CONTENIDO DE AGUA			168		kg/m ³		
DETERMINAR RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN			295		kg/cm ²		
RELACIÓN AGUA - CEMENTO			0.46		por peso		
CONTENIDO DE CEMENTO			366.4		kg/m ³		
TABLA 11.13 Correspondencia entre la resistencia a la compresión a los 28 días de edad y la relación agua-cemento para los cementos colombianos, portland tipo 1, en concretos sin aire Incluido				DATOS VOLÚMEN CILINDROS			
Relación agua-cemento				Datos pesos para Cilindros (Durabilidad)		Datos pesos para Cilindros (Resistencias)	
Resistencia a la compresión	Límite superior	Línea media	Límite inferior	10	78.54	15	176.71
140	-	0.72	0.65	20	1570.80	30	5301.4
175	-	0.65	0.58	0.001570796		0.005301438	
210	0.7	0.58	0.53	Mayorar	1.15	Mayorar	1.15
245	0.64	0.53	0.49	# cilindros	1	# cilindros	1
280	0.59	0.48	0.45	Requerido	0.001806	Requerido	0.0061
315	0.54	0.44	0.42				
350	0.49	0.4	0.38				

Una vez determinados los parámetros de diseño, como la resistencia de diseño de 295 kg/cm², la relación agua-cemento va a ser igual a 0.46 en ambas dosificaciones, valor que fue encontrado mediante una interpolación, el contenido de agua y el contenido de cemento, expuestos en las tablas, se procedió a calcular las proporciones de los agregados fino y grueso para cada una de las mezclas estudiadas. Debido a las diferencias granulométricas entre los agregados convencionales y los agregados livianos de piedra pómez, se realizó una dosificación independiente para cada caso.

En la Tabla 15 y en la Tabla 16 se presentan los resultados finales de las dosificaciones obtenidas para las mezclas de hormigón convencional y hormigón alivianado, expresadas por metro cúbico de hormigón, podemos observar que tenemos dos diferentes datos de volumen, en el cual se exponen diferentes secciones de cilindros para los ensayos de durabilidad y para los ensayos de resistencia.

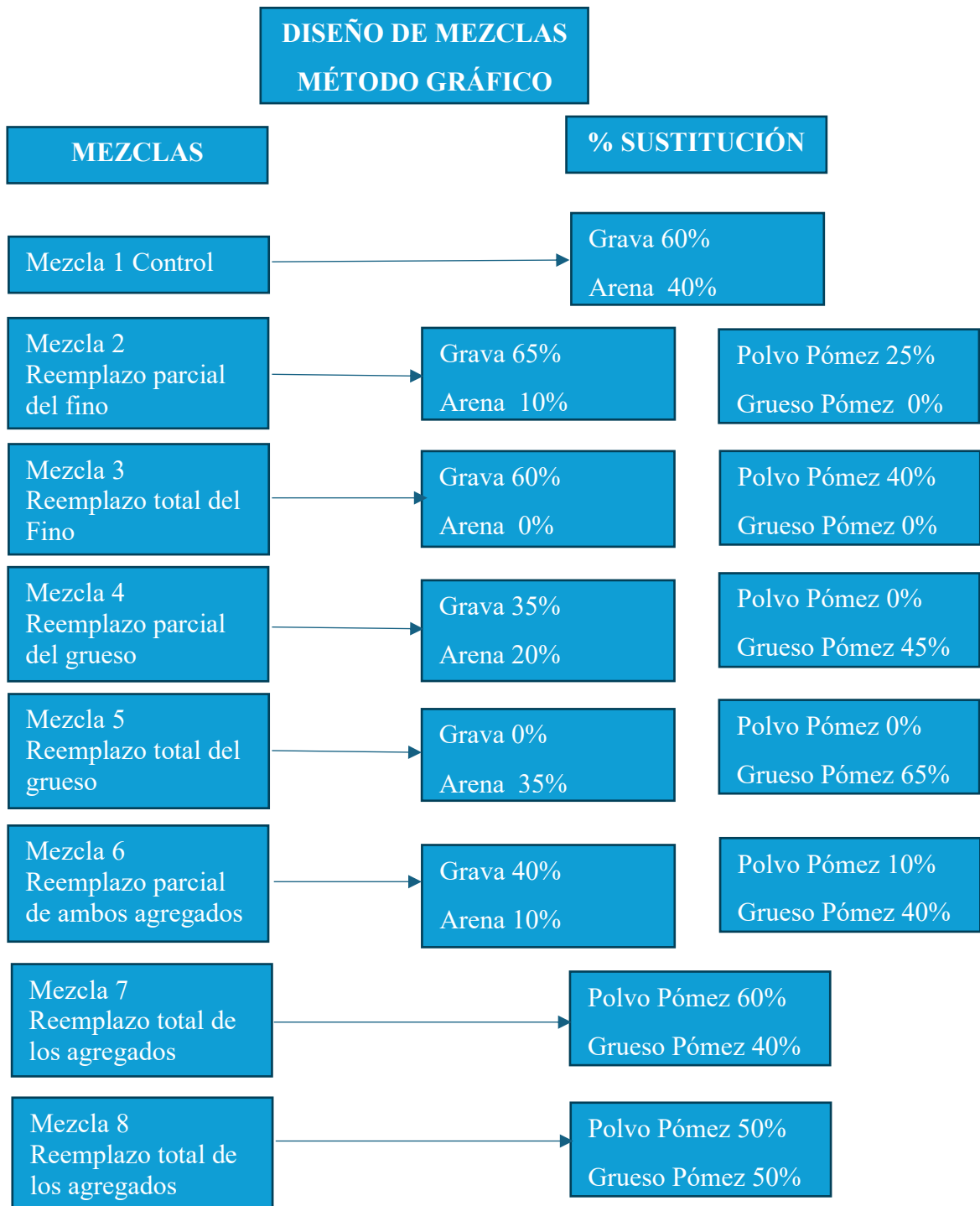
3.6. Diseño de mezclas mediante el método gráfico

Con base en la caracterización física de los materiales obtenida en la etapa anterior, se procedió a elaborar ocho diseños de mezcla mediante el método gráfico del Comité ACI 211, con el objetivo de evaluar el efecto del reemplazo progresivo del agregado grueso convencional (grava) por piedra pómez gruesa, y del agregado fino convencional (arena) por polvo de pómez, en diferentes proporciones.

Los diseños planteados contemplan una mezcla de control elaborada íntegramente con agregados convencionales, la cual sirve como referencia para la comparación de resultados, y seis mezclas experimentales con distintos porcentajes de sustitución, tanto del agregado grueso como del agregado fino, de manera individual y combinada. En todos los casos se mantuvo una resistencia de diseño de 295 kg/cm² y un asentamiento de 10 cm, con el fin de garantizar condiciones comparables entre las mezclas.

A continuación, presentamos una tabla con todos los porcentajes de sustitución que analizamos para las ocho mezclas:

Tabla 16. Esquema de diseño de mezclas – Método Gráfico



Es importante mencionar que en todos los diseños, la suma de los porcentajes de agregado convencional y agregado de piedra pómez, tanto en la fracción gruesa como en la fracción fina representa el 100% del volumen total de agregados, garantizando así que el reemplazo sea proporcional y que la dosificación de cada mezcla sea coherente con el método de diseño empleado y finalmente una mezcla adicional (Mezcla 8) con reemplazo total de ambos agregados en proporciones iguales de 50%, planteada para observar el

comportamiento del hormigón en una condición de sustitución equilibrada entre el agregado grueso y fino.

A continuación, se presentan las tablas de dosificación obtenidas para cada una de las ocho mezclas de hormigón estudiadas, expresadas en kilogramos por metro cúbico (kg/m^3), siguiendo el procedimiento del método gráfico propuesto por (Sánchez de Guzmán, 2001) en el libro *Tecnología del Concreto y del Mortero*

Tabla 17. Método Gráfico mezcla de control

Mezcla 1 CONTROL	% de cada agregado	GRAVA	ARENA	GRUESO PÓMEZ	POLVO PÓMEZ	MÉTODO GRÁFICO								
		60	40	0	0	Tamiz	Abertura	Grava % PASA	Arena % PASA	%Grava	%Arena	Mezcla 1	Lim Superior	Lim Inferior
						2	50.8	100	100	60	40	100	100	100
						1 ½	38.1	100	100	60	40	100	100	100
						1	25.4	100	100	60	40	100	100	100
						¾	19	86.09	100	51.654	40	91.654	90	85
						½	12.5	41.45	100	24.87	40	64.87	78	68
						3/8	9.53	24.1	100	14.46	40	54.46	71	58
						# 4	4.75	5.56	99.35	3.336	39.74	43.076	56	40
						8	2.38	2.9	95.72	1.74	38.288	40.028	44	27
						16	1.19	2.1	85.57	1.26	34.228	35.488	34	19
						30	0.59	1.31	61.66	0.786	24.664	25.45	27	13
						50	0.295	0.63	22.49	0.378	8.996	9.374	21	9
						100	0.149	0.22	4.04	0.132	1.616	1.748	16	6
						200	0.08	0.03	-0.07	0.018	-0.028	-0.01	0	0

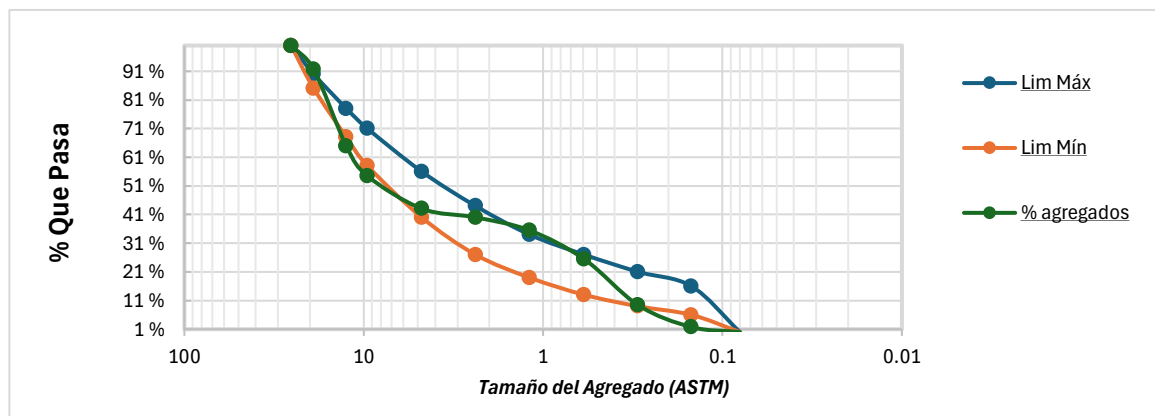


Figura 16. Curva Granulométrica Mezcla de control

Tabla 18. Proporciones finales mezcla de control

DOCIFICACIÓN MEZCLA 1								
Vr	0.6297	m ³	VOLÚMEN CILINDRO MEZCLA HORMIGÓN CONVENCIONAL					
PESO ESPECÍFICO APARENTE DE LOS AGREGADOS			Volumen Cilindro Mezcla de Agregados Convencionales (Resistencia)			Volumen Cilindro Mezcla de Agregados Convencionales (Durabilidad)		
Ga	2.666	g/cm ³	Agua	7.033	Kg	Agua	1.042	Kg
Ga	2666.0	kg/m ³	Cemento	15.316	Kg	Cemento	2.269	Kg
Peso total de los agregados	1678.8	kg	Agregado Grava	36.851	Kg	Agregado Grava	5.459	Kg
Peso agregado Grava	1007.267	kg	Agregado Arena	24.571	Kg	Agregado Arena	3.640	Kg
Peso agregado Arena	671.512	kg	PROPORCIONES FINALES					
AJUSTE POR HUMEDAD			Agua		192.27	Kg		
Peso húmedo Grava	1007.407	kg	Cemento		418.70	Kg		
Peso húmedo Arena	671.710	kg	Agregado Grava		1007.407	Kg		
APORTE DE AGUA			Agregado Arena		671.710	Kg		
Agregado Grava	0.26	kg						
Agregado Arena	0.0028	kg						
Total	0.27	kg						
Aporte de agua	192.27	kg						

Tabla 19. Método Gráfico Mezcla 2 Reemplazo parcial del agregado fino

Mezcla 2 Reemplazo Parcial del Fino	%de cada agregado	GRAVA	ARENA	GRUESO PÓMEZ	POLVO PÓMEZ	MÉTODO GRÁFICO														
		65	10	0	25	Tamiz	Abertura	Grava % PASA	Arena % PASA	Grueso % PASA	Polvo % PASA	%Grava	%Arena	%Grueso Pómez	%Polvo Pómez	Mezcla 2	Lim Superior	Lim Inferior		
		65	10	0	25	2	50.8	100	100	100	100	65	10	0	25		100	100		
						1 ½	38.1	100	100	99.10	100	65	10	0	25	100	100	100	100	100
						1	25.4	100	100	84.22	100	65	10	0	25	100	100	100	100	100
						¾	19	86.09	100	43.51	100	55.9585	10	0	25	90.9585	90	85		
						½	12.5	41.45	100	11.88	100	26.9425	10	0	25	61.9425	78	68		
						3/8	9.53	24.1	100	8.04	100	15.665	10	0	25	50.665	71	58		
						# 4	4.75	5.56	99.35	6.03	99.5	3.614	9.935	0	24.875	38.424	56	40		
						8	2.38	2.9	95.72	4.81	99	1.885	9.572	0	24.75	36.207	44	27		
						16	1.19	2.1	85.57	4.34	88.91	1.365	8.557	0	22.2275	32.1495	34	19		
						30	0.59	1.31	61.66	3.94	72.63	0.8515	6.166	0	18.1575	25.175	27	13		
						50	0.295	0.63	22.49	3.21	50.01	0.4095	2.249	0	12.5025	15.161	21	9		
						100	0.149	0.22	4.04	1.39	11.33	0.143	0.404	0	2.8325	3.3795	16	6		
						200	0.08	0.03	-0.07	0.97	-3.34	0.0195	-0.007	0	-0.835	-0.8225	0	0		

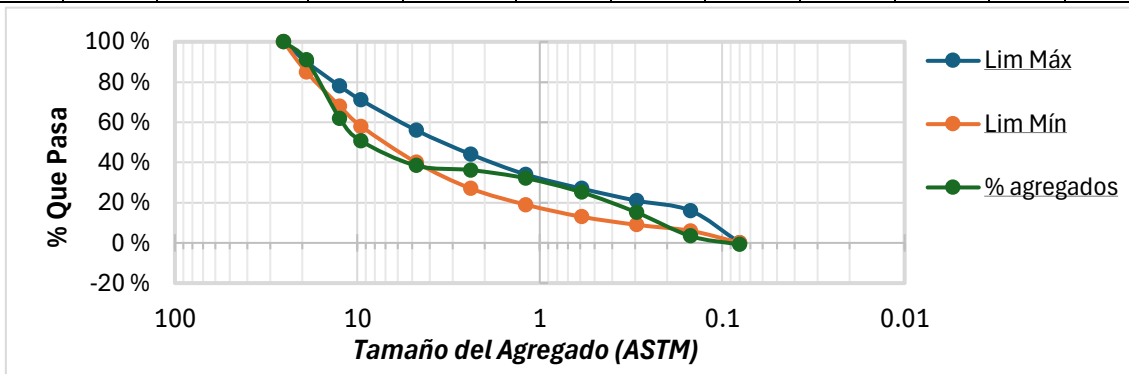


Figura 17. Curva Granulométrica Mezcla 2 Reemplazo Parcial del agregado fino

Tabla 20. Proporciones finales Mezcla 2 Reemplazo Parcial del agregado fino.

DOCIFICACIÓN								
Vr	0.670	m ³	VOLÚMEN CILINDRO MEZCLA HORMIGÓN					
PESO ESPECÍFICO APARENTE DE LOS AGREGADOS			Volumen Cilindro 15X30 Mezcla 2 (Resistencia)			Volumen Cilindro 10X20 Mezcla 2 (Durabilidad)		
Ga	2.515	g/cm ³	Agua	6.598	Kg	Agua	0.977	Kg
Ga	2515.30	kg/m ³	Cemento	14.359	Kg	Cemento	2.127	Kg
Peso total de los agregados	1685.5	kg	Agregado Grava	40.082	Kg	Agregado Grava	5.938	Kg
Peso agregado Grava	1095.58	kg	Agregado Arena	6.167	Kg	Agregado Arena	0.914	Kg
Peso agregado Arena	168.550	kg	Agregado Polvo Pómez	15.415	Kg	Agregado Polvo Pómez	2.284	Kg
Peso agregado Polvo Pómez	421.38	kg	PROPORCIONES FINALES					
AJUSTE POR HUMEDAD			Agua			180.37	Kg	
Peso húmedo Grava	1095.7283	77	Cemento			392.55	Kg	
Peso húmedo Arena	168.60	kg	Agregado Grava			1095.728	Kg	
Peso húmedo Polvo Pómez	421.41	kg	Agregado Arena			168.60	Kg	
APORTE DE AGUA			Agregado Polvo Pómez			421.41	kg	
Agregado Grava	0.29	kg						
Agregado Arena	0.001	kg						
Agregado Polvo Pómez	0.0878	kg						
Total	0.37	kg						
Aporte de agua	180.37	kg						

Tabla 21. Método Gráfico Mezcla 3 Reemplazo total del agregado fino

Mezcla 3 Reemplazo total del Fino	% de cada agregado	GRAVA	ARENA	GRUESO PÓMEZ	POLVO PÓMEZ
		60	0	0	40

MÉTODO GRÁFICO (1M ³)												
Tamiz	Abertura	Grava % PASA	Arena % PASA	Grueso % PASA	Polvo % PASA	%Grava	%Arena	%Grueso Pómez	%Polvo Pómez	Mezcla 3	Lim Superior	Lim Inferior
2	50.8	100	100	100	100	60	0	0	40	100	100	100
1 ½	38.1	100	100	99.10	100	60	0	0	40	100	100	100
1	25.4	100	100	84.22	100	60	0	0	40	100	100	100
¾	19	86.09	100	43.51	100	51.654	0	0	40	92	90	85
½	12.5	41.45	100	11.88	100	24.87	0	0	40	65	78	68
3/8	9.53	24.1	100	8.04	100	14.46	0	0	40	54	71	58
# 4	4.75	5.56	99.35	6.03	99.5	3.336	0	0	39.8	43	56	40
8	2.38	2.9	95.72	4.81	99	1.74	0	0	39.6	41	44	27
16	1.19	2.1	85.57	4.34	88.91	1.26	0	0	35.564	37	34	19
30	0.59	1.31	61.66	3.94	72.63	0.786	0	0	29.052	30	27	13
50	0.295	0.63	22.49	3.21	50.01	0.378	0	0	20.004	20	21	9
100	0.149	0.22	4.04	1.39	11.33	0.132	0	0	4.532	5	16	6
200	0.08	0.03	-0.07	0.97	-3.34	0.018	0	0	-1.336	-1	0	0

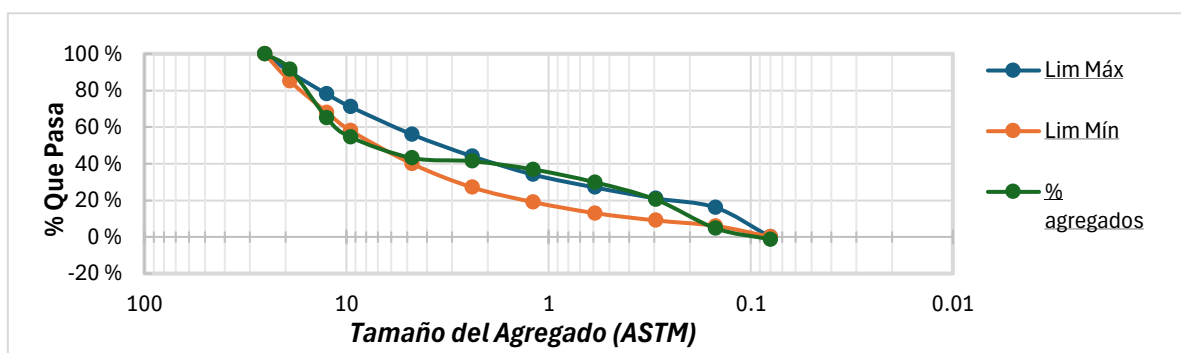


Figura 18. Curva Granulométrica Mezcla 3 Reemplazo total del agregado fino

Tabla 22. Proporciones Finales Mezcla 3 Reemplazo total del agregado fino

DOCIFICACIÓN MEZCLA 3								
Vr	0.6701	m ³	VOLÚMEN CILINDRO MEZCLA HORMIGÓN					
PESO ESPECÍFICO APARENTE DE LOS AGREGADOS			Volumen Cilindro 15x30 Mezcla 3 (Resistencia)			Volumen Cilindro 10X20 Mezcla 3 (Durabilidad)		
Ga	2.432	g/cm ³	Agua	6.599	Kg	Agua	0.978	Kg
Ga	2432.46	kg/m ³	Cemento	14.359	Kg	Cemento	2.127	Kg
Peso total de los agregados			Agregado Grava	35.780	Kg	Agregado Grava	5.301	Kg
Peso agregado Grava			Agregado Polvo Pómez	23.852	Kg	Agregado Polvo Pómez	3.534	Kg
Peso agregado Polvo Pómez			PROPORCIONES FINALES					
AJUSTE POR HUMEDAD			Agua			180.39 Kg		
Peso húmedo Grava			Cemento			392.55 Kg		
Peso húmedo Polvo Pómez			Agregado Grava			978.129 Kg		
APORTE DE AGUA			Agregado Polvo Pómez			652.06 Kg		
Agregado Grava			0.26 kg					
Agregado Polvo Pómez			0.136 kg					
Total			0.39 kg					
Aporte de agua			180.39 kg					

Tabla 23. Método Gráfico Mezcla 4 Reemplazo parcial del agregado grueso

Mezcla 4 Reemplazo Parcial del Grueso	% de cada agregado	GRAVA	ARENA	GRUESO PÓMEZ	POLVO PÓMEZ							
		35	20	45	0							
MÉTODO GRÁFICO (1M ³)												
Tamiz	Abertura	Grava % PASA	Arena % PASA	Grueso % PASA	Polvo % PASA	%Grava	%Arena	%Grueso Pómez	%Polvo Pómez	Mezcla 4	Lim Superior	Lim Inferior
						35	20	45	0		100	100
2	50.8	100	100	100	100	35	20	45	0	100	100	100
1 ½	38.1	100	100	99.10	100	35	20	44.595	0	100	90	85
1	25.4	100	100	84.22	100	35	20	37.899	0	93	78	68
¾	19	86.09	100	43.51	100	30.1315	20	19.5795	0	69.71	71	58
½	12.5	41.45	100	11.88	100	14.5075	20	5.346	0	39.85	61	46
3/8	9.53	24.1	100	8.04	100	8.435	20	3.618	0	32.05	56	40
# 4	4.75	5.56	99.35	6.03	99.5	1.946	19.87	2.7135	0	24.53	44	27
8	2.38	2.9	95.72	4.81	99	1.015	19.144	2.1645	0	22.32	34	19
16	1.19	2.1	85.57	4.34	88.91	0.735	17.114	1.953	0	19.80	27	13
30	0.59	1.31	61.66	3.94	72.63	0.4585	12.332	1.773	0	14.56	21	9
50	0.295	0.63	22.49	3.21	50.01	0.2205	4.498	1.4445	0	6.16	15	6
100	0.149	0.22	4.04	1.39	11.33	0.077	0.808	0.6255	0	1.51	13	4
200	0.08	0.03	-0.07	0.97	-3.34	0.0105	-0.014	0.4365	0	0.43	0	0

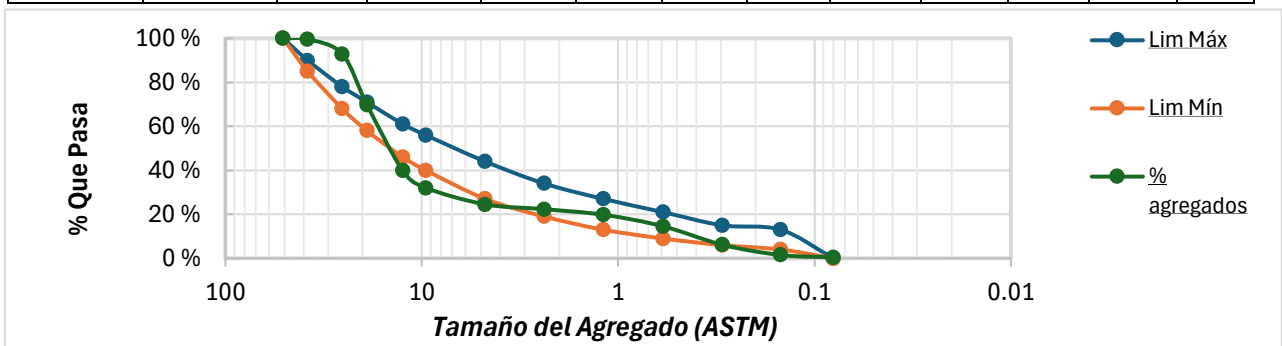


Figura 19. Curva Granulométrica Mezcla 4 Reemplazo parcial del agregado grueso

Tabla 24. Proporciones finales Mezcla 4 Reemplazo parcial del agregado grueso

DOCIFICACIÓN MEZCLA 4								
Vr	0.670	m ³	VOLÚMEN CILINDRO MEZCLA HORMIGÓN					
PESO ESPECÍFICO APARENTE DE LOS AGREGADOS			Volumen Cilindro 15x30 Mezcla 4 (Resistencia)			Volumen Cilindro 10x20 Mezcla 4 (Durabilidad)		
Ga	1.331	g/cm ³	Agua	6.697	Kg	Agua	0.992	Kg
Ga	1331.41	kg/m ³	Cemento	14.359	Kg	Cemento	2.127	Kg
Peso total de los agregados		892.2	Agregado Grava	11.424	Kg	Agregado Grava	1.692	Kg
Peso agregado Grava		312.26	Agregado Grueso Pómez	14.687	Kg	Agregado Grueso Pómez	2.176	Kg
Peso agregado Grueso Pómez		401.481	Agregado Arena	6.529	Kg	Agregado Arena	0.967	Kg
Peso agregado Arena		178.436	PROPORCIONES FINALES					
AJUSTE POR HUMEDAD			Agua			183.08	Kg	
Peso Húmedo Grava		312.306	Cemento			392.55	Kg	
Peso Húmedo Grueso Pómez		401.49	Agregado Grava			312.306	Kg	
Peso Húmedo Arena		178.49	Agregado Grueso Pómez			401.49	Kg	
APORTE DE AGUA			Agregado Arena			178.49	Kg	
Agregado Grava		0.08						
Agregado Grueso Pómez		3.00						
Agregado Arena		0.0007						
Total		3.08						
Aporte de agua		183.08						

Tabla 25. Método Grafico Mezcla 5 Reemplazo total del agregado grueso

Mezcla 5 Reemplazo total del Grueso	% de cada agregado	GRAVA	ARENA	GRUESO PÓMEZ	POLVO PÓMEZ
		0	35	65	0

MÉTODO GRÁFICO (1M ³)												
Tamiz	Abertura	Grava % PASA	Arena % PASA	Grueso % PASA	Polvo % PASA	%Grava	%Arena	%Grueso Pómez	%Polvo Pómez	Mezcla 5	Lim Superior	Lim Inferior
						0	35	65	0		100	100
2	50.8	100	100	100	100	0	35	65	0	100	100	100
1 ½	38.1	100	100	99.10	100	0	35	64.415	0	99.42	90	85
1	25.4	100	100	84.22	100	0	35	54.743	0	89.74	78	68
¾	19	86.09	100	43.51	100	0	35	28.2815	0	63.28	71	58
½	12.5	41.45	100	11.88	100	0	35	7.722	0	42.72	61	46
3/8	9.53	24.1	100	8.04	100	0	35	5.226	0	40.23	56	40
# 4	4.75	5.56	99.35	6.03	99.5	0	35	3.9195	0	38.69	44	27
8	2.38	2.9	95.72	4.81	99	0	34	3.1265	0	36.63	34	19
16	1.19	2.1	85.57	4.34	88.91	0	30	2.821	0	32.77	27	13
30	0.59	1.31	61.66	3.94	72.63	0	22	2.561	0	24.14	21	9
50	0.295	0.63	22.49	3.21	50.01	0	8	2.0865	0	9.96	15	6
100	0.149	0.22	4.04	1.39	11.33	0	1	0.9035	0	2.32	13	4
200	0.08	0.03	-0.07	0.97	-3.34	0	0	0.6305	0	0.61	0	0

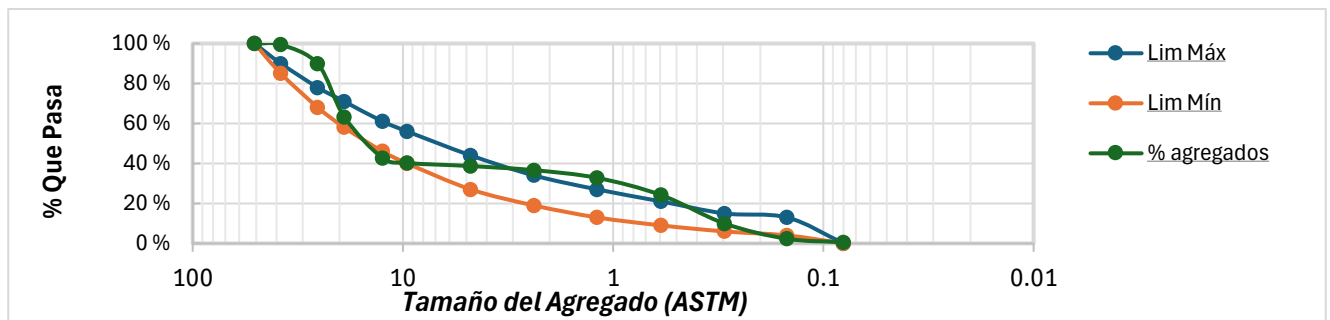


Figura 20. Curva Granulométrica Mezcla 5 Reemplazo total del agregado grueso

Tabla 26. Proporciones finales Mezcla 5 Reemplazo total del agregado grueso

DOCIFICACIÓN MEZCLA 5								
Vr	0.6701	m ³	VOLÚMEN CILINDRO MEZCLA HORMIGÓN					
PESO ESPECÍFICO APARENTE DE LOS AGREGADOS			Volumen Cilindro 15X30 Mezcla 5 (Resistencia)			Volumen Cilindro 10X20 Mezcla 5 (Durabilidad)		
Ga	1.089	g/cm ³	Agua	6.714	Kg	Agua	0.995	Kg
Ga	1088.90	kg/m ³	Cemento	14.359	Kg	Cemento	2.127	Kg
Peso total de los agregados	729.7	kg	Agregado Grueso Pómez	17.350	Kg	Agregado Grueso Pómez	2.570	Kg
Peso agregado grueso pómez	474.29	kg	Agregado Arena	9.345	Kg	Agregado Arena	1.384	Kg
Peso agregado Arena	255.386	kg	PROPORCIONES FINALES					
AJUSTE POR HUMEDAD			Agua			183.55	Kg	
Peso húmedo Grueso Pómez	474.30	kg	Cemento			392.55	Kg	
Peso húmedo Arena	255.46	kg	Agregado Grueso Pómez			474.300	Kg	
APORTE DE AGUA			Agregado Arena			255.46	Kg	
Agregado Grueso Pómez	3.54	kg						
Agregado Arena	0.0011	kg						
Total	3.55	kg						
Aporte de agua	183.55	kg						

Tabla 27. Método Gráfico Mezcla 6 Reemplazo parcial de los agregados grueso y fino

Mezcla 6 Reemplazo Parcial de ambos	%de cada agregado	GRAVA	ARENA	GRUESO PÓMEZ	POLVO PÓMEZ
		40	10	40	10

MÉTODO GRÁFICO												
Tamiz	Abertura	Grava % PASA	Arena % PASA	Grueso % PASA	Polvo % PASA	%Grava	%Arena	%Grueso Pómez	%Polvo Pómez	Mezcla 6	Lim Superior	Lim Inferior
2 ½	62.5					40	10	40	10		100	100
2	50.8	100	100	100	100	40	10	40	10	100	100	100
1 ½	38.1	100	100	99.10	100	40	10	39.64	10	100	90	85
1	25.4	100	100	84.22	100	40	10	33.688	10	94	78	68
¾	19	86.09	100	43.51	100	34.436	10	17.404	10	71.84	71	58
½	12.5	41.45	100	11.88	100	16.58	10	4.752	10	41.33	61	46
3/8	9.53	24.1	100	8.04	100	9.64	10	3.216	10	32.86	56	40
# 4	4.75	5.56	99.35	6.03	99.5	2.224	10	2.412	9.95	24.52	44	27
8	2.38	2.9	95.72	4.81	99	1.16	10	1.924	9.9	22.56	34	19
16	1.19	2.1	85.57	4.34	88.91	0.84	9	1.736	8.891	20.02	27	13
30	0.59	1.31	61.66	3.94	72.63	0.524	6	1.576	7.263	15.53	21	9
50	0.295	0.63	22.49	3.21	50.01	0.252	2	1.284	5.001	8.79	15	6
100	0.149	0.22	4.04	1.39	11.33	0.088	0	0.556	1.133	2.18	13	4
200	0.08	0.03	-0.07	0.97	-3.34	0.012	0	0.388	-0.334	0.06	0	0

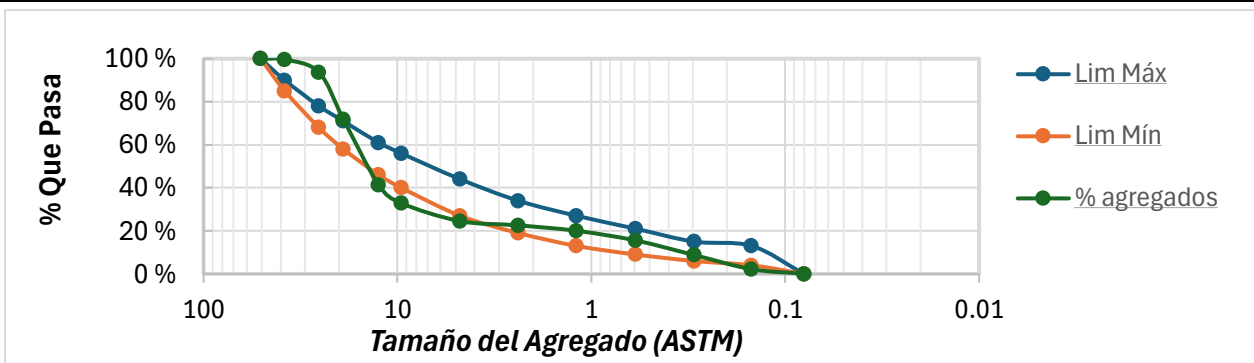


Figura 21. Curva Granulométrica Mezcla 6 Reemplazo parcial del agregado grueso y fino

Tabla 28. Proporciones finales Mezcla 6 Reemplazo parcial del agregado grueso y fino.

DOCIFICACIÓN MEZCLA 6								
Vr	0.670	m ³	VOLÚMEN CILINDRO MEZCLA HORMIGÓN					
PESO ESPECÍFICO APARENTE DE LOS AGREGADOS			Volumen Cilindro 15X30 Mezcla 6 (Resistencia)			Volumen Cilindro 10X20 Mezcla 6 (Durabilidad)		
Ga	1.392	g/cm ³	Agua	6.691	Kg	Agua	0.991	Kg
Ga	1392.19	kg/m ³	Cemento	14.359	Kg	Cemento	2.127	Kg
Peso total de los agregados	932.9	kg	Agregado Grava	13.652	Kg	Agregado Grava	2.023	Kg
Peso agregado Grava	373.16	kg	Agregado Grueso Pómez	13.651	Kg	Agregado Grueso Pómez	2.022	Kg
Peso agregado Grueso Pómez	373.162	kg	Agregado Arena	3.414	Kg	Agregado Arena	0.506	Kg
Peso del agregado Arena	93.291	kg	Agregado Polvo Pómez	3.413	Kg	Agregado Polvo Pómez	0.506	Kg
Peso del agregado Polvo Pómez	93.291	kg	PROPORCIONES FINALES					
AJUSTE POR HUMEDAD			Agua			182.91		Kg
Peso húmedo Grava	373.214	kg	Cemento			392.55		Kg
Peso húmedo Grueso Pomez	373.17	kg	Agregado Grava			373.214		Kg
Peso húmedo Arena	93.32	kg	Agregado Grueso Pómez			373.17		Kg
Peso húmedo Polvo Pómez	93.30	kg	Agregado Arena			93.32		kg
APORTE DE AGUA			Agregado Polvo Pómez			93.30		kg
Agregado Grava	0.10	kg						
Agregado Grueso Pómez	2.79	kg						
Agregado Arena	0.00	kg						
Agregado Polvo Pómez	0.02	kg						
Total	2.91	kg						
Aporte de agua	182.91	kg						

Tabla 29. Método Gráfico Mezcla 7 Reemplazo total de los agregados grueso y fino

Mezcla 7 Reemplazo	% de cada agregado	GRAVA	ARENA	GRUESO POMEZ	POLVO POMEZ							
Total de ambos		0	0	60	40	MÉTODO GRÁFICO (1M ³)						
Tamiz	Abertura	Grava % PASA	Arena % PASA	Grueso % PASA	Polvo % PASA	%Grava	%Are na	%Grueso Pómezo	%Polv Pómez	Mezcla 7	Lim Superior	Lim Inferior
						0	0	60	40			
2	50.8	100	100	100	100	0	0	60	40	100	100	100
1 ½	38.1	100	100	99.10	100	0	0	59.46	40	99	90	85
1	25.4	100	100	84.22	100	0	0	50.532	40	91	78	68
¾	19	86.09	100	43.51	100	0	0	26.106	40	66.11	71	58
½	12.5	41.45	100	11.88	100	0	0	7.128	40	47.13	61	46
3/8	9.53	24.1	100	8.04	100	0	0	4.824	40	44.82	56	40
# 4	4.75	5.56	99.35	6.03	99.5	0	0	3.618	39.8	43.42	44	27
8	2.38	2.9	95.72	4.81	99	0	0	2.886	39.6	42.49	34	19
16	1.19	2.1	85.57	4.34	88.91	0	0	2.604	35.564	38.17	27	13
30	0.59	1.31	61.66	3.94	72.63	0	0	2.364	29.052	31.42	21	9
50	0.295	0.63	22.49	3.21	50.01	0	0	1.926	20.004	21.93	15	6
100	0.149	0.22	4.04	1.39	11.33	0	0	0.834	4.532	5.37	13	4
200	0.08	0.03	-0.07	0.97	-3.34	0	0	0.582	-1.336	-0.75	0	0

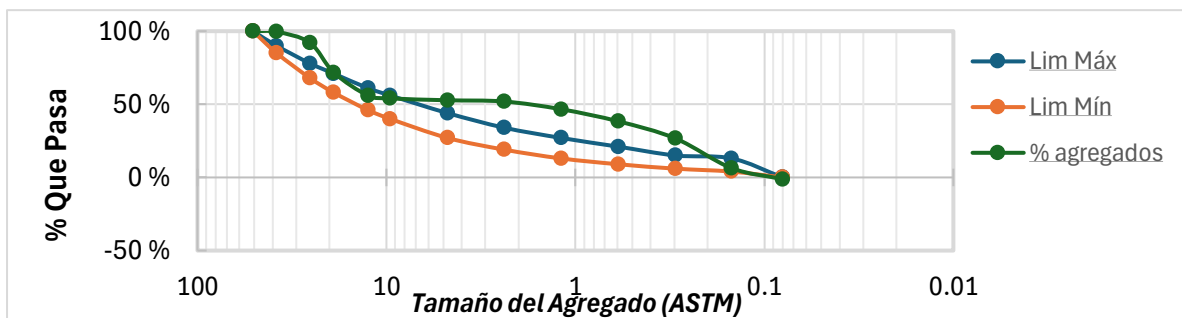


Figura 22. Curva Granulométrica Mezcla 7 Reemplazo total de los agregados

Tabla 30. Proporciones finales Mezcla 7 Reemplazo total de los agregados

DOCIFICACIÓN MEZCLA 7								
Vr	0.6854	m ³	VOLÚMEN CILINDRO MEZCLA HORMIGÓN					
PESO ESPECÍFICO APARENTE DE LOS AGREGADOS			Volumen Cilindro 15x30 Mezcla 7 (Resistencia)			Volumen Cilindro 10x20 Mezcla 7 (Durabilidad)		
Ga	1.096	g/cm ³	Agua	6.291	Kg	Agua	0.932	Kg
Ga	1095.76	kg/m ³	Cemento	13.403	Kg	Cemento	1.986	Kg
Peso total de los agregados			Agregado Grueso Pómez			Agregado Grueso Pómez		
	751.0	kg		19.231	Kg		2.849	Kg
Peso agregado Grueso Pómez			Agregado Polvo Pómez			Agregado Polvo Pómez		
	525.72	kg		8.243	Kg		1.221	Kg
Peso agregado Polvo Pómez			PROPORCIONES FINALES					
AJUSTE POR HUMEDAD			Agua			171.98 Kg		
Peso húmedo Grueso Pómez			Cemento			366.40 Kg		
	525.736	kg	Agregado Grueso Pómez			525.736 Kg		
Peso húmedo Polvo Pómez			Agregado Polvo Pómez			225.33 Kg		
	225.33	kg						
APORTE DE AGUA								
Agregado Grueso Pómez								
	3.93	kg						
Agregado Polvo Pómez								
	0.05	kg						
Total								
	3.98	kg						
Aporte de agua								
	171.98	kg						

Tabla 31. Método Gráfico Mezcla 8 Reemplazo total de los agregados

Mezcla 8 Reemplazo Total de ambos	% de cada agregado	GRAVA	ARENA	GRUESO PÓMEZ	POLVO PÓMEZ							
		0	0	50	50							
MÉTODO GRÁFICO												
Tamiz	Abertura	Grava % PASA	Arena % PASA	Grueso % PASA	Polvo % PASA	%Grava	%Arena	% Grueso Pómez	% Polvo Pómez	Mezcla 8	Lim Superior	Lim Inferior
						0	0	50	50			
2	50.8	100	100	100	100	0	0	50	50	100	100	100
1 ½	38.1	100	100	99.10	100	0	0	49.55	50	100	90	85
1	25.4	100	100	84.22	100	0	0	42.11	50	92	78	68
¾	19	86.09	100	43.51	100	0	0	21.755	50	71.76	71	58
½	12.5	41.45	100	11.88	100	0	0	5.94	50	55.94	61	46
3/8	9.53	24.1	100	8.04	100	0	0	4.02	50	54.02	56	40
# 4	4.75	5.56	99.35	6.03	99.5	0	0	3.015	49.75	52.77	44	27
8	2.38	2.9	95.72	4.81	99	0	0	2.405	49.5	51.91	34	19
16	1.19	2.1	85.57	4.34	88.91	0	0	2.17	44.455	46.63	27	13
30	0.59	1.31	61.66	3.94	72.63	0	0	1.97	36.315	38.29	21	9
50	0.295	0.63	22.49	3.21	50.01	0	0	1.605	25.005	26.61	15	6
100	0.149	0.22	4.04	1.39	11.33	0	0	0.695	5.665	6.36	13	4
200	0.08	0.03	-0.07	0.97	-3.34	0	0	0.485	-1.67	-1.19	0	0

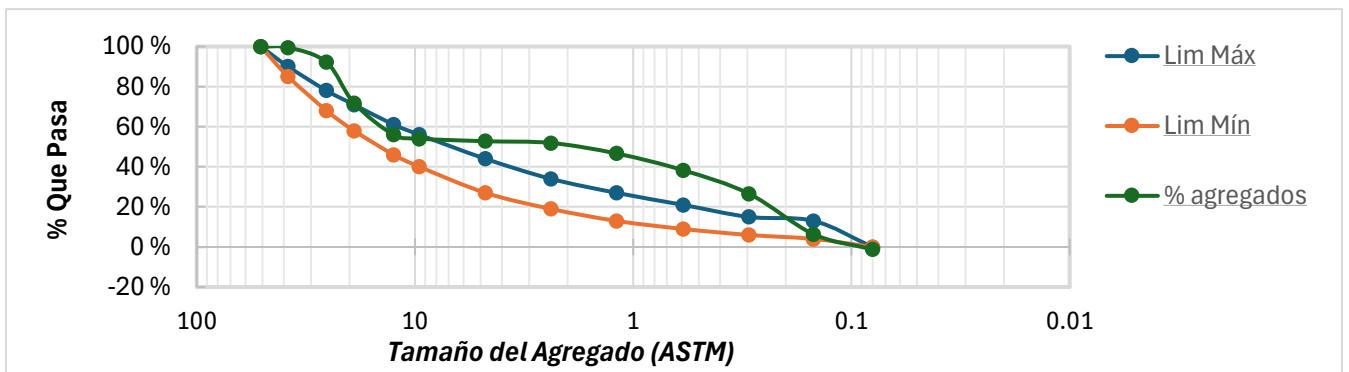


Figura 23. Curva Granulométrica Mezcla 8 Reemplazo total de los agregados

Tabla 32. Proporciones finales Mezcla 8 reemplazo total de los agregados

DOCIFICACIÓN MEZCLA 8								
V _r	0.6854	m ³	VOLÚMEN CILINDRO MEZCLA HORMIGÓN					
PESO ESPECÍFICO APARENTE DE LOS AGREGADOS			Volumen Cilindro 15x30 Mezcla 8 (Resistencia)			Volumen Cilindro 10x20 Mezcla 8 (Durabilidad)		
G _a	1.193	g/cm ³	Agua	6.304	Kg	Agua	0.934	Kg
G _a	1193.17	kg/m ³	Cemento	13.403	Kg	Cemento	1.986	Kg
Peso total de los agregados	817.8	kg	Agregado Grueso Pómez	20.941	Kg	Agregado Grueso Pómez	3.102	Kg
Peso agregado Grueso Pómez	572.46	kg	Agregado Polvo Pómez	8.975	Kg	Agregado Polvo Pómez	1.330	Kg
Peso agregado Polvo Pómez	245.340	kg	PROPORCIONES FINALES					
AJUSTE POR HUMEDAD			Agua			172.33	Kg	
Peso húmedo Grueso Pómez	572.476	kg	Cemento			366.40	Kg	
Peso húmedo Polvo Pómez	245.36	kg	Agregado Grueso Pómez			572.476	Kg	
APORTE DE AGUA			Agregado Polvo Pómez			245.36	Kg	
Agregado Grueso Pómez	4.28	kg						
Agregado Polvo Pómez	0.05	kg						
Total	4.33	kg						
Aporte de agua	172.33	kg						

3.7. Análisis de los diseños de mezcla mediante el método gráfico

El método gráfico permitió verificar visualmente que la combinación de agregados seleccionada para cada mezcla produzca una granulometría continua y bien graduada, ubicada dentro de los límites máximo y mínimo establecidos por la norma. Para cada diseño se calculó el porcentaje acumulado que pasa en cada tamiz, multiplicando el porcentaje que pasa de cada agregado individual por su fracción de participación dentro de la mezcla total. (Sánchez de Guzmán, 2001)

El volumen absoluto y el peso de los agregados, se determinaron de la siguiente manera:

$$V_r = 1.000 - (V_c + V_a + A) \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

V_r = Volumen absoluto de los agregados, en l/m³

V_c = Volumen absoluto del cemento, en l/m³

V_a = Volumen absoluto del agua, en l/cm³

A = Volumen absoluto del contenido de aire, en l/cm³

$$G_a = \frac{(G_{ag} + G_{af})}{(G_{ag} * n + G_{af} * m)} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

$G_{ag} + G_{af}$ = Peso específico aparente de los agregados grueso y fino, en g/cm^3

n = Proporción de agregado fino en la mezcla de agregados expresada en tanto por uno

m = Proporción de agregado grueso en la mezcla de agregados expresada en tanto por uno

$$P_r = V_r * G_a \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

P_r = Peso seco de los agregados, en kg/m^3

V_r = Volumen absoluto de los agregados, en l/m^3

G_a = Peso específico aparente de la mezcla de los dos agregados, calculado en la Ecuación 3

$$P_{ag} = P_r * m \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

P_{ag} = Peso seco del agregado grueso, en kg/m^3

$$P_{af} = P_r * n \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

P_{af} = Peso seco del agregado fino, en kg/m^3

Para analizar el ajuste de humedad y el aporte de agua, se toman los valores de humedad y absorción de cada uno de los agregados, en el caso de las mezclas donde se utilizan más de dos agregados, se optó por realizar un promedio entre el contenido de agua, tanto de la dosificación convencional, como de la liviana, de igual forma se analizó el contenido de cemento.

En todos los casos, los porcentajes de sustitución fueron seleccionados buscando que la curva granulométrica resultante se mantuviera lo más cercana posible a la zona central entre los límites máximo y mínimo, garantizando así mezclas técnicamente válidas para su elaboración y posterior ensayo en laboratorio.

Ajuste del contenido de agua durante el mezclado

Durante el proceso de elaboración de los cilindros, se observó que todas las mezclas presentaban una consistencia excesivamente seca, lo que dificultaba su trabajabilidad y correcta compactación en los moldes. Esta condición se atribuye principalmente a la elevada capacidad de absorción de la piedra pómez gruesa, la cual, a pesar del proceso de pre-humedecimiento realizado, continuó demandando agua adicional durante el mezclado. En consecuencia, fue necesario realizar un ajuste en el contenido de agua, únicamente en las 7 mezclas que se reemplazan los agregados, incorporando 6.5 kg adicionales de agua respecto a la dosificación teórica calculada. Para la mezcla de control no se le agrego más de la calculada.

Este ajuste inevitablemente modificó la relación agua-cemento efectiva de cada mezcla, lo que debe considerarse como un factor determinante al momento de analizar e interpretar los resultados de resistencia obtenidos. Un incremento en la relación agua-cemento produce un aumento en la porosidad de la pasta endurecida, lo que se traduce en una reducción de la resistencia mecánica del hormigón respecto a los valores teóricos de diseño. Este comportamiento es consistente con lo reportado en la literatura, donde diversos autores señalan que el control del agua efectiva representa el mayor desafío técnico al trabajar con agregados livianos de alta absorción como la piedra pómez (Loaiza, 2015) (Parhizkar et al., 2012).

3.8. Cierre de la etapa de diseño de mezclas

Una vez obtenidas las dosificaciones de las ocho mezclas de hormigón mediante el método gráfico, se procedió a la elaboración de los cilindros de prueba en el Laboratorio de Suelos de la Universidad del Azuay. Para cada mezcla se fabricaron cilindros de dos dimensiones: cilindros de 15 cm de diámetro por 30 cm de altura destinados a los ensayos de resistencia a la compresión y tracción, y cilindros de 10 cm de diámetro por 20 cm de altura destinados a los ensayos de durabilidad.

Previo al mezclado, los agregados de piedra pómez gruesa y polvo de pómez fueron sometidos a un proceso de pre-humedecimiento, con el fin de saturar sus poros y evitar que absorbieran el agua de amasado durante la mezcla, lo cual alteraría la relación agua-cemento efectiva y afectaría la trabajabilidad del hormigón fresco. Una vez elaborados y desmoldados tras 24 horas, los cilindros fueron sometidos a un proceso de curado por inmersión en agua hasta la edad de ensayo correspondiente.

Los ensayos de laboratorio planificados para evaluar el desempeño de cada mezcla son: resistencia a la compresión, resistencia a la tracción y ensayos de durabilidad mediante absorción y permeabilidad a los 7, 14 y 28 días de curado, respectivamente, mediante absorción y permeabilidad. Los resultados obtenidos se presentan en el Capítulo 4.

3.9. Fabricación y curado de cilindros

La fabricación y curado de los cilindros de hormigón se realizó siguiendo los lineamientos establecidos en la norma (NTE INEN 1576, 2011). Se elaboraron 9 cilindros por cada una de las ocho mezclas, para un total de 72 cilindros. De estos, 6 cilindros por mezcla correspondieron a dimensiones de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura, destinados a los ensayos de resistencia a la compresión y tracción indirecta, y 3 cilindros de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura, destinados al ensayo de durabilidad. Una vez elaborados, los cilindros fueron desmoldados a las 24 horas y sometidos a curado por inmersión en agua hasta la edad de ensayo correspondiente.



Figura 24. Cilindros de hormigón recién elaborados en moldes metálicos, previo al proceso de curado.

3.10. Ensayo de resistencia a la compresión

El ensayo de resistencia a la compresión se realizó siguiendo la norma (ASTM International C39M, 2015), sobre cilindros de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura. Para cada mezcla se destinó 1 cilindro por cada edad de ensayo, siendo las edades de rotura los 7, 14 y 28 días de curado, sumando un total de 24 cilindros para este ensayo. El ensayo consiste en aplicar una carga axial de compresión de forma continua y sin impacto sobre el cilindro hasta alcanzar su rotura, registrando la carga máxima soportada. La resistencia

a la compresión se obtiene dividiendo la carga de rotura para el área de la sección transversal del cilindro, expresándose el resultado en kg/cm².

$$f_c = P/A \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

P= fuerza máxima (kg)

A= área transversal del cilindro (cm²)

3.11. Ensayo de resistencia a tracción indirecta

El ensayo de tracción indirecta por hendimiento se realizó conforme a la norma (ASTM International C496, 2003) sobre cilindros de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura. Para cada mezcla se destinó 1 cilindro por cada edad de ensayo (7, 14 y 28 días), sumando un total de 24 cilindros. El ensayo consiste en aplicar una carga de compresión diametral sobre el cilindro colocado en posición horizontal, lo que genera esfuerzos de tracción perpendiculares al plano de carga que provocan la rotura por hendimiento. La resistencia a la tracción indirecta se calcula mediante la expresión:

$$f_t = \frac{2P}{(\pi * L * D)} \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde:

P= carga máxima de rotura (kgf)

L= longitud del cilindro (cm)

D= diámetro del cilindro (cm)

3.12. Ensayo de durabilidad: absorción de agua por capilaridad

El ensayo de durabilidad se realizó mediante la determinación del coeficiente de absorción de agua por capilaridad del hormigón endurecido, siguiendo el procedimiento establecido en la norma UNE 83982 (UNE 83982, 2008). Para cada mezcla se destinó un

cilindro por cada edad de ensayo (7, 14 y 28 días), sobre cilindros de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura, sumando un total de 24 cilindros.

Previo al ensayo, las probetas fueron acondicionadas según lo establecido en la norma UNE 83966 (UNE 83982, 2008). Una vez acondicionadas, se colocaron sobre una base de apoyo no absorbente en el interior de un recipiente impermeable con tapa hermética, introduciéndose agua hasta conseguir una lámina de 5 mm de altura en contacto con la cara inferior de la probeta. Durante el ensayo se registró la ganancia de masa de cada probeta a intervalos de tiempo establecidos por la norma (5 min, 10 min, 15 min, 30 min, 1 h, 2 h, 3 h, 4 h, 6 h, 24 h, 48 h, 72 h, 96 h), hasta alcanzar la constancia de masa. El coeficiente de absorción capilar K se expresó en $\text{kg/m}^2 \cdot \text{min}^{0.5}$ y se calculó mediante las expresiones establecidas en la norma.

Las muestras destinadas al estudio de absorción capilar correspondientes a los 7 días de curado tardaron un total de 15 días en alcanzar la masa constante, mientras que las muestras de 14 y 28 días de curado requirieron 12 días para alcanzar dicha condición

3.13. Equipos y materiales de laboratorio

A continuación, se presentan los principales equipos e instrumentos del Laboratorio de Ensayo de Materiales de la Universidad del Azuay utilizados durante el desarrollo experimental de la presente investigación, los cuales fueron empleados tanto en la elaboración de las mezclas de hormigón alivianado como en la ejecución de los ensayos de caracterización mecánica y de durabilidad.



Figura 25. Máquina de ensayo Resistencia a la Compresión



Figura 26. Máquina de ensayo Resistencia a la Tracción



Figura 27. Balanza de pesaje de probetas grandes



Figura 28. Balanza analítica con precisión de 0.01 g

La balanza de la figura 29 nos ayudó con los pesos de los cilindros por absorción capilar debido a su precisión de 0.01 g, incluido la toma de pesos de los agregados para los ensayos de granulometría y pesos específicos.



Figura 29. Horno de secado Humboldt



Figura 30. Concretera para la elaboración del mezclado



Figura 31. Recipiente utilizado en el ensayo de durabilidad

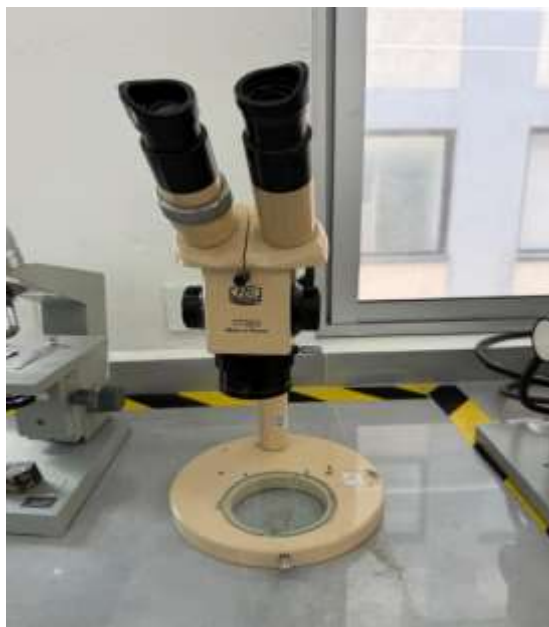


Figura 32. Microscopio utilizado para la caracterización morfológica de la piedra pómez

4. Resultados

En el presente capítulo se exponen y analizan los resultados obtenidos durante el desarrollo de la investigación, de acuerdo con la metodología planteada. Se presentan los datos correspondientes a los ensayos realizados sobre las mezclas de hormigón convencional y hormigón alivianado elaboradas con piedra pómez, con el fin de evaluar su desempeño mecánico y su comportamiento frente a los parámetros de durabilidad considerados en el estudio.

Asimismo, los resultados obtenidos son comparados y discutidos en función de las características físicas y mecánicas de los materiales empleados, permitiendo identificar la influencia de la sustitución de los agregados convencionales por piedra pómez en las propiedades del hormigón.

4.1. Resultados de caracterización de los agregados

Los ensayos de peso específico permitieron determinar la densidad de los agregados que se emplearon en el diseño de las mezclas. La grava convencional presentó valores de peso específico mayores a los del material de pómez, lo que evidencia una mayor densidad y menor porosidad frente al pómez. Por su parte, el pómez grueso registró valores considerablemente bajos de peso específico, característica común en agregados ligeros debido a su morfología vesicular.

Asimismo, el pómez grueso presentó una absorción de agua significativamente elevada, del 75%, lo que confirma su alta porosidad y capacidad de retención de agua. Este resultado incide directamente en la dosificación de las mezclas, ya que incrementa la demanda de agua y afecta tanto la trabajabilidad como la resistencia del hormigón resultante.

Los resultados del ensayo de peso volumétrico suelto confirman la marcada diferencia de densidad entre los agregados convencionales y los agregados de pómez: mientras la grava y la arena convencionales presentan valores de 2.854 y 1.267 g/cm³ respectivamente, el pómez grueso registra apenas 0.361 g/cm³, valor consistente con el rango de 350 a 800 kg/m³ reportado para este material de origen volcánico. Esta propiedad es un parámetro de entrada directo para el método gráfico de diseño de mezclas ACI 211 (ACI Committee 211, 1998), ya que determina el volumen de agregado grueso requerido por metro cúbico de hormigón.

Tabla 33. Tabla resumen de las propiedades físicas de los agregados analizados

PESOS ESPECÍFICOS/VOLUMÉTRICOS			
Agregados	Peso Aparente	Peso Volumétrico Suelto	% Absorción
Grava	2.668 g/cm ³	2.854 g/cm ³	4%
Arena	2.663 g/cm ³	1.267 g/cm ³	3%
Pómez Grueso	0.826 g/cm ³	0.361 g/cm ³	75%
Polvo Pómez	2.148 g/cm ³	0.623 g/cm ³	3%

4.2. Resistencia a la compresión

Los ensayos de resistencia a la compresión se realizaron conforme a la norma ASTM C39M (ASTM International C39M, 2015), sobre cilindros de 15×30 cm, ensayando un cilindro por mezcla a cada edad de curado (7, 14 y 28 días). Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 34.

Tabla 34. Resistencia a la compresión por mezcla a los 7,14 y 28 días

Mezcla	Sustitución	f'c 7 días (kg/cm ²)	f'c 14 días (kg/cm ²)	f'c 28 días (kg/cm ²)
Mezcla 1	(60:40)	63.65	100.30	138.19
Mezcla 2	(65:25:10)	46.36	74.71	87.60
Mezcla 3	(60:40)	42.52	54.79	70.30
Mezcla 4	(35:45:20)	29.40	31.06	40.25
Mezcla 5	(65:35)	34.43	39.16	39.41
Mezcla 6	(40:10:40:10)	31.47	37.80	46.36
Mezcla 7	(60:40)	27.09	44.64	51.24
Mezcla 8	(50:50)	34.62	37.66	45.95

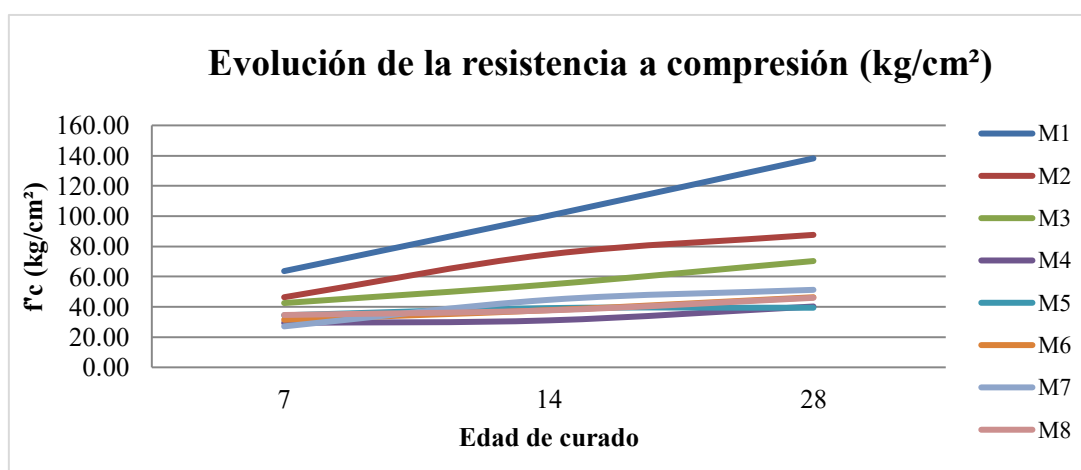


Figura 33. Comparativa de evolución de Resistencia a la Compresión de las 8 mezclas.

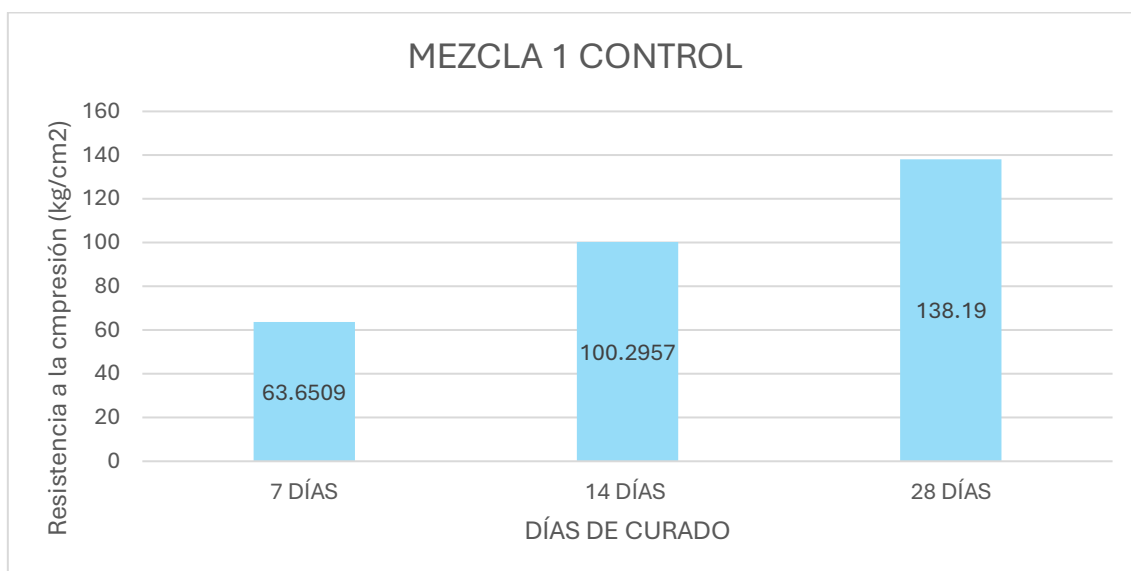


Figura 34. Resistencia a la Compresión de la mezcla de control a diferentes edades

La mezcla de control alcanzó 138.19 kg/cm² a los 28 días, frente a una resistencia de diseño de 295 kg/cm², podríamos decir que alcanzó un 47% de lo proyectado. A diferencia de las Mezclas M2-M8, en la mezcla 1 de control no se realizó ningún ajuste de agua durante el mezclado, por lo que este déficit de resistencia no se le atribuye al exceso de agua en el mezclado. Una hipótesis más plausible se relaciona con las características granulométricas de los agregados, como se planteó en el Capítulo 3, la arena convencional presento un módulo de finura de 2.32, ubicándose en el límite inferior del rango recomendado para hormigón convencional. Un agregado fino con mayor proporción de partículas finas incrementa la superficie específica para cubrir con pasta y por lo tanto, la demanda de agua para una trabajabilidad dada, si esta demanda no fue compensada en el diseño, es bastante probable que el asentamiento de la mezcla de control haya sido menor al de diseño (10cm).

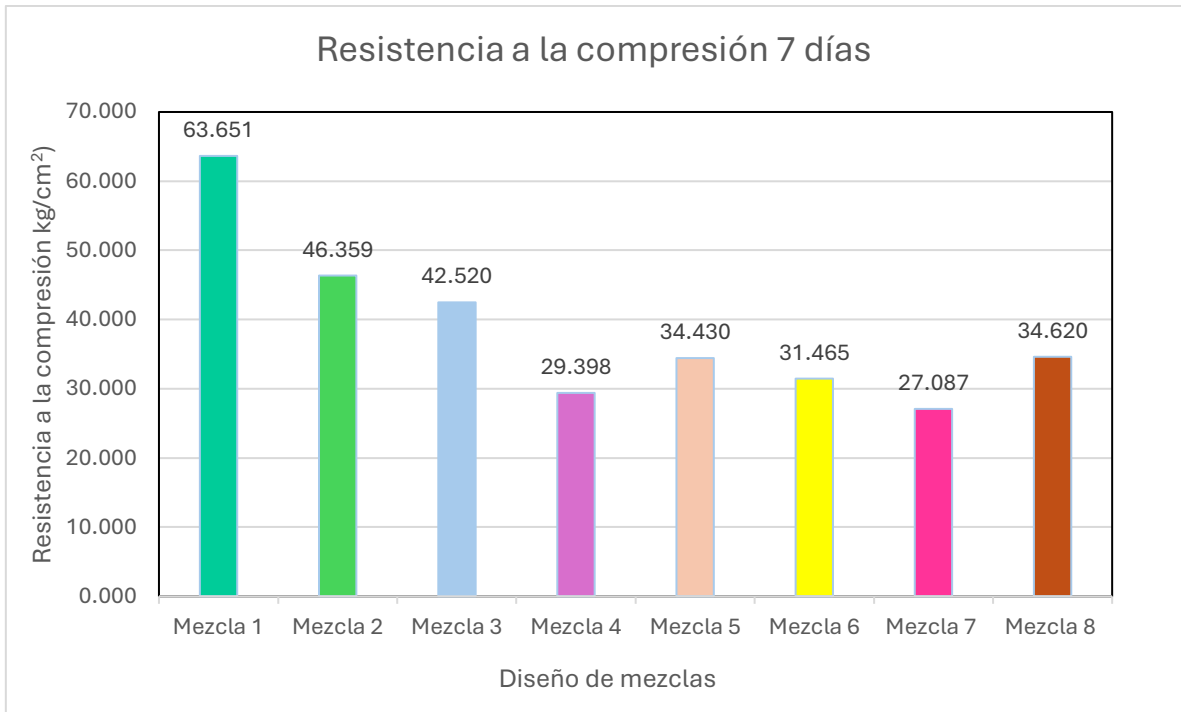


Figura 35. Resistencia a la Compresión M1-M8 a los 7 días de curado

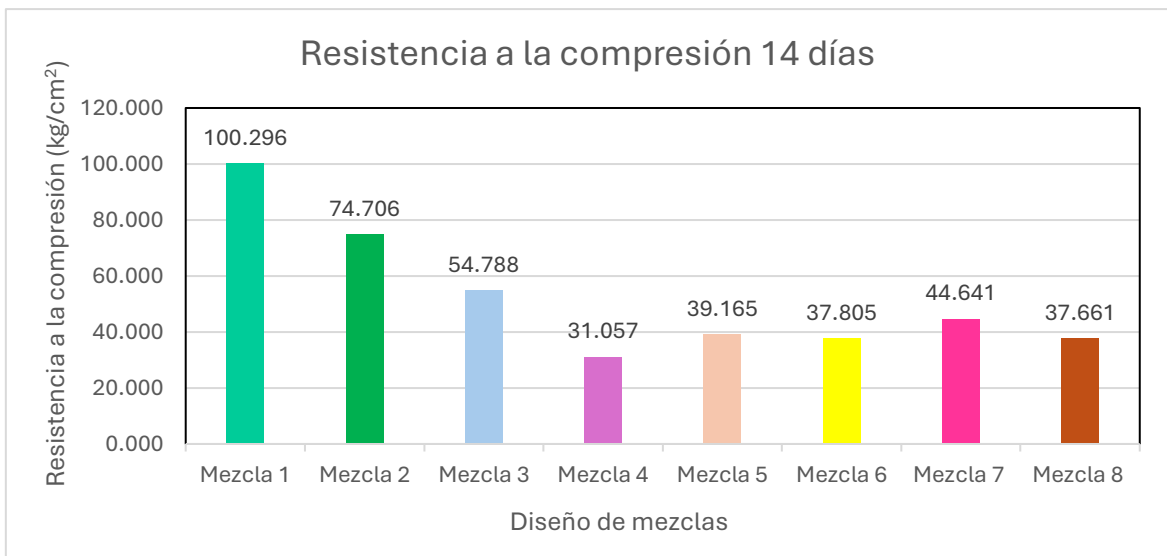


Figura 36. Resistencia a la Compresión M1-M8 a los 14 días de curado.

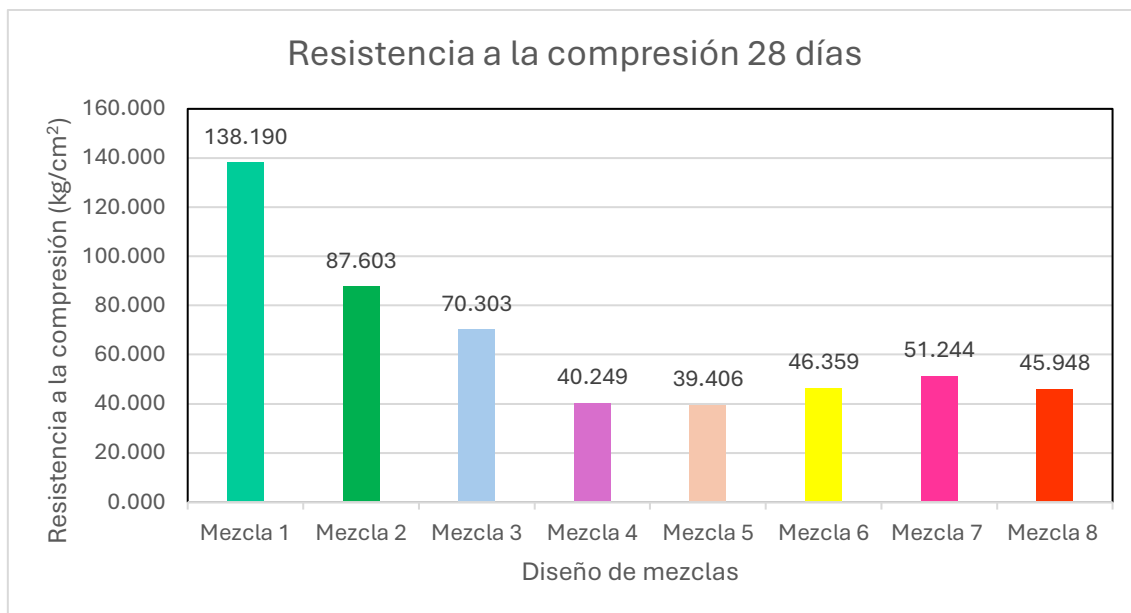


Figura 37. Resistencia a la Compresión M1-M8 a los 28 días de curado.

Como punto importante, podemos observar que la resistencia disminuye conforme aumenta el porcentaje de sustitución, pero no de forma proporcional entre agregados: el reemplazo del agregado grueso tiene un impacto mucho más severo que el del agregado fino para un mismo nivel de sustitución. La mezcla con sustitución parcial de fino (M2) alcanzó 87.60kg/cm² a los 28 días, mientras que la mezcla con el reemplazo total del fino (M3) alcanzó 70.30 kg/cm². Este comportamiento se puede atribuir al incremento de partículas porosas dentro de la mezcla, lo cual aumenta la demanda de agua, justificando así el hecho de que incrementamos 6.5 kg de agua más a la mezcla, para que sea trabajable, este es un factor clave para la reducción de la resistencia, es importante mencionar que la mezcla 2 y mezcla 3 son las que mayor resistencia tienen, por el hecho de que su mezcla posee agregado grueso convencional y su peso oscila entre los 11 kg por cilindro, muy similar al peso del cilindro de la mezcla de control que tiene un peso de 12 kg aproximadamente. (Gaus et al., 2022) observaron que el uso de arena de pómez como reemplazo del agregado fino permite reducir el peso volumétrico y disminuir la resistencia de manera importante y si no se controla adecuadamente la relación agua-cemento.

El efecto del reemplazo del agregado grueso fue más severo. Las mezclas con sustitución parcial y total del agregado grueso (M4-M5) presentaron resistencias de 40.25 kg/cm² y 39.41 kg/cm², respectivamente, a los 28 días, se reduce un 70.9%, prácticamente el doble,

comparado con las mezclas de reemplazo del fino. Esto tiene sentido con el rol estructural que cumple el agregado grueso (grava) dentro del esqueleto granular del hormigón: al ser el componente que soporta la mayor parte de la carga de compresión, su sustitución por un material con un peso específico tan bajo como el pómez grueso (0.826 g/cm^3 frente a valores típicos de 2.668 g/cm^3 de la grava) y una absorción del 75% afecta de manera mucho más directa a la resistencia.

Otro hallazgo interesante es el efecto de sustitución entre la Mezcla 4 y Mezcla 5: pasar de reemplazar un 35% de grava y un 45% de pómez a 65% de sustitución del agregado grueso pómez prácticamente no modifica la resistencia, una variación de apenas 2%. Esto sugiere que, una vez que el pómez grueso pasa a ser el componente dominante de reemplazo, se convierte en el factor limitante de la resistencia, el remanente de grava convencional deja de tener un peso significativo sobre el resultado.

En la mezcla con reemplazo parcial de ambos agregados (M6), alcanza una resistencia de 46.36 kg/cm^2 , un valor prácticamente igual al de la Mezcla 8 que es 45.95 kg/cm^2 , a pesar de que esta última corresponde a un reemplazo total de ambos agregados. Ambas mezclas, sin embargo, quedan por debajo de la Mezcla 7 con un valor de 51.24 kg/cm^2 , que también es 100% liviana. Una explicación adicional, es que la Mezcla 7 mantiene una proporción grueso: fino de 60:40, la misma relación volumétrica que la mezcla de control. Esto sugiere que la relación granulométrica entre las proporciones gruesa y fina influye en el acomodo de partículas y en la continuidad de la matriz cementante. La mezcla 7, al conservar una relación grueso similar a la mezcla de control, presentó un desempeño relativamente más favorable dentro del grupo de hormigones totalmente livianos.

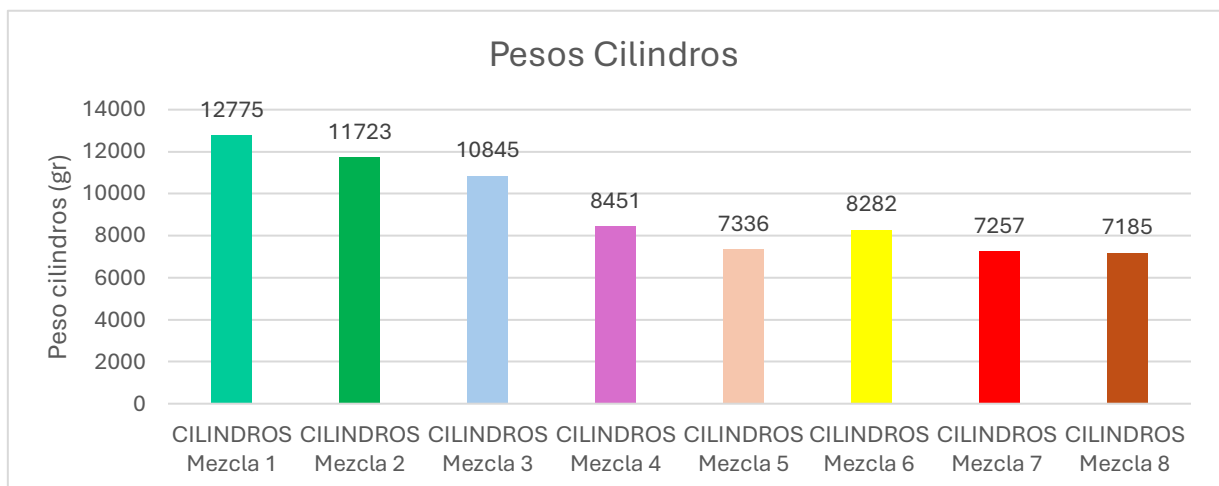


Figura 38. Comparación de pesos de todas las mezclas estudiadas (M1-M8)

En términos de viabilidad técnica, los resultados permiten afirmar que la piedra pómez es efectiva para reducir la densidad del hormigón y producir mezclas alivianadas; sin embargo, las resistencias obtenidas no permiten clasificar las mezclas como hormigón liviano estructural bajo los criterios normativos usuales. Por tanto, su aplicación sería más adecuada en elementos no estructurales, elementos de cerramiento, rellenos, paneles livianos o componentes donde la reducción de peso sea prioritaria frente a la resistencia a compresión. Para alcanzar aplicaciones estructurales, se recomienda rediseñar la mezcla mediante un mejor control de humedad del agregado, ajuste de la relación agua-cemento efectiva, posible incremento del contenido de cemento y evaluación del uso de aditivos compatibles con agregados altamente absorbentes.

(Parhizkar et al., 2012) señalan que mezclas con alto contenido de cemento y baja relación agua-cemento alcanzaron hasta 30.2 MPa, cumpliendo los requisitos normativos para hormigón alivianado estructural muy por encima de los resultados obtenidos nuestra investigación. Los autores destacan que la dosificación de cemento es el parámetro fundamental para el desempeño de este tipo de hormigón: un mayor contenido de cemento no solo mejora la resistencia mecánica, sino que reduce drásticamente la absorción capilar, la penetración de cloruros y la expansión por sulfatos, contrarrestando los efectos de la alta absorción propia de la piedra pómez. Esta diferencia refuerza lo discutido para la mezcla de control: la brecha frente a los valores de referencia de la literatura parece estar más asociada a la dosificación de cemento y a la relación agua-cemento efectiva de este estudio que al concepto de sustitución de pómez en sí misma, y constituye la base de la principal recomendación para investigaciones futuras.

4.3. Resistencia a la tracción

Los ensayos de resistencia a la tracción indirecta por hendimiento se realizaron conforme a la norma ASTM C496M (ASTM International C496, 2003), sobre cilindros de 15×30 cm, ensayando un cilindro por mezcla a cada edad de curado (7, 14 y 28 días). Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 35.

Tabla 35. Resistencia a la tracción indirecta a los 7,14,28 días por mezcla

Mezcla	Sustitución	f'c 7 días (kg/cm ²)	f'c 14 días (kg/cm ²)	f'c 28 días (kg/cm ²)
Mezcla 1	(60:40)	8.25	13.94	17.3
Mezcla 2	(65:25:10)	8.03	9.57	12.99
Mezcla 3	(60:40)	5.98	6.37	12.09
Mezcla 4	(35:45:20)	5.97	5.14	8.31
Mezcla 5	(65:35)	6.97	7.52	9.66
Mezcla 6	(40:10:40:10)	6.14	9.67	10.58
Mezcla 7	(60:40)	7.48	8.07	10.14
Mezcla 8	(50:50)	7.24	8.00	9.82

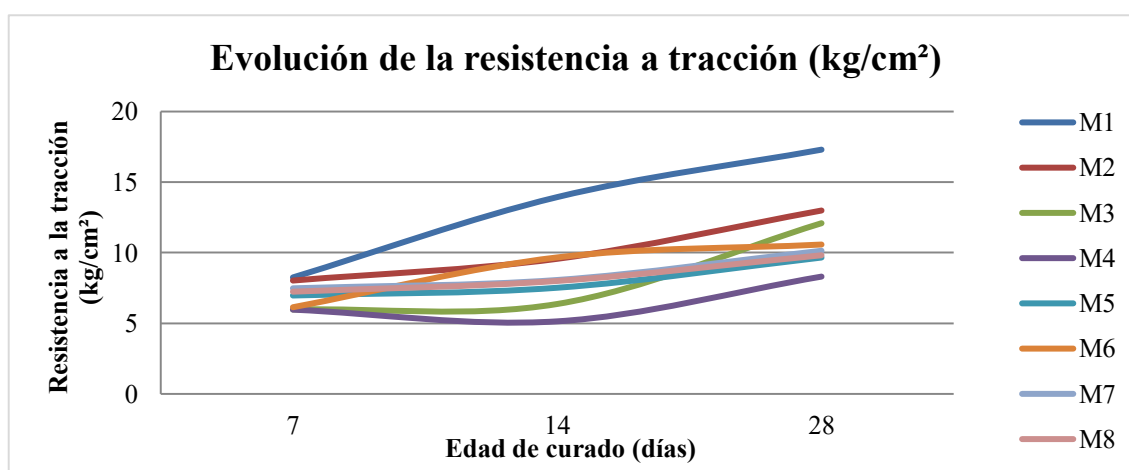


Figura 39. Comparativa de evolución de la Resistencia a la tracción de las 8 mezclas

Al igual que en la resistencia a la compresión, los resultados confirman que la resistencia a la tracción indirecta disminuye conforme aumenta el porcentaje de sustitución, y que el reemplazo del agregado grueso tiene un impacto proporcionalmente mayor que el del agregado fino. La mezcla de control (M1) presentó la mayor resistencia a la tracción en todas las edades de curado, alcanzando un valor de 17.13 kg/cm² a los 28 días. Este comportamiento se asocia directamente con la presencia de agregados convencionales, los cuales poseen mayor densidad, rigidez y capacidad de transferencia de esfuerzos dentro de la matriz cementante.

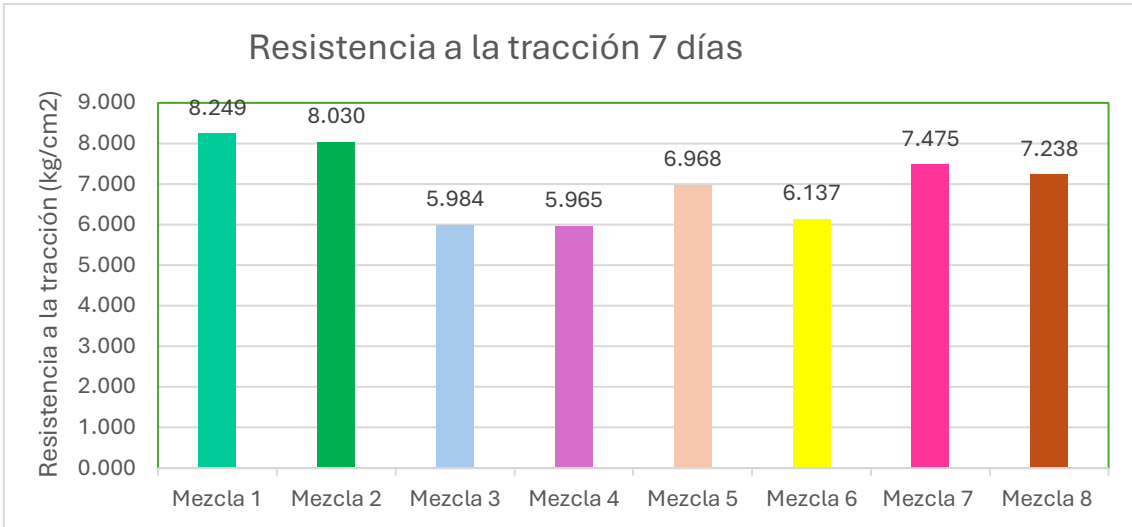


Figura 40. Resistencia a la Tracción M1-M8 a los 7 días de curado

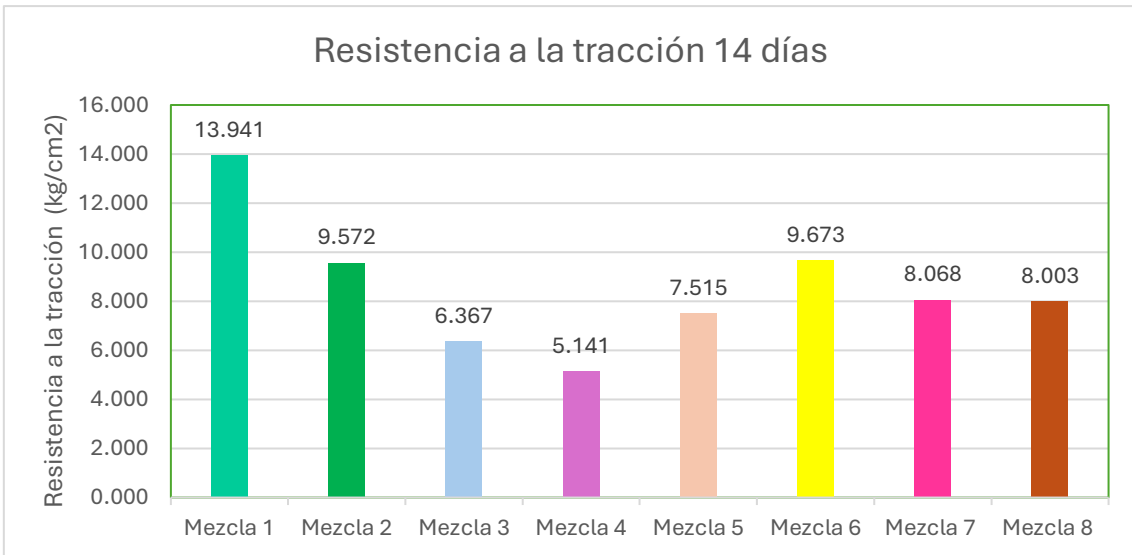


Figura 41. Resistencia a la Tracción M1-M8 a los 14 días de curado

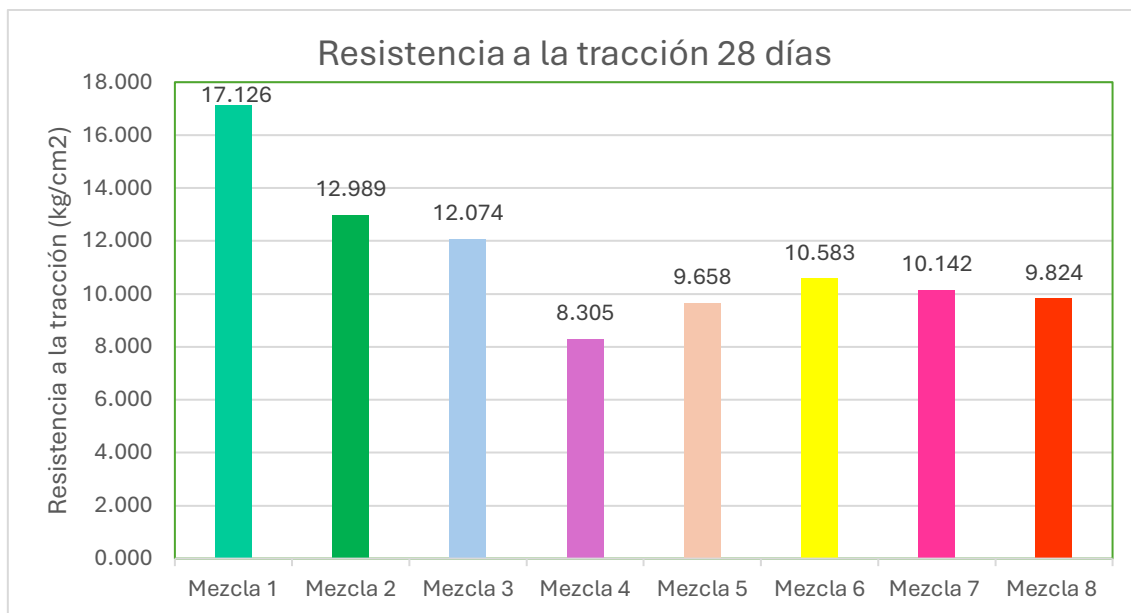


Figura 42. Resistencia a la Tracción M1-M8 a los 28 días de curado

En las mezclas con reemplazo de agregado fino por polvo de piedra pómez (M2-M3) se observó una disminución moderada de la resistencia a tracción. La mezcla M2, con reemplazo parcial del agregado fino, alcanzó una resistencia de 12.99 kg/cm² a los 28 días, mientras que la mezcla M3, con reemplazo total del agregado fino, alcanzó 12.07 kg/cm². Estos resultados representan reducciones de 24.16% y 29.50%, respectivamente, frente a la mezcla de control. Esta tendencia indica que la incorporación de polvo de pómez reduce la capacidad resistente del hormigón; sin embargo, el efecto es menos severo que el observado en las mezclas donde se sustituyó el agregado grueso.

Las mezclas con reemplazo del agregado grueso presentaron las menores resistencias a tracción. La mezcla M4, con reemplazo parcial del agregado grueso, alcanzó 8.31 kg/cm² a los 28 días, mientras que la mezcla M5, con reemplazo total del agregado grueso, alcanzó 9.66 kg/cm². La reducción de resistencia en estas mezclas se relaciona con la alta porosidad, baja densidad y menor rigidez de la piedra pómez gruesa en comparación con la grava convencional. Al sustituir el agregado grueso, se modifica el esqueleto resistente del hormigón y se debilita la transferencia de esfuerzos dentro de la dosificación.

En las mezclas con reemplazo simultáneo de agregado grueso y fino, los valores de resistencia a tracción a los 28 días se ubicaron entre 9.82 kg/cm² y 10.58 kg/cm². La mezcla M6 alcanzó el mayor valor dentro de este grupo, con 10.58 kg/cm², seguida de la mezcla M7 con 10.14 kg/cm² y la mezcla M8 con 9.82 kg/cm². Aunque estos valores son

inferiores al control, muestran un comportamiento relativamente más estable que las mezclas con sustitución únicamente del agregado grueso.

En general, los resultados de tracción presentan una tendencia similar a la observada en la resistencia a compresión, ya que el incremento del contenido de piedra pómez reduce la capacidad mecánica del hormigón. Esta reducción puede atribuirse a la estructura porosa del agregado liviano, a su elevada absorción de agua y a la modificación de la relación agua-cemento efectiva durante el mezclado. Además, la zona de transición entre la pasta de cemento y la piedra pómez presentó menor adherencia durante el mezclado en comparación con la pasta generada con los agregados convencionales.

Estos resultados coinciden con lo señalado por (Parmo et al., 2022), quienes indican que en hormigones elaborados con piedra pómez existe una relación directa entre la resistencia a compresión y la resistencia a tracción por hendimiento.

Por tanto, podemos concluir con que la sustitución de agregados convencionales por piedra pómez permite obtener hormigones de menor densidad, pero genera una disminución en la resistencia a tracción. Esta disminución es más evidente cuando se reemplaza el agregado grueso, debido a que este cumple un papel fundamental en la resistencia y transferencia de esfuerzos dentro del hormigón.

4.4. Ensayo de Durabilidad: absorción de agua por capilaridad

El ensayo de absorción de agua por capilaridad se realizó conforme a la norma UNE 83982 (UNE 83982, 2008), sobre probetas cilíndricas de 10×20 cm previamente secadas en horno a 70°C hasta que el cilindro este completamente seco, con una masa constante. A partir de las curvas de absorción acumulada Q_0-Q vs \sqrt{t} se determinaron, para cada mezcla y cada edad de curado (7, 14 y 28 días), tres parámetros: el coeficiente de absorción capilar K , la porosidad eficaz ϵ_e (fracción de volumen de poros accesibles al agua), y el parámetro m (resistencia a la penetración del agua, min/cm^2), inversamente proporcional a K). Los resultados se discuten a continuación por edad:

La durabilidad del hormigón fue evaluada mediante el ensayo de absorción de agua por capilaridad, con el propósito de analizar la capacidad de las mezclas para absorber agua a través de sus poros. Este parámetro es importante debido a que una mayor absorción capilar puede facilitar el ingreso de humedad y agentes agresivos al interior del hormigón, afectando su desempeño al pasar el tiempo.

4.5. Resultados a 7 días de curado

A continuación, se presentarán las gráficas de cada una de las mezclas para demostrar que pasaron por el Estado 1, al Estado 2 así como está descrito en la norma (UNE 83982, 2008), el cual indica que el cilindro llega a absorber agua hasta llegar a una masa constante:

Tabla 36. Ensayo de durabilidad de las 8 mezclas estudiadas 7 días de curado

Durabilidad 7 días

Mezcla	Q_0 Peso inicial (g)	K Coeficiente absorción capilar ($\text{kg/m}^2 \text{min}^{0.5}$)	m Resistencia a penetración (min/cm^2)	t_n Tiempo de transición (min)
Mezcla 1	3280	0.002289	46.80	18719.7
Mezcla 2	2958.52	0.002211	46.80	18719.7
Mezcla 3	2761.52	0.003623	36.00	14400
Mezcla 4	1983.62	0.003591	43.20	17280
Mezcla 5	1682.90	0.002351	36.00	14400
Mezcla 6	1807.55	0.002109	36.00	14400
Mezcla 7	1632.29	0.001818	50.40	20160
Mezcla 8	1664.61	0.002747	46.80	18720

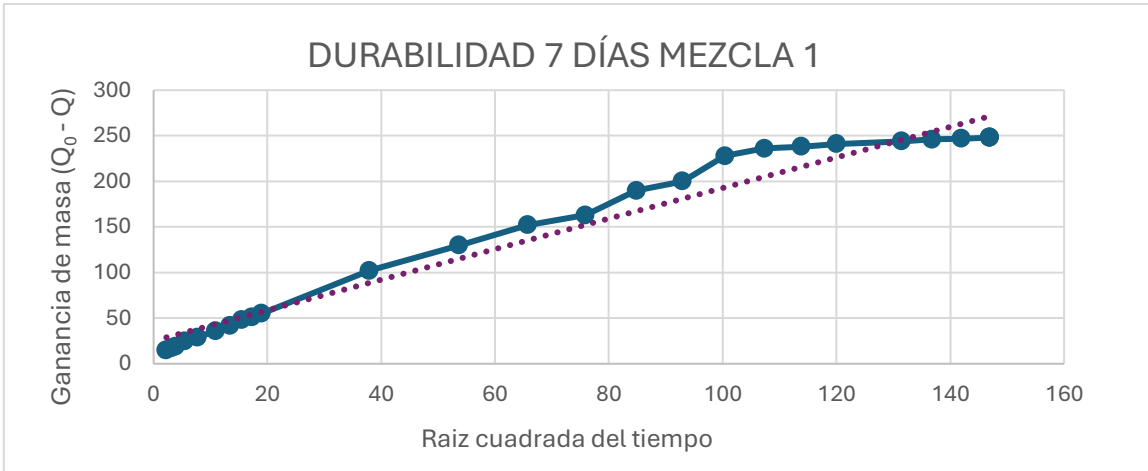


Figura 43. Curva de absorción de agua por capilaridad a los 7 días de curado (M1)

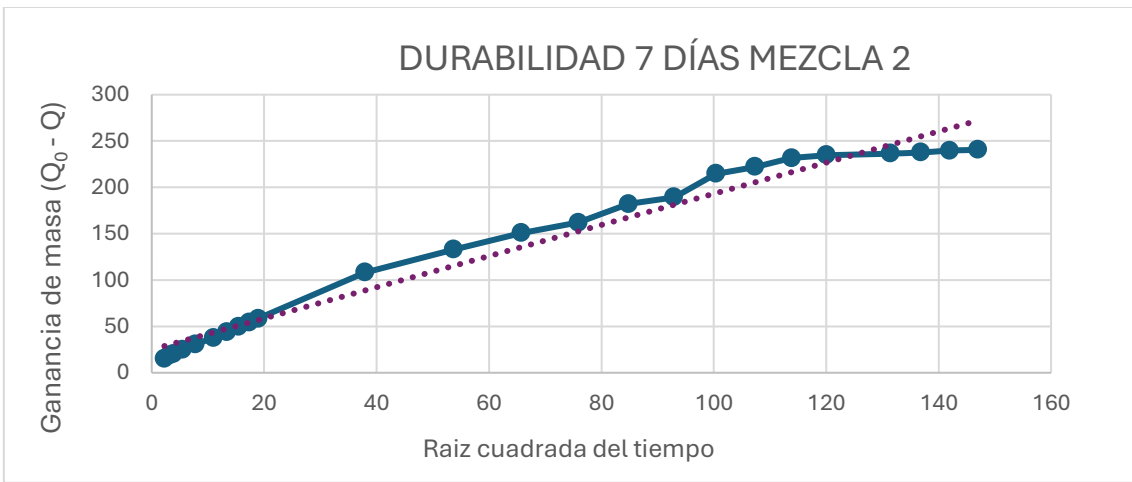


Figura 44. Curva de absorción de agua por capilaridad a los 7 días de curado (M2)

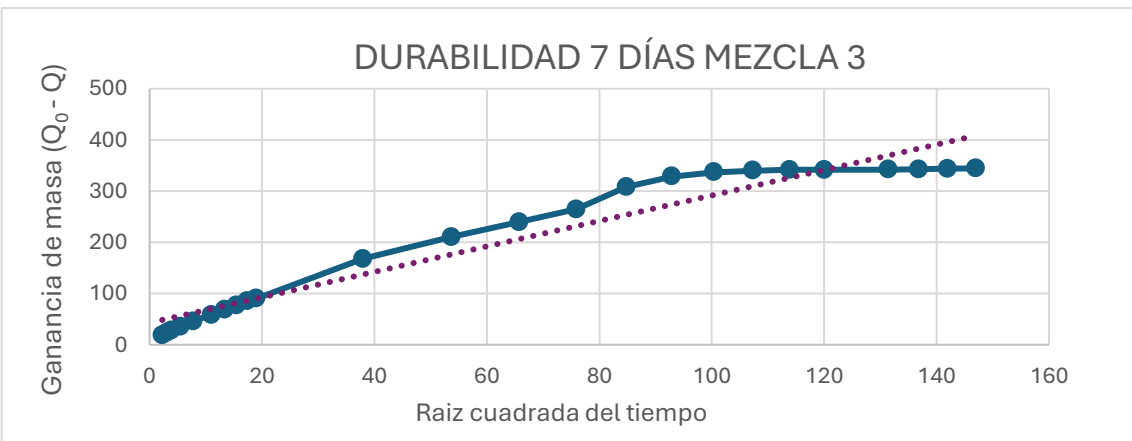


Figura 45. Curva de absorción de agua por capilaridad a los 7 días de curado (M3)

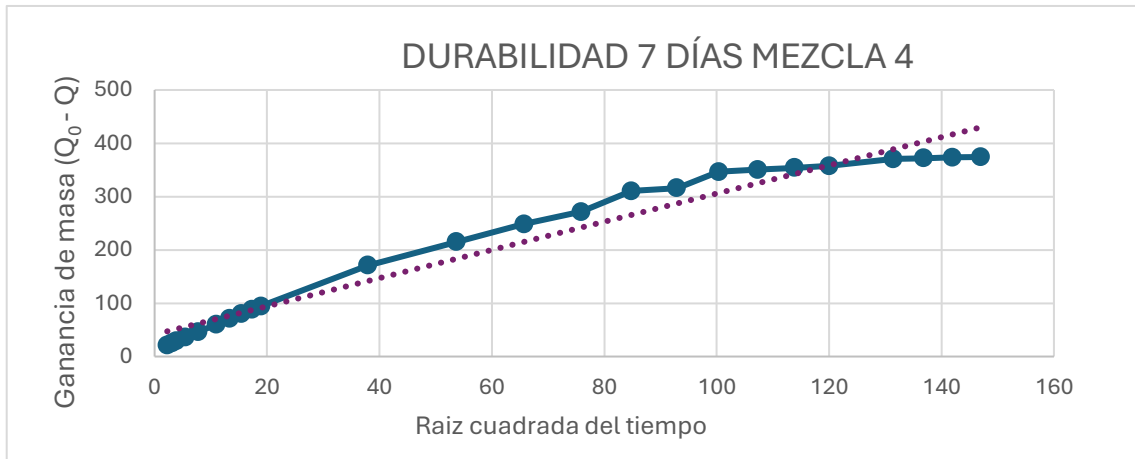


Figura 46. Curva de absorción de agua por capilaridad a los 7 días de curado (M4)

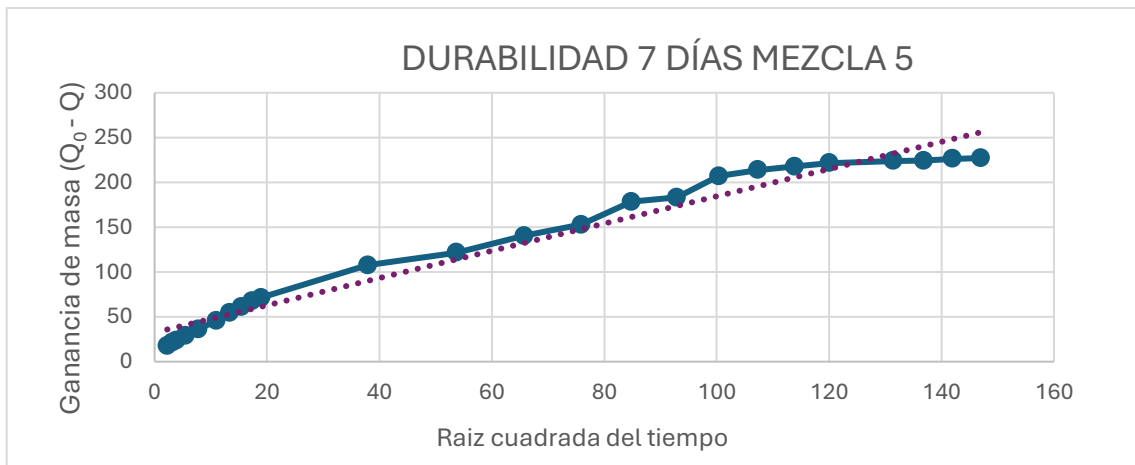


Figura 47. Curva de absorción de agua por capilaridad a los 7 días de curado (M5)

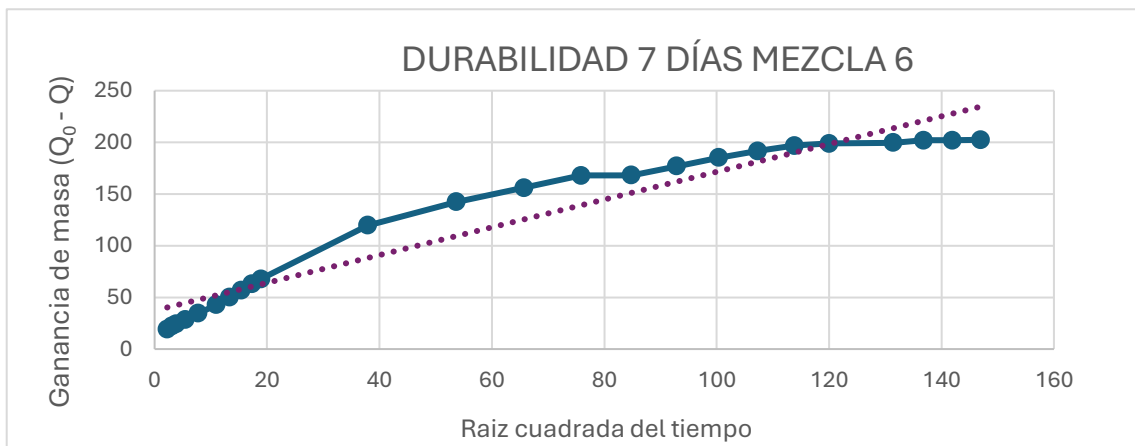


Figura 48. Curva de absorción de agua por capilaridad a los 7 días de curado (M6)

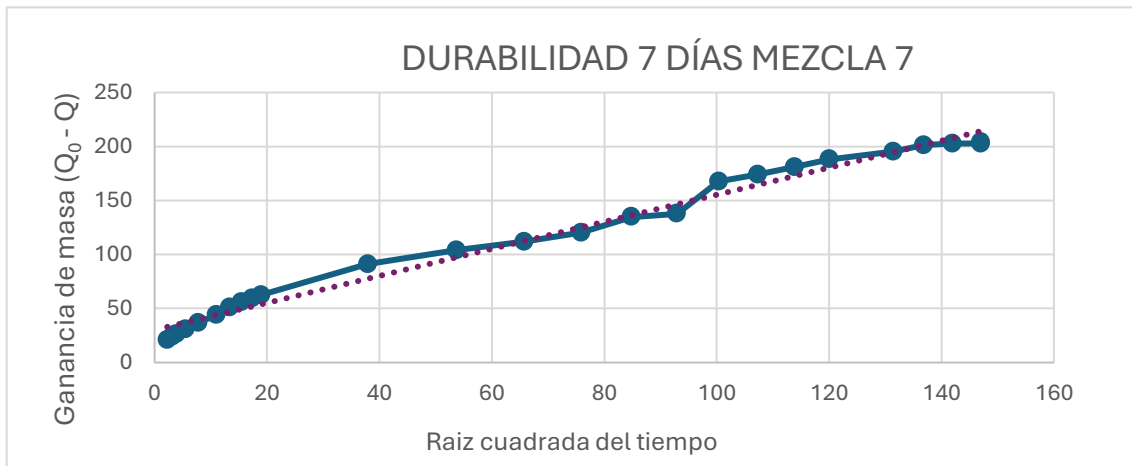


Figura 49. Curva de absorción de agua por capilaridad a los 7 días de curado (M7)

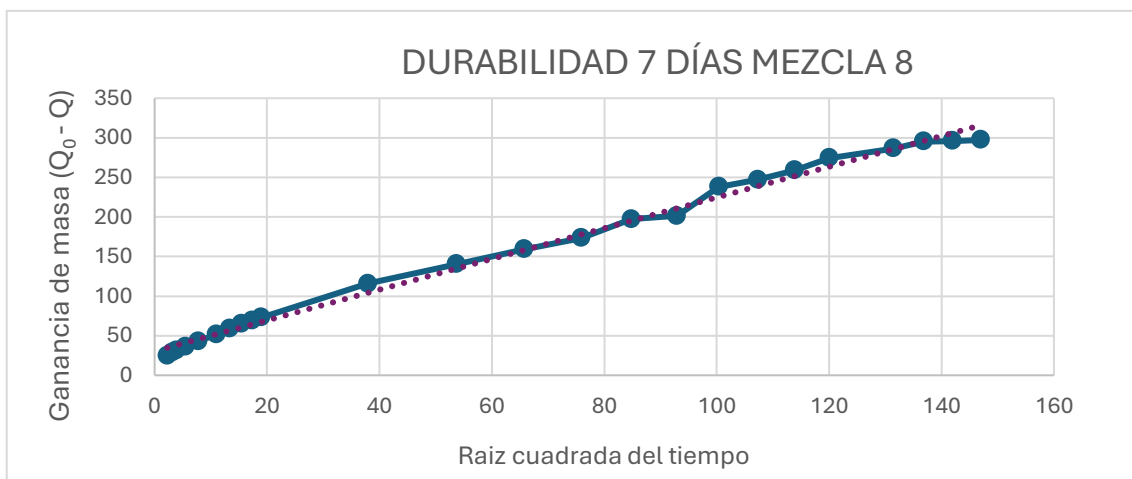


Figura 50. Curva de absorción de agua por capilaridad a los 7 días de curado (M8)

A los 7 días, la Mezcla 7 reemplazo total de ambos agregados, presenta el menor K del grupo ($K = 0.001818 \text{ kg/m}^2 \text{ min}^{0.5}$) y el mayor m ($m = 50.40 \text{ min/cm}^2$), superando incluso a la mezcla de control ($K = 0.002289$, $m = 46.80$). Esto demuestra, que la mezcla con mayor contenido de pómez tenga a edad temprana una absorción capilar menor que la mezcla de control (M1), es en principio contraintuitivo, pero es coherente con el mecanismo de curado interno descrito por (Valdéz et al., 2010), el agua retenida en los poros del pómez (que, como se documentó en la sección 3, no fue completamente prehidratada antes del mezclado) se dirige hacia la pasta de cemento durante el curado, favoreciendo una hidratación más completa del cemento en las primeras horas y densificando la mezcla alrededor de las partículas de pómez. En el extremo opuesto, las Mezclas 3 y 4 presentan los K más altos a 7 días (0.003623 y 0.003591 respectivamente),

lo que indica una mayor velocidad de succión capilar temprana, consistente con su mayor ϵ_e (0.219 y 0.238), es decir, una red de poros más abierta y conectada a edad temprana.

4.6. Resultados a los 14 días de curado

A continuación, se presentarán las gráficas de cada una de las mezclas para demostrar que pasaron por el Estado 1, al Estado 2 así como está descrito en la norma (UNE 83982, 2008), el cual indica que el cilindro llegó a absorber agua hasta llegar a una masa constante:

Tabla 37. Ensayo de durabilidad de las 8 mezclas estudiadas 14 días de curado

Durabilidad 14 días				
Mezcla	Q_0 Peso inicial (g)	K Coeficiente absorción capilar (kg/m ² min ^{0.5})	m Resistencia a penetración (min/cm ²)	t_n Tiempo de transición (min)
Mezcla 1	3131.96	0.002014	32.40	12960
Mezcla 2	3022.84	0.001955	28.80	11520
Mezcla 3	2750.25	0.002795	28.80	11520
Mezcla 4	1947.24	0.003017	28.80	11520
Mezcla 5	1841.98	0.001607	28.80	11520
Mezcla 6	1801.18	0.002555	28.80	11520
Mezcla 7	1735.71	0.001846	28.80	11520
Mezcla 8	1674.92	0.003373	28.80	11520

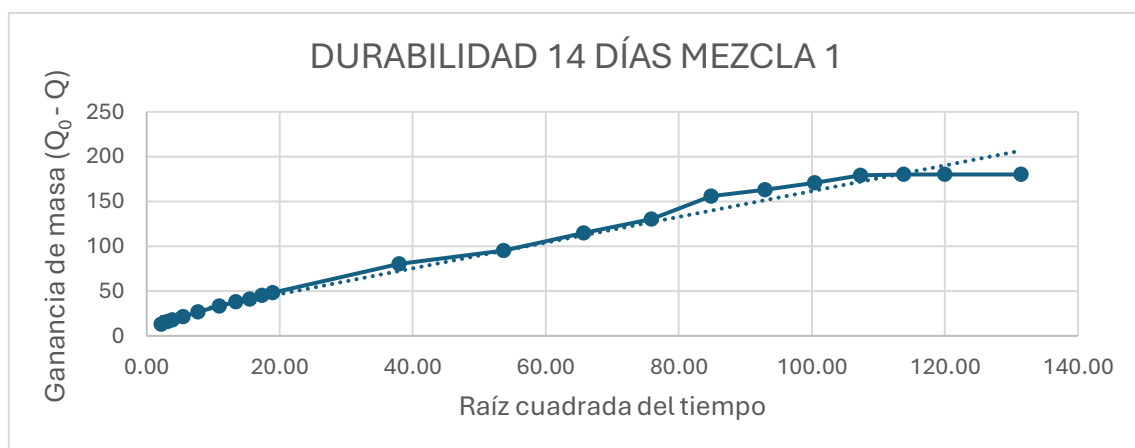


Figura 51. Curva de absorción de agua por capilaridad a los 14 días de curado (M1)

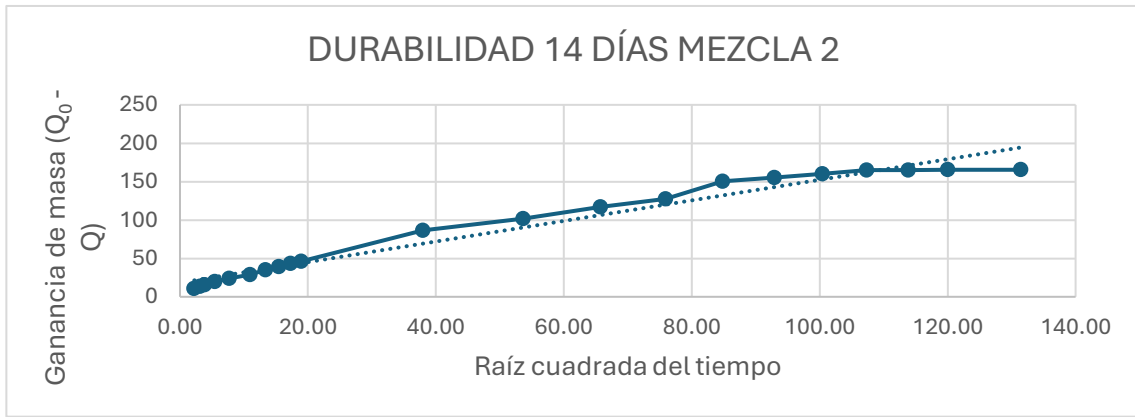


Figura 53. Curva de absorción de agua por capilaridad a los 14 días de curado (M2)

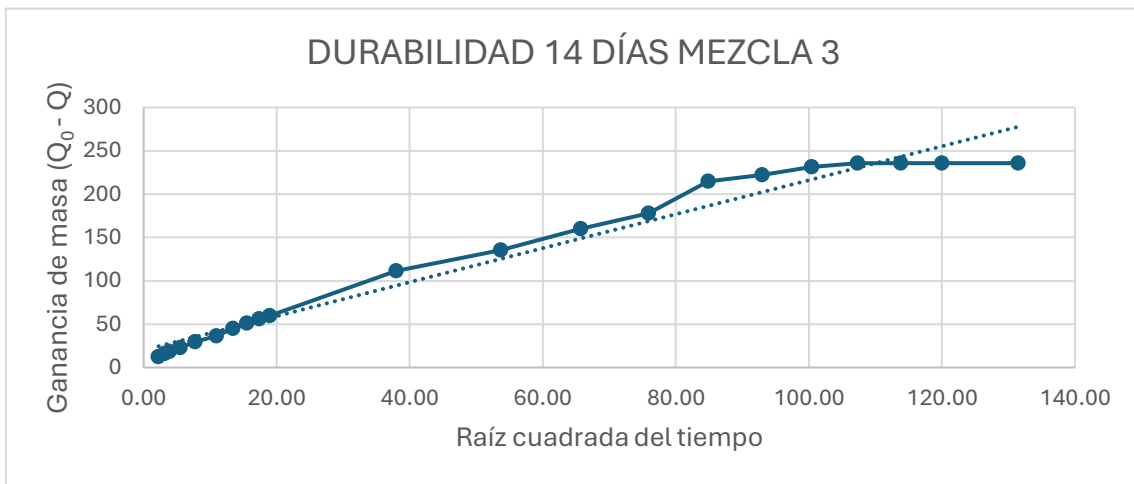


Figura 52. Curva de absorción de agua por capilaridad a los 14 días de curado (M3)

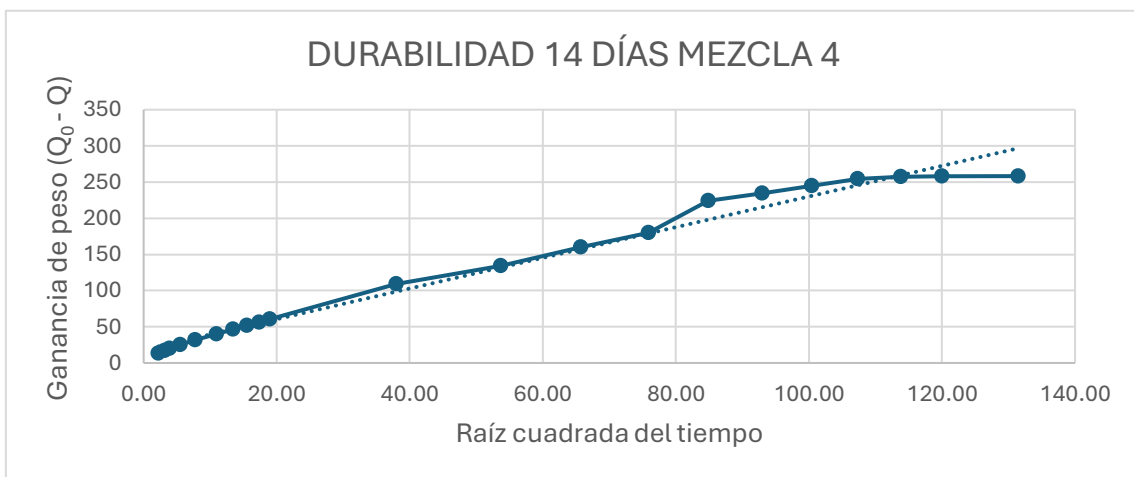


Figura 54. Curva de absorción de agua por capilaridad a los 14 días de curado (M4)

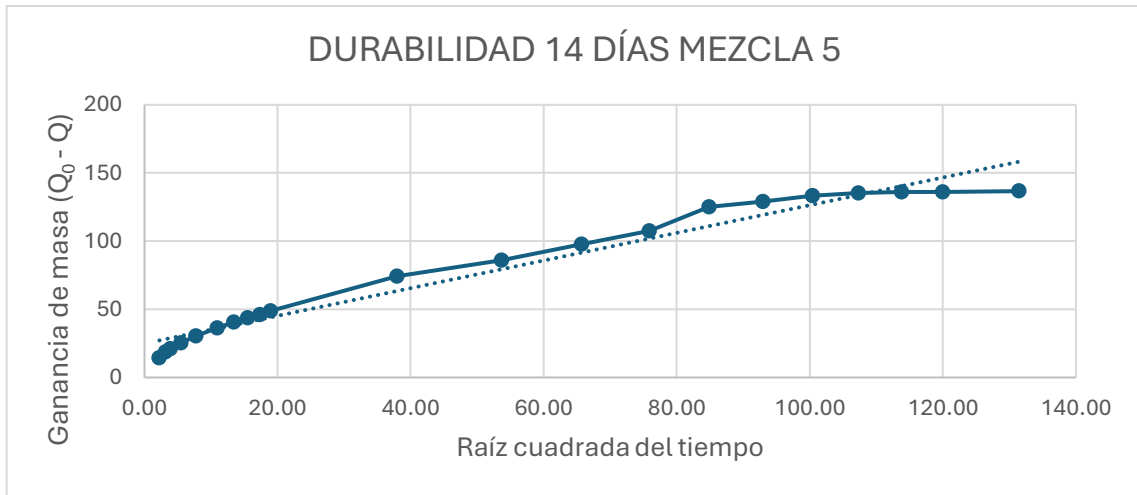


Figura 55. Curva de absorción de agua por capilaridad a los 14 días de curado (M5)

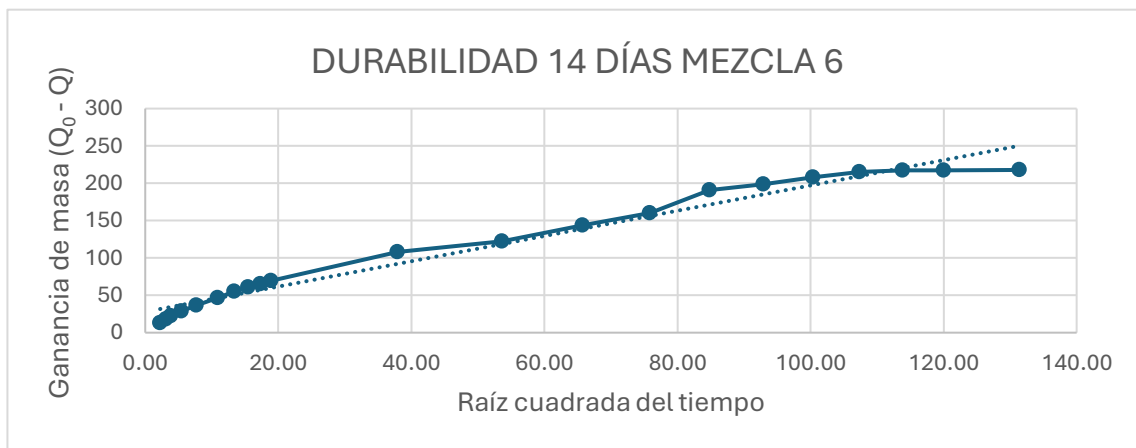


Figura 56. Curva de absorción de agua por capilaridad a los 14 días de curado (M6)

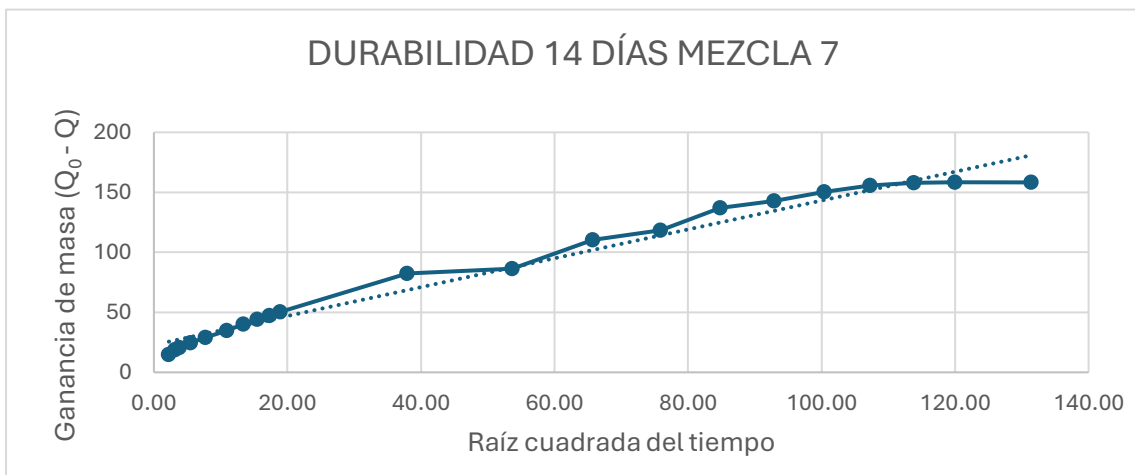


Figura 57. Curva de absorción de agua por capilaridad a los 14 días de curado (M7)

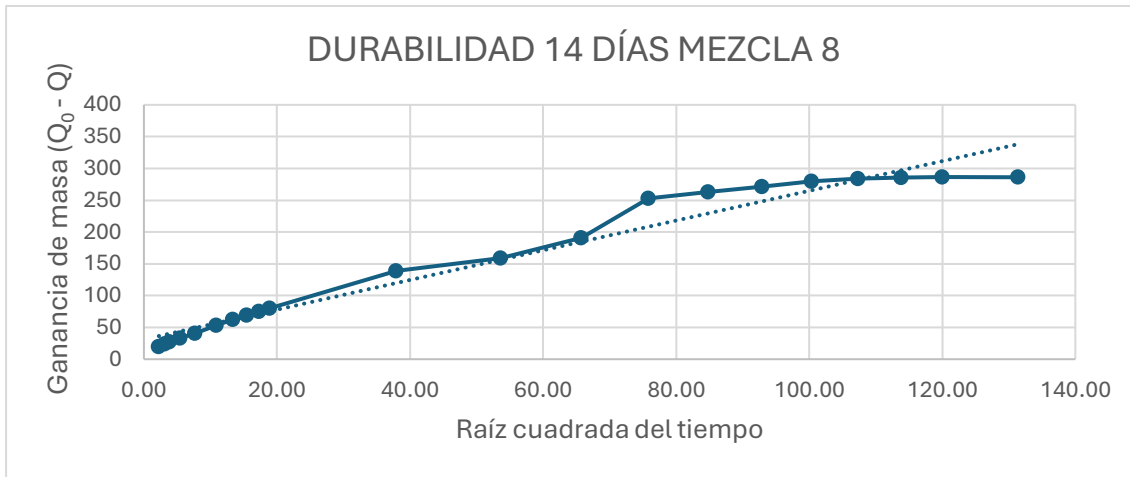


Figura 58. Curva de absorción de agua por capilaridad a los 14 días de curado (M8)

A los 14 días, todos los parámetros m convergen al valor de 28.80 min/cm^2 para las mezclas con pómez (M2 a M8), mientras el control presenta $m = 32.40$. Esto refleja que, a esta edad intermedia, el comportamiento de la curva de absorción en el Estado 2 es más homogéneo entre mezclas, el ritmo de hidratación del cemento alcanza un nivel similar en todas las mezclas, independientemente de la composición granulométrica. La Mezcla 5 reemplazo total del agregado grueso, destaca con el K más bajo a 14 días ($K = 0.001607$) y la ϵ_e más baja del grupo (0.0870), lo que sugiere que, en ausencia de agregado fino poroso, la pasta de cemento domina la microestructura de forma más eficiente a esta edad. La Mezcla 8, en cambio, presenta el K más alto a 14 días ($K = 0.003373$), un resultado que contrasta con su comportamiento a otras edades y que se aborda más adelante.

4.7. Resultados a los 28 días de curado

A continuación, se presentarán las gráficas de cada una de las mezclas para demostrar que pasaron por el Estado 1, al Estado 2 así como está descrito en la norma (UNE 83982, 2008), el cual indica que el cilindro llegó a absorber agua hasta llegar a una masa constante:

Tabla 38. Ensayo de durabilidad de las 8 mezclas estudiadas 28 días de curado

Durabilidad 28 días

Mezcla	Q_0 Peso inicial (g)	K Coeficiente absorción capilar (kg/m ² min ^{0.5})	m Resistencia a penetración (min/cm ²)	t_n Tiempo de transición (min)
Mezcla 1	3282.00	0.001543	32.40	12960
Mezcla 2	2943.40	0.001945	32.40	12960
Mezcla 3	2846.45	0.003557	18.00	7200
Mezcla 4	2220.52	0.002196	32.40	12960
Mezcla 5	1765.23	0.001791	36.00	14400
Mezcla 6	1744.02	0.002095	36.00	14400
Mezcla 7	1791.63	0.001598	32.40	12960
Mezcla 8	1770.07	0.002526	32.40	12960

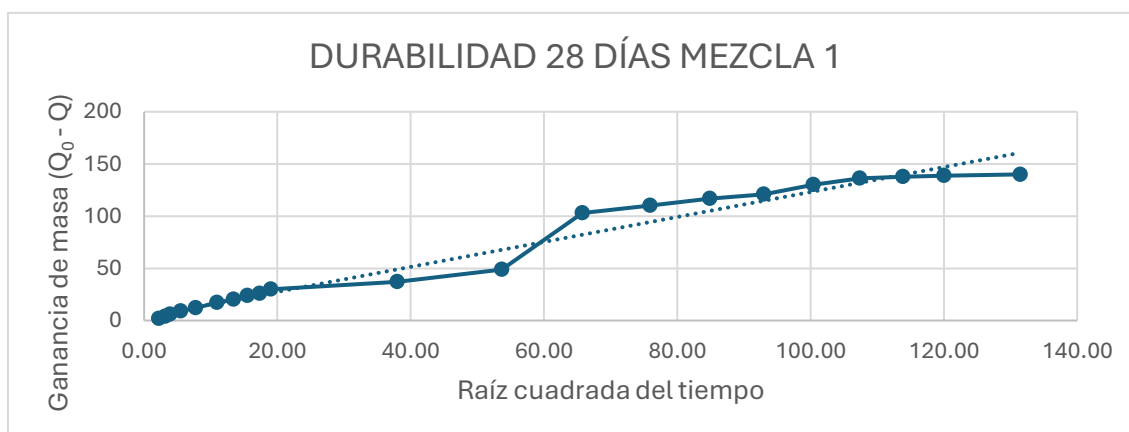


Figura 59. Curva de absorción de agua por capilaridad a los 14 días de curado (M1)

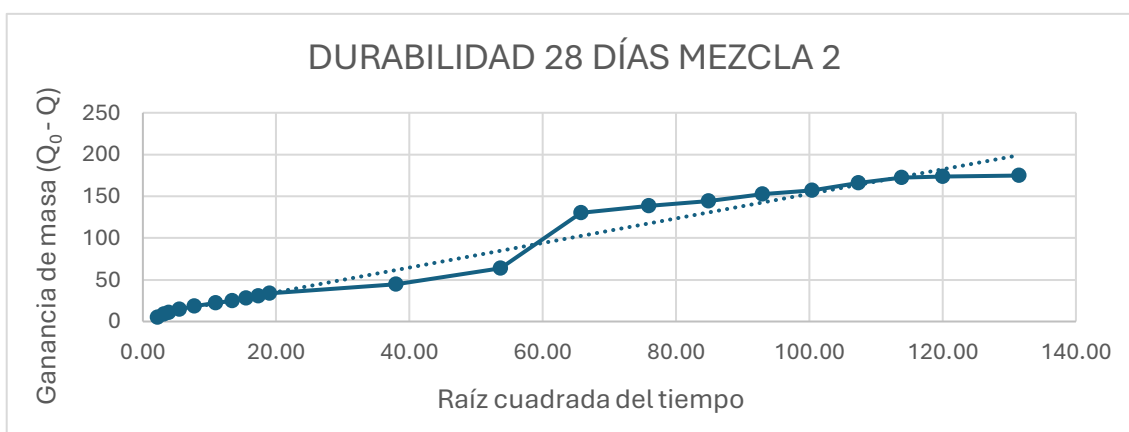


Figura 60. Curva de absorción de agua por capilaridad a los 14 días de curado (M2)

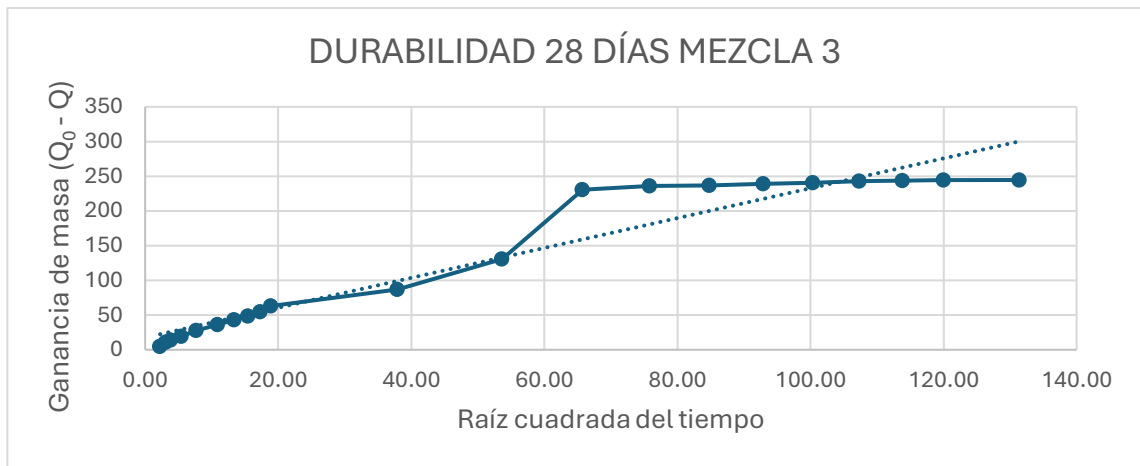


Figura 61. Curva de absorción de agua por capilaridad a los 14 días de curado (M3)

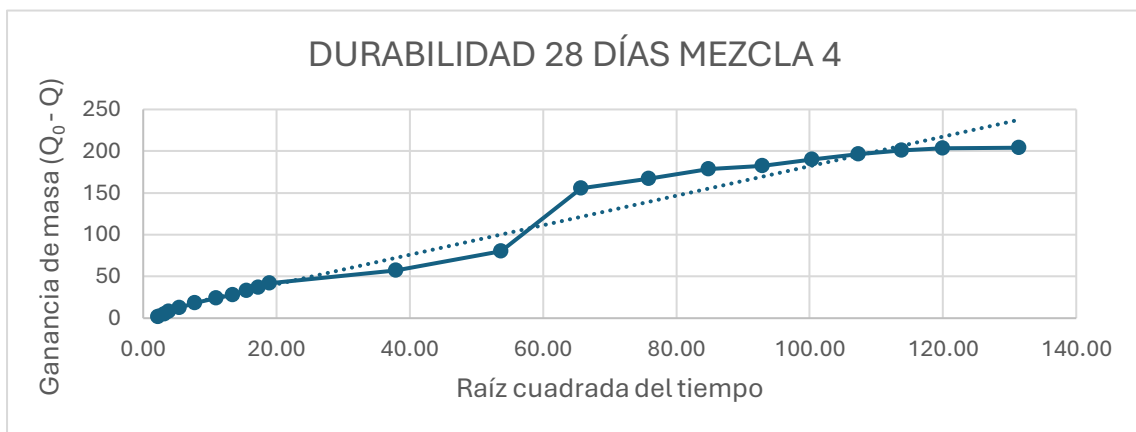


Figura 62. Curva de absorción de agua por capilaridad a los 14 días de curado (M4)

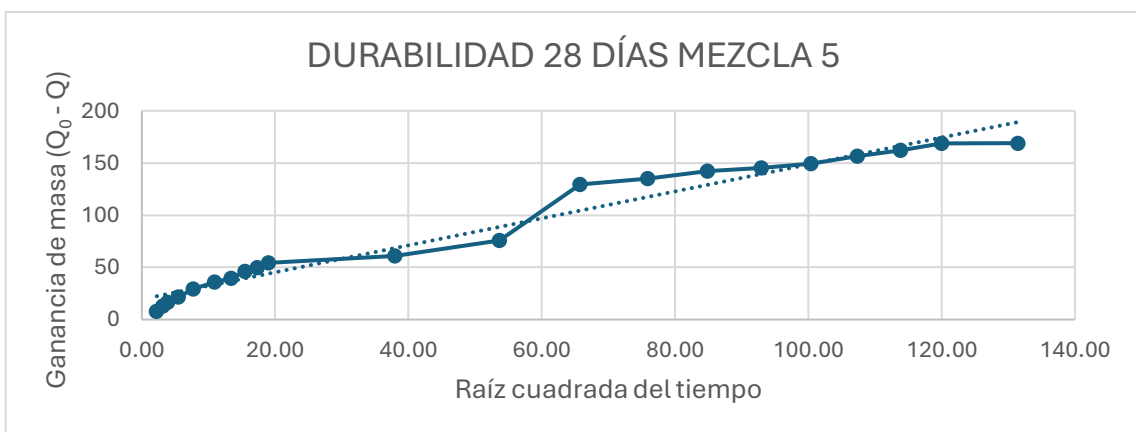


Figura 63. Curva de absorción de agua por capilaridad a los 14 días de curado (M5)

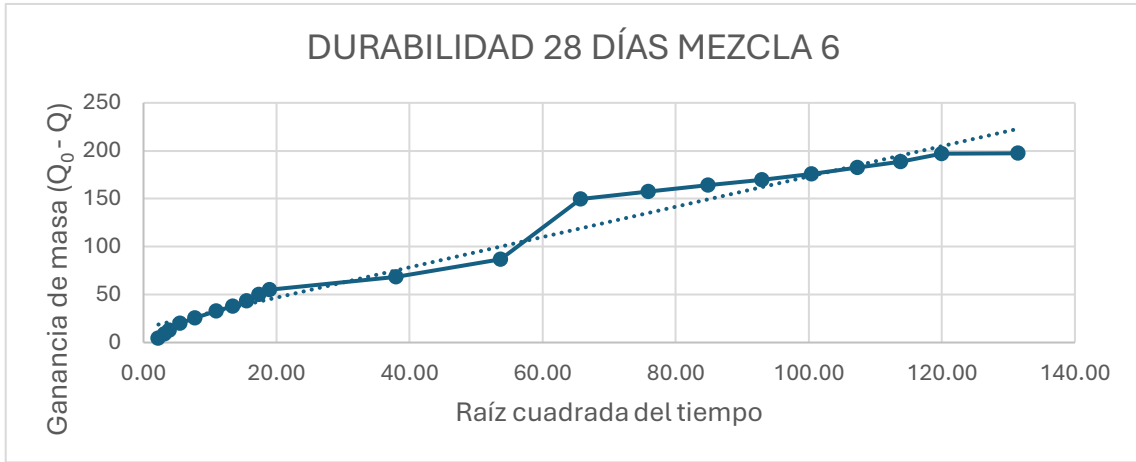


Figura 64. Curva de absorción de agua por capilaridad a los 14 días de curado (M6)

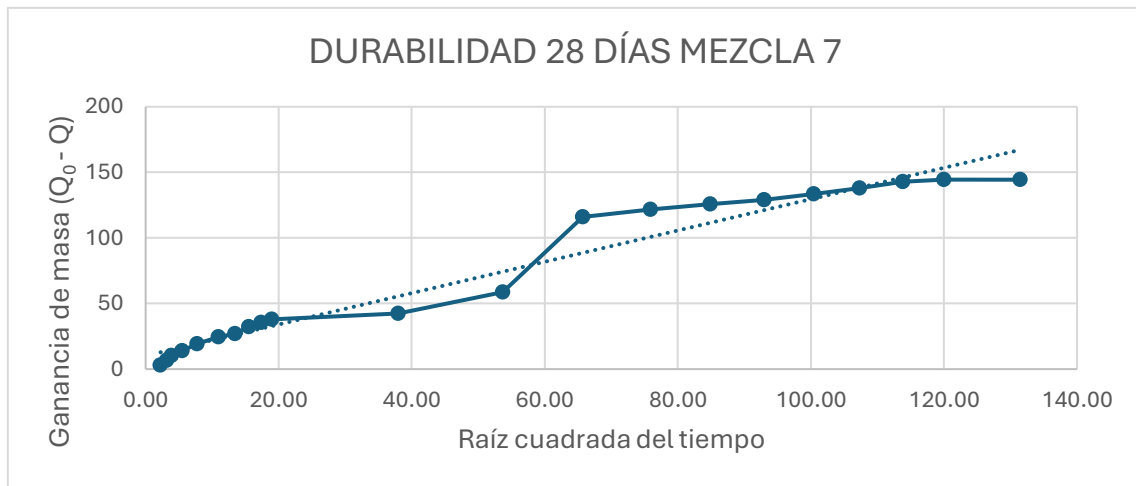


Figura 65. Curva de absorción de agua por capilaridad a los 14 días de curado (M7)

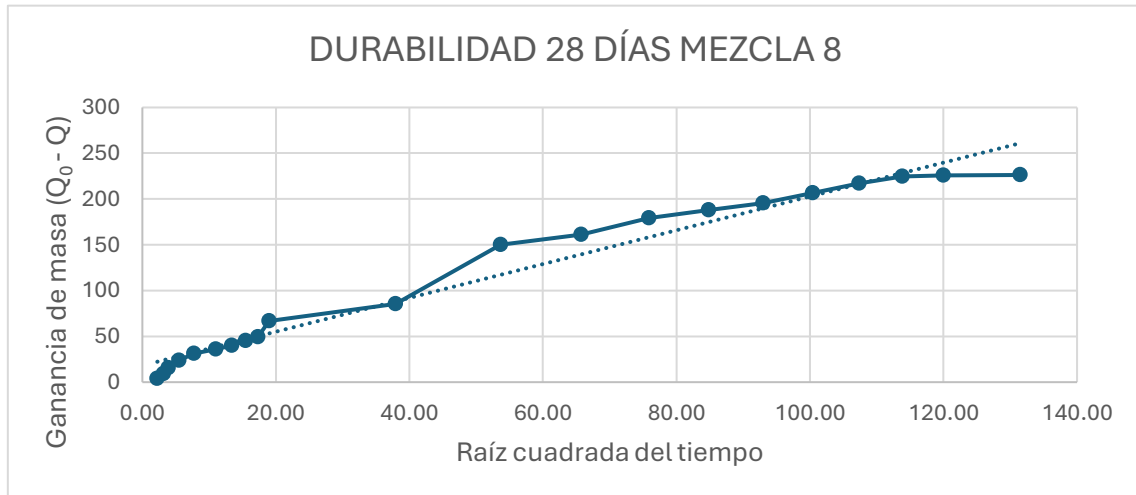


Figura 66. Curva de absorción de agua por capilaridad a los 14 días de curado (M8)

La Mezcla 7 obtiene a 28 días un K de $0.001598 \text{ kg/m}^2 \text{ min}^{0.5}$, prácticamente idéntico al de la mezcla de control M1 con un $K = 0.001543 \text{ kg/m}^2 \text{ min}^{0.5}$, con una diferencia de apenas 3.6%. Esto significa que, en términos de resistencia a la absorción capilar, M7 una mezcla 100% liviana es esencialmente equivalente al hormigón convencional a 28 días. Este resultado constituye la quinta y más importante línea de evidencia sobre el comportamiento particular de la mezcla 7 en esta investigación, coherente con lo observado previamente en compresión y tracción, y tiene una explicación física directa: a 28 días el curado interno del pómez ha tenido tiempo suficiente para actuar, la hidratación del cemento es más completa que en las mezclas sin pómez fino, y existe una compatibilidad mineralógica entre el pómez grueso y el polvo de pómez en la fracción fina genera una zona de transición pasta-agregado más densa y menos permeable.

La Mezcla 3 reemplazo total del agregado fino con pómez presenta a 28 días el K más alto ($K = 0.003557 \text{ kg/m}^2 \text{ min}^{0.5}$) y el m más bajo ($m = 18.00$) de todas las mezclas, así como el t_n más corto ($t_n = 7200 \text{ min}$), lo que indica que la fase de absorción capilar rápida (Estado 1) culmina antes que en cualquier otra mezcla. Esta combinación apunta a una red de poros altamente conectada y fácilmente saturable, el hormigón absorbe agua muy rápido, llena su red de poros en menos tiempo, y luego entra en Estado 2 con una porosidad eficaz relativamente alta ($\epsilon_e = 0.1557$). Este comportamiento puede atribuirse a que la sustitución del 100% de la arena por polvo de pómez que, aunque tiene absorción similar a la arena (3%), posee partículas de morfología irregular y crea una microestructura con poros más conectados en la fracción fina, que no se cierran eficientemente con la hidratación a 28 días, posiblemente porque la relación agua-cemento efectiva en estas probetas fue la más penalizada por los 6.5 kg de agua adicional. Esto también es coherente con la ϵ_e que disminuye con la edad en la mayoría de mezclas (evidencia de que la hidratación va cerrando poros progresivamente), pero en M3 se mantiene alta, sugiriendo que el proceso de cierre de poros es más lento o menos completo.

4.8. Implicaciones de los resultados de absorción capilar frente a agentes agresivos del entorno

El coeficiente de absorción capilar K es un indicador directo de la facilidad con que el agua y los agentes agresivos disueltos en ella pueden penetrar en la matriz del hormigón a través de su red de poros capilares. Un K elevado significa que el hormigón absorbe agua más rápidamente por unidad de tiempo, lo que implica una penetración de iones cloruro, sulfatos y dióxido de carbono hacia el interior de la muestra. En elementos de hormigón armado, esta penetración de agentes agresivos es crítica porque reduce el tiempo necesario para que los agentes corrosivos alcancen la armadura, comprometiendo la vida útil de la estructura.

Dicho esto, en esta investigación, los resultados de K a 28 días permiten establecer una jerarquía de vulnerabilidad relativa entre las mezclas estudiadas.

La Mezcla 3 reemplazo total del fino ($K = 0.003557 \text{ kg/m}^2 \text{ min}^{0.5}$) es la más vulnerable: su alta tasa de succión capilar implica que agentes como los iones, cloruro presentes en ambientes marinos o en suelos contaminados, penetrarían significativamente más rápido que en el resto de mezclas, aumentando el riesgo de corrosión de la armadura. Las Mezclas 4 y 8 ($K = 0.002196$ y 0.002526) presentan una vulnerabilidad media, mayor que la mezcla de control, pero menor que la Mezcla 3, mientras que las Mezclas 5 y 6 ($K = 0.001791$ y 0.002095) muestran una permeabilidad moderada que, combinada con su baja densidad (1291 y 1448 kg/m^3), las posiciona como opciones de equilibrio aceptable entre aligeramiento y protección frente a agentes externos, siempre que el entorno no sea particularmente agresivo.

El caso más relevante para la evaluación de durabilidad por absorción capilar es, nuevamente, la Mezcla 7 con $K = 0.001598 \text{ kg/m}^2 \text{ min}^{0.5}$ a 28 días prácticamente idéntico a la mezcla de control, esta mezcla presentaría, bajo las condiciones de esta investigación, una resistencia a la penetración de agentes agresivos equivalente a la del hormigón convencional. En M7, el mecanismo equivalente es el curado interno: el agua retenida en los poros del pómez grueso y del polvo de pómez facilita una hidratación más prolongada del cemento, que a 28 días se traduce en una red de poros capilares más cerrada y menos permeable resultado que los valores de K confirman cuantitativamente.

Es importante señalar que, para mezclas destinadas a aplicaciones estructurales en ambientes con presencia de cloruros, sulfatos u otras formas de agresión química, los resultados de este estudio sugieren que las mezclas M3, M4 y M8 no serían recomendables sin modificaciones de dosificación como mayor contenido de cemento,

menor relación a-c efectiva o uso de adiciones puzolánicas, mientras que M7 presenta las mejores condiciones de durabilidad dentro del grupo evaluado y podría ser objeto de investigación adicional bajo protocolos de pre-humectación y dosificación optimizados, conforme a las recomendaciones del Capítulo 5.

5. Conclusiones

La investigación evaluó el desempeño mecánico y de durabilidad del hormigón alivianado mediante el reemplazo del agregado grueso y fino convencional por piedra pómez en ocho mezclas con diferentes porcentajes y combinaciones de sustitución. Los resultados demuestran que es técnicamente posible producir hormigón alivianado con pómez volcánica local, logrando reducciones de densidad de hasta el 44.1% respecto al hormigón convencional, aunque con pérdidas significativas de resistencia mecánica que limitan su aplicación estructural directa bajo las condiciones de dosificación empleadas en esta investigación

La caracterización física de los agregados confirmó una diferencia fundamental entre los materiales convencionales y los de pómez: mientras la grava convencional presentó un peso específico aparente de 2.668 g/cm^3 y una absorción del 4%, el pómez grueso registró apenas 0.826 g/cm^3 un dato interesante porque es incluso inferior a la densidad del agua y una absorción del 75%, valores que lo ubican entre los agregados livianos de mayor porosidad reportados en la literatura para este tipo de material volcánico. El polvo de pómez, por su parte, presentó características intermedias (2.148 g/cm^3 , 3% absorción), más cercanas a las de la arena convencional (2.663 g/cm^3 , 3%), lo que explica el comportamiento diferenciado entre sustituciones de agregado fino y grueso observado en todas las propiedades estudiadas. La arena convencional presentó un módulo de finura de 2.32, ubicado en el límite inferior del rango recomendado, condición que tuvo implicaciones sobre el comportamiento del hormigón de control, tal como se discute en la sección 4.2.

Tanto la resistencia a la compresión como la resistencia a la tracción indirecta disminuyen con el porcentaje de sustitución de pómez, pero no de forma proporcional el reemplazo del agregado grueso tiene un impacto mecánico significativamente mayor que el del agregado fino para un mismo margen de sustitución. Lo que indica que el pómez grueso se convierte en el factor limitante de la resistencia una vez que pasa a ser el componente

dominante de la fracción gruesa. La relación resistencia a la tracción / resistencia a la compresión aumenta dependiendo de su margen de sustitución, confirmando que la pómez penaliza proporcionalmente menos las propiedades de tracción que las de compresión, hallazgo coherente con lo reportado por (Loaiza, 2015) para resistencia a la flexión.

Un dato importante para destacar es el comportamiento de la Mezcla 7 donde se reemplazaron ambos agregados convencionales por alivianados, esta mezcla presentó resistencias a compresión y tracción superiores a las dosificaciones que contienen reemplazos de piedra pómez, a pesar de existir mezclas que contienen mayor proporción de pómez en el total de la mezcla. Este resultado, coherente con lo documentado por (Valdéz et al., 2010) sobre el efecto de curado interno del pómez, sugiere que la combinación de pómez grueso y polvo de pómez en la proporción del diseño original (60:40) favorece una mayor obtención de resultados de resistencia y de durabilidad.

El ensayo de durabilidad por absorción capilar (UNE 83982, 2008) reveló que el coeficiente de absorción K disminuye con la edad de curado en todas las mezclas, evidenciando que la hidratación progresiva del cemento densifica la microestructura y mejora la resistencia a la penetración del agua con el tiempo. A 28 días, la Mezcla 7 obtuvo un K de 0.001598, prácticamente idéntico al del control (K = 0.001543), con una diferencia del 3.6%. Esto demuestra que, en términos de durabilidad capilar, una mezcla 100% liviana puede ser equivalente al hormigón convencional a 28 días, resultado que refuerza la hipótesis del curado interno y que constituye el hallazgo más significativo de esta investigación en materia de durabilidad.

Evaluando el desempeño conjunto de las ocho mezclas frente a los criterios normativos (ACI 213R-03, 2003); (ASTM C330/C330M, 2023); (Valdéz et al., 2010), se concluye que las Mezclas 4 (1507 kg/m³) y 6 (1448 kg/m³) se ubican dentro del rango de densidad definido para hormigón estructural liviano (1440-1840 kg/m³ según ASTM C330), mientras que las Mezclas 5, 7 y 8 son aún más livianas que dicho rango. Sin embargo, ninguna mezcla incluido el control alcanzó la resistencia mínima de 17.2 MPa (\approx 175 kg/cm²) establecida por (ASTM C330/C330M, 2023) para hormigón estructural liviano. Esta brecha no puede atribuirse exclusivamente al concepto de sustitución de pómez, ya que el propio control alcanzó apenas el 47% de su resistencia de diseño, lo que apunta a factores de dosificación y condiciones de ensayo (módulo de finura de la arena, nivel de pre-humectación del agregado, n=1 por condición) como causas principales. En este

sentido, los resultados de (Parhizkar et al., 2012), quienes lograron hasta 30.2 MPa con alto contenido de cemento y baja relación agua-cemento indican que el concepto de hormigón alivianado con pómez volcánica local sí tiene viabilidad técnica potencial, pero requiere ajustes de dosificación (particularmente en contenido de cemento y control de la relación agua-cemento efectiva) que van más allá del alcance de la presente investigación. La Mezcla 7 emerge como la dosificación más prometedora, ofreciendo la mejor resistencia del grupo con pómez y una durabilidad capilar equivalente al control a 28 días, con una reducción de densidad del 42.6%.

6. Recomendaciones

Se recomienda aplicar el procedimiento de pre-humectar los agregados alivianados durante 24 a 48 horas previo al mezclado, con la finalidad de controlar la absorción de agua al momento de mezclar, sin la necesidad de ajustar el agua y perder resistencia mecánica, evitando la comparabilidad entre mezclar.

Incrementar el contenido de cemento en las mezclas con mayor porcentaje de pómez grueso, ya que demostraron que este parámetro es el factor determinante para alcanzar resistencias normativamente aceptables en hormigón alivianado con pómez volcánica, además de mejorar significativamente su durabilidad.

Ensayar un mínimo de tres probetas por mezcla y por edad de curado en lugar de una, con el fin de obtener valores representativos estadísticamente y poder determinar la variabilidad inherente a los agregados de pómez, cuya variedad partícula a partícula es considerablemente mayor que la de los agregados convencionales.

Profundizar en el estudio de la mezcla totalmente liviana (M7), que en esta investigación presentó de forma consistente el mejor desempeño relativo del grupo con pómez en compresión, tracción y durabilidad capilar.

Evaluar el uso de aditivos plastificantes o superplastificantes en las mezclas con pómez, como medida alternativa a la adición de agua extra para controlar la trabajabilidad sin incrementar la relación agua-cemento, mejorando simultáneamente la resistencia y la durabilidad del material resultante.

Finalmente, se recomienda caracterizar de forma más detallada las propiedades petrográficas y la variabilidad entre los depósitos del pómez grueso de la fuente utilizada, dado que su peso específico extremadamente bajo (0.826 g/cm^3) sugiere un material de porosidad inusualmente alta incluso dentro de la familia de pómez volcánicos, lo que puede explicar parte de la brecha observada frente a estudios que emplearon pómez de otras procedencias.



Figura 67. Preparación de los moldes cilindros para el vertido de la mezcla.

7. Anexos



Figura 68. Pesaje de los agregados previo al mezclado.



Figura 69. Mezclado de las diferentes dosificaciones mediante el uso de la concreteira.



Figura 70. Endurecido de los cilindros durante 24 horas.



Figura 71. Cilindros de la Mezcla de control M1 previo al ensayo de compresión, tracción y durabilidad, tras ser extraído del tanque de curado por inmersión de agua.



Figura 72. Cilindros de la Mezcla 2 previo al ensayo de compresión, tracción y durabilidad, tras ser extraído del tanque de curado por inmersión de agua.



Figura 73. Cilindros de la Mezcla 3 previo al ensayo de compresión, tracción y durabilidad, tras ser extraído del tanque de curado por inmersión de agua.



Figura 74. Cilindros de la Mezcla 4 previo al ensayo de compresión, tracción y durabilidad, tras ser extraído del tanque de curado por inmersión de agua.



Figura 75. Cilindros de la Mezcla 5 previo al ensayo de compresión, tracción y durabilidad, tras ser extraído del tanque de curado por inmersión de agua.



Figura 76. Cilindros de la Mezcla 6 previo al ensayo de compresión, tracción y durabilidad, tras ser extraído del tanque de curado por inmersión de agua.



Figura 77. Cilindros de la Mezcla 7 previo al ensayo de compresión, tracción y durabilidad, tras ser extraído del tanque de curado por inmersión de agua.



Figura 78. Cilindros de la Mezcla 7 previo al ensayo de compresión, tracción y durabilidad, tras ser extraído del tanque de curado por inmersión de agua.



Figura 79. Rotura del cilindro mediante el Ensayo a Compresión



Figura 80. Rotura del cilindro mediante el Ensayo de Tracción indirecta



Figura 81. Cilindros Mezcla 7 finalizado el ensayo de durabilidad: absorción de agua hasta obtener masa constante.

Referencias Bibliográficas

- ACI 213R-03. (2003). *ACI 213R-03: Guide for Structural Lightweight-Aggregate Concrete*. American Concrete Institute.
- ACI Committe 211. (1998). *ACI 211.2-98: Standard Practice for Selecting Proportions for Structural Lightweight Concrete*. ACI.
- Ahmed, S., & Basher, M. (2023). *Production of efficient lightweight pumice aggregate concrete*. AIP Conference Proceedings. 030013. 10.1063/5.0169686.
- ASTM C330/C330M. (2023). *ASTM C330/C330M-23: Standard Specification for Lightweight Aggregates for Structural Concrete*. ASTM International.
- ASTM International C127. (2024). *Método de ensayo estándar para la densidad relativa (gravedad específica) y la absorción de agregados gruesos*. ASTM International.
- ASTM International C128. (2001). *Método de Ensayo Normalizado para Determinar Densidad, Densidad relativa (Peso Específico) y la Absorción de los Aridos Finos*. ASTM International.
- ASTM International C39M. (2015). *Cilindros de hormigón recién elaborados en moldes metálicos, previo al proceso de curado*. ASTM International.
- ASTM International C496. (2003). *Método de Ensayo Estándar para Esfuerzo de Tensión por Partidura en Especímenes Cilíndricos de Concreto*. Astm International.
- Gaus, A., Sultan, M., Hakim, R., & Rauf Ichsan. (04 de July de 2022). *Effects of Using Pumice Sand as A Partial Replacement of Fine Aggregate in Lightweight Concrete Mixtures*. Departement of Civil Engineering, Universitas Khairun, Ternate, North Maluku, Indonesia: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.762>
- Karthika R.B, Vidyapriya, V., Nandhini Sri, K., Beaula K, M., R, H., & Sriram, M. (2020). *Experimental Study on Lightweight Concrete Using Pumice Aggregate*. Elsevier.
- Kosmatka, S., Kerkhoff, B., Panarese, W., & Tanesi, J. (2004). *Diseño y Control de Mezclas de Concreto*. Portland Cement Association (PCA).

- Loaiza, A. (2015). *Análisis de características físicas y mecánicas del hormigón ligero, con agregados provenientes de piedra pómez*. UNIVERSIDAD DE ESPECIALIDADES ESPIRITU SANTO.
- Martinez Ruiz, A., & Caiza Sánchez, P. (2015). *Fabricación de hormigones livianos con materiales volcanoclásticos (lapilli) y su influencia en la reducción de fuerzas sísmicas*. Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE”.
- NTE INEN 1576. (2011). *Hormigón de cemento hidráulico. elaboración y curado en obra de especímenes para ensayo*. Instituto Ecuatoriano de Normalización .
- Parhizkar, T., Najimi, M., & Pourkhorshidi, A. (2012). *Application of pumice aggregate in structural lightweight concrete*. Asian Journal of Civil Engineering, 13(1), 43–54.
- Parmo, Tavio, Riadi , H., Suriani, E., Priato , K., & Haqi, F. (2022). *The Mechanical Properties of Lightweight Concrete Made with Lightweight Aggregate Volcanic Pumice*. Science and technology publications: DOI: 10.5220/0008906500002481
- Sánchez de Guzmán, D. (2001). *Tecnología del concreto y del mortero*. Pontificia Universidad Javeriana.
- UNE 83982. (2008). *Durabilidad del hormigón: Método de ensayo; Determinación de la absorción de agua por capilaridad del hormigón endurecido Método Fagerlund*. Asociación Española de Normalización y Certificación .
- Valdéz, L., Suárez , A., Proano , G., & Suárez , G. (2010). *HORMIGONES LIVIANOS*. Guayaquil, Ecuador: Escuela Superior Técnica del Litoral.