



UNIVERSIDAD LAICA ELOY ALFARO DE MANABÍ
FACULTAD DE INGENIERÍA, INDUSTRIA Y ARQUITECTURA

CARRERA: INGENIERÍA CIVIL
INFORME FINAL DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Previo a la obtención del título de:

INGENIERO CIVIL

MODALIDAD: PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

TEMA:

**DOSIFICACIÓN Y ENSAYOS DE COMPRESIÓN Y FLEXIÓN DE UN HORMIGÓN
ESTRUCTURAL ALIGERADO**

TÍTULO:

**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE UN HORMIGÓN ALIGERADO
ELABORADO CON PIEDRA PÓMEZ Y AGREGADOS DE LA COSTA
ECUATORIANA BAJO ESFUERZOS DE COMPRESIÓN Y FLEXIÓN**

AUTOR/ES:

ÁLVAREZ CARREÑO ANAHÍ JULISSA

BAILÓN ARCENTALES MATHEWS ALEXANDER

TUTOR/A:

DRA. ÁVILA AYÓN VERÓNICA

MANTA – MANABÍ – ECUADOR

Agosto 2026

APROBACIÓN DEL TUTOR

Como tutor académico de la carrera de Arquitectura en la Universidad Laica "Eloy Alfaro" de Manabí, certifico lo siguiente:

He supervisado y orientado la elaboración del trabajo de titulación, completando un total de 384 horas, bajo la modalidad de **Proyecto de Investigación**. El tema del proyecto se titula **"EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE UN HORMIGÓN ALIGERADO ELABORADO CON PIEDRA PÓMEZ Y AGREGADOS DE LA COSTA ECUATORIANA BAJO ESFUERZOS DE COMPRESIÓN Y FLEXIÓN"**. Este proyecto ha sido desarrollado conforme a los lineamientos internos de la mencionada modalidad, y ha cumplido con los requisitos establecidos por el Reglamento de Régimen Académico. Por lo tanto, **certifico** que el proyecto mencionado posee los méritos académicos, científicos y formales necesarios para ser evaluado por el tribunal de titulación designado por la autoridad competente.

La autoría del tema desarrollado corresponde a Álvarez Carreño Anahí Julissa y Bailón Arcentales Mathews Alexander, estudiantes de la carrera de Ingeniería Civil, período académico 2026 (1), quienes se encuentra aptos para la sustentación de su trabajo de titulación.

Certifico lo anterior para los fines pertinentes, a menos que la ley disponga lo contrario.

Manta, 25 de agosto de 2026.

Lo certifico,



Dra. Verónica Ávila Ayón

Tutor

DECLARACIÓN DE AUTORIA

Yo, Anahi Julissa Álvarez Carreño con CC: 131520125-9, doy constancia de ser el autor del Trabajo de Titulación con modalidad Proyecto de investigación con el tema "

EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE UN HORMIGÓN ALIGERADO

ELABORADO CON PIEDRA PÓMEZ Y AGREGADOS DE LA COSTA

ECUATORIANA BAJO ESFUERZOS DE COMPRESIÓN Y FLEXIÓN ", el cual fue dirigido por el tutor, Dra. Verónica Ávila Ayón.

Quiero resaltar la originalidad de este trabajo, que se fundamenta en la contribución de varios autores que enriquecieron la investigación, así como en la recopilación de datos e información provenientes de fuentes bibliográficas, visitas de campo, entre otros recursos.

En la ciudad de Manta, a los 25 días del mes de agosto de dos mil veinte y seis.



Anahi Julissa Álvarez Carreño

C.C. 131520125-9

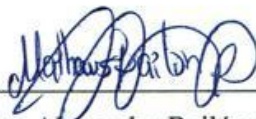
Autor

DECLARACIÓN DE AUTORIA

Yo, Mathews Alexander Bailón Arcentales con CC: 131564511-7, doy constancia de ser el autor del Trabajo de Titulación con modalidad Proyecto de investigación con el tema "**EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE UN HORMIGÓN ALIGERADO ELABORADO CON PIEDRA PÓMEZ Y AGREGADOS DE LA COSTA ECUATORIANA BAJO ESFUERZOS DE COMPRESIÓN Y FLEXIÓN**", el cual fue dirigido por el tutor, Dra. Verónica Ávila Áyon.

Quiero resaltar la originalidad de este trabajo, que se fundamenta en la contribución de varios autores que enriquecieron la investigación, así como en la recopilación de datos e información provenientes de fuentes bibliográficas, visitas de campo, entre otros recursos.

En la ciudad de Manta, a los 25 días del mes de agosto de dos mil veinte y seis.



Mathews Alexander Bailón Arcentales

C.C. 131564511-7

Autor

CERTIFICACIÓN DE APROBACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

En calidad de tribunales de la Facultad de Ingeniería, Industria y Arquitectura de la Universidad Laica "Eloy Alfaro" de Manabí, certifico:

Haber revisado el trabajo de titulación, bajo la modalidad de Proyecto de Investigación, cuyo tema es "EVALUACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE UN HORMIGÓN ALIGERADO CON MATERIALES DE LA COSTA ECUATORIANA BAJO ESFUERZOS DE COMPRESIÓN Y FLEXIÓN" internos de la modalidad en mención y en apego al cumplimiento de los requisitos exigidos por el Reglamento de Régimen Académico, por tal motivo APRUEBO, que el mencionado proyecto reúne los méritos académicos, científicos y formales, suficientes para proceder a la defensa correspondiente.

Certifico lo anterior para los fines pertinentes, a salvo disposición de Ley en contrario. En la ciudad de Manta, a los 25 días del mes de agosto de dos mil veinte y seis.



Ing. Marcelo Fabían Oleas Escalante

Tribunal 1



Ing. Carlos Valentín Cedeño Burgos, MSc.

Tribunal 2

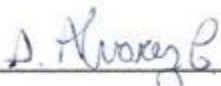
DEDICATORIA

Dedico este trabajo a Dios, por bendecirme con la fuerza de voluntad necesaria para superar cada adversidad y ver esta meta cumplida.

A mi familia, pero sobre todo a mi hermano Alan, por ayudarme y siempre estar al pendiente de lo que necesitaba, tanto física como mentalmente para sobrellevar y alcanzar este objetivo.

A mi compañero de tesis Mathews, por su empeño, esfuerzo y por hacer este trabajo ameno, tanto dentro como fuera del laboratorio.

Agradezco también a nuestra tutora, Dra. Verónica Ávila, por su tutoría indispensable, paciencia y enseñanzas durante este trabajo y nuestro paso por las aulas.



Anahi Julissa Álvarez Carreño
C.C. 131520125-9
Autor

DEDICATORIA

Dedico el presente trabajo, en primer lugar, a Dios, por estar siempre a mi lado en cada paso de mi vida, y por darme la fuerza de voluntad de llegar hasta este lugar.

A mis abuelos maternos, por depositar su confianza en mi persona desde las distancias. A mis padres, quienes están siempre a mi lado y por apoyarme en cada una de mis decisiones. Y a mis hermanos, por darme esa ayuda de poder contar con ellos cuando lo necesito.

A mi compañera de tesis, Anahí Álvarez; y a mi tutora, Dra. Verónica Avila, por su compañía, dedicación y apoyo durante este trabajo y toda la carrera.



Mathews Alexander Bailón Arcentales
C.C. 131564511-7
Autor

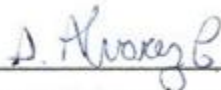
AGRADECIMIENTOS

Agradezco, en primer lugar, a Dios mi creador, por darme otro día más de vida, por darme la fuerza de voluntad para poder enfrentar este arduo camino.

A mis abuelos maternos, por depositar su confianza y esfuerzos en mí, para poder alcanzar cada logro académico y personal que he soñado. A mis padres, por darme la sabiduría y ser mis guías en cada paso de mi vida; a mis hermanos, por ser esa compañía que necesitaba en tiempos complicados.

A mi compañero de tesis por dedicar todo su esfuerzo y conocimiento a este trabajo y apoyarme; a mi tutora de Tesis, Dra. Verónica Ávila, por ser nuestra guía en esta investigación e impartir sus conocimientos.

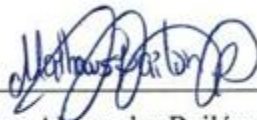
A todos mis compañeros de carrera que me ha dado este viaje, “Los muchachos”: Alexis, Erick, Daría y Ronald, por brindarme ese apoyo, compañerismo y conocimientos compartidos. Y a todas las demás personas quienes me han apoyado con un granito de arena para poder alcanzar este logro.



Anahi Julissa Álvarez Carreño

C.C. 131520125-9

Autor



Mathews Alexander Bailón Arcentales

C.C. 131564511-7

Autor

RESUMEN

El uso de hormigones ligeros optimiza recursos y reduce la carga muerta de las edificaciones, mejorando de manera significativa el comportamiento sísmico en estructuras de mediana y gran altura. La poca implementación de estos hormigones ligeros está condicionada por la ausencia o escaso conocimiento de dosificaciones, propiedades mecánicas y demás características que frenan su generalización. Esta investigación pretende evaluar el desempeño mecánico de un hormigón estructural aligerado, elaborado con piedra pómez y materiales propios de la costa ecuatoriana, bajo esfuerzos de compresión y flexión. Metodológicamente, el trabajo contempla el diseño y la caracterización de mezclas experimentales orientadas a determinar la viabilidad del material para su aplicación constructiva local. El estudio se fundamenta en los criterios de códigos internacionales como el ACI 213R-14 y la norma ASTM C330. Como eje central de la experimentación, se plantea la evaluación comparativa de dosificaciones que combinan piedra pómez con agregados de peso normal de la región costera, analizando tanto mezclas aligeradas con piedra pómez pura como combinaciones con ripio convencional. Esta aproximación busca equilibrar la reducción de peso propio con la optimización del módulo de elasticidad y la resistencia mecánica, estableciendo un precedente técnico aplicable al diseño eficiente de losas y vigas en el contexto nacional y local.

Palabra Clave: Piedra Pómez, hormigón aligerado, densidad, resistencia.

ABSTRACT

The use of lightweight concrete optimizes resources and reduces the dead load of buildings, significantly improving seismic performance in medium- and high-rise structures. The limited implementation of these lightweight concretes is due to a lack of knowledge regarding mix designs, mechanical properties, and other characteristics that hinder their widespread adoption. This research aims to evaluate the mechanical performance of a lightweight structural concrete, made with pumice stone and materials from the Ecuadorian coast, under compressive and flexural stresses. Methodologically, the work involves the design and characterization of experimental mixes to determine the material's viability for local construction applications. The study is based on the criteria of international codes such as ACI 213R-14 and ASTM C330. The central focus of the experimentation is the comparative evaluation of mix designs that combine pumice with normal-weight aggregates from the coastal region, analyzing both lightweight mixes with pure pumice and combinations with conventional gravel. This approach seeks to balance weight reduction with optimization of the modulus of elasticity and mechanical strength, establishing a technical precedent applicable to the efficient design of slabs and beams in the national and local context.

Key Words: Pumice stone, lightweight concrete, density, resistance.

ÍNDICE

RESUMEN	ix
ABSTRACT	x
INTRODUCCION.....	1
Antecedentes	1
Justificación	2
Problema De Investigación.....	2
CAPITULO I ESTADO DEL ARTE	5
1.1. Conceptos Generales del Hormigón Ligeró	5
1.1.1. Hormigones Ligeros Estructurales	6
1.2. Hormigón Celular.....	7
1.3. Áridos o Agregados Ligeros para Hormigón.....	9
1.3.1. Propiedades físicas y mecánicas de los agregados ligeros.	9
1.4. Densidad a Granel y Requisitos de Resistencia.....	10
1.5. Ensayos de Caracterización de Agregados Fino y Grueso	11
1.5.1. Granulometría (C136/C136M)	11
1.5.2. Peso Unitario (C29/C29M).....	12
1.5.3. Peso Específico y Absorción (C128-04a).....	13
1.5.4. Contenido de humedad superficial (C70 o C566)	13
1.5.5. Degradación o resistencia al desgaste (C131M-14)	14
1.5.6. Impurezas orgánicas (C40).....	14
1.6. Métodos de Dosificación de Hormigones	15
1.6.1. Método ACI	15
1.7. Diseño de Mezclas con Piedra Pómez como Agregado Ligeró.....	19
1.7.1. Propiedades de la piedra pómez ecuatoriana.	19
1.8. Estudios Nacionales Previos.....	20

1.9.	Ensayos para Evaluar el Comportamiento del Hormigón Ligeró.....	21
1.9.1.	Ensayo de Resistencia a la Compresión	21
1.9.2.	Ensayo del Módulo de Rotura o Flexión.....	22
1.10.	Relaciones porcentuales de agregado grueso.....	22
CAPITULO II MATERIALES Y MÉTODOS		24
2.1.	Materiales Utilizados en las Diferentes Ensayos	24
2.1.1.	Agregados Utilizados	24
2.1.2.	Materiales para los Ensayos de Caracterización	26
2.2.	Métodos Aplicados en la Investigación	27
2.2.1.	Ensayos de Caracterización.....	27
2.2.2.	Evaluación de las Dosificaciones.....	32
2.2.3.	Dosificaciones Utilizadas.....	34
2.3.	Relaciones Porcentuales de Agregados Grueso	35
2.4.	Evaluación de la Resistencia a Flexión	36
CAPÍTULO III EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS.....		38
3.1.	Presentación de Resultados Obtenidos	38
3.1.1.	Valores de Densidad del Hormigón Aligerado	38
3.1.2.	Valores de Resistencia a la Compresión del Hormigón	42
3.1.3.	Valores de Resistencia a la Flexión del Hormigón.....	48
3.2.	Análisis de los Resultados Obtenidos	53
3.2.1.	Análisis de la Densidad del Hormigón Aligerado	53
3.2.2.	Análisis de la Resistencia a la Compresión.....	54
3.2.3.	Análisis de la Resistencia a Flexión	56
3.2.4.	Análisis Comparativo e Interrelación de las Resistencias Mecánicas.....	56
3.2.5.	Interrelación de las Propiedades Físicas y Mecánicas del Hormigón	58

3.2.6. Análisis de los resultados	59
CONCLUSIONES.....	62
RECOMENDACIONES	64
REFERENCIAS	65
ANEXOS	71

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1.- Requisitos de Gradación para Agregados Livianos para Concreto Estructural.	10
Figura 2.1.- Arena Homogenizada, Megarock.	24
Figura 2.2.- Cemento Holcim GU.	24
Figura 2.3.- Piedra Ripio, MEGAROCK.	25
Figura 2.4.- Piedra Pomez	25
Figura 2.5.- Tamices, Laboratorio de suelos ULEAM.	26
Figura 2.6.- Canasta Metálica Mallada, Laboratorio de Suelos ULEAM.	26
Figura 2.7.- Frasco de Le Chatelier, Laboratorio de Suelos ULEAM.....	27
Figura 2.8.- Proceso de Tamizado.	28
Figura 2.9.- Recipiente Volumétrico para Ensayo de Densidad Suelta y Compactada.	30
Figura 2.10.- Peso Sumergido de la Piedra Pómez SSS.....	31
Figura 2.11.- Secado Superficial del Ripio Saturado.	31
Figura 2.12.- Molde de los Cilindros.....	33
Figura 2.13.- Molde de Viga.....	33
Figura 2.14.- Maquina Universal.	37
Figura 2.15.- Viga sometida a Carga.	37
Figura 3.1.- Gráfica de Densidades de Hormigones Aligerados.	41
Figura 3.2.- Gráfica de Densidades de Hormigones Aligerados	42

Figura 3.3.- Comportamiento de Resistencia entre Dosificación Base vs 1° Dosificación.	43
Figura 3.4.- Comportamiento de la Resistencia entre Dosificación Base vs 2° Dosificación.	44
Figura 3.5.- Comportamiento de la Resistencia de la 1° Dosificación vs 3° Dosificación.	45
Figura 3.6.- Comportamiento de la Resistencia entre la 2° Dosificación vs 4° Dosificación.	47
Figura 3.7.- Valores de Resistencia a Flexión del Hormigón, Primera Dosificación.	48
Figura 3.8.- Valores de Resistencia a Flexión del Hormigón, Segunda Dosificación.	49
Figura 3.9.- Valores de Resistencia a Flexión del Hormigón, Tercera Dosificación.	51
Figura 3.10.- Valores de Resistencia a Flexión del Hormigón, Cuarta Dosificación.	52

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1.- Tabla de Densidades Suelta y Compactada de la Piedra Ripio.	28
Tabla 2.2.- Tabla de Densidades Suelta y Compactada de la Piedra Pómez.	29
Tabla 2.3.- Tabla de Datos del Ensayo de Absorción Piedra Ripio.	31
Tabla 2.4.- Tabla de Datos del Ensayo de Absorción Piedra Pómez.	31
Tabla 2.5.- Tabla de datos del Contenido de Humedad de los agregados.	32
Tabla 2.6.- Resultados de las Propiedades de los Agregados, (Morales et al., 2018).	33
Tabla 2.7.- Resultados de las Propiedades de los Agregados, (Macas E., 2006).	34
Tabla 2.8.- Resultados de las Propiedades de los Agregados, Costa.	34
Tabla 2.9.- Primera Dosificación, 100% Piedra Pómez, (Morales et al., 2018).	34
Tabla 2.10.- Segunda Dosificación, 100% Piedra Pómez. (Macas E., 2006).	35
Tabla 2.11.- Tercera Dosificación, 70% Ripio, (Morales et al., 2018).	35
Tabla 2.12.- Cuarta Dosificación, 70% Ripio, (Macas E., 2006).	36

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1.1.- Informe del Laboratorio Hormigón, Suelos y Materiales "Bolívar Ortiz Logroño". Resultados del ensayo a flexión Primera Dosificación.	71
Anexo 1.2.- Informe del Laboratorio Hormigón, Suelos y Materiales "Bolívar Ortiz Logroño". Resultados del ensayo a flexión Segunda Dosificación.	72

Anexo 1.3.- Informe del Laboratorio Hormigón, Suelos y Materiales "Bolívar Ortiz Logroño". Resultados del ensayo a flexión Tercera Dosificación.	73
Anexo 1.4.- Informe del Laboratorio Hormigón, Suelos y Materiales "Bolívar Ortiz Logroño". Resultados del ensayo a flexión Cuarta Dosificación.	74
Anexo 1.5.- Datos de Cilindros de la Primera Dosificación.	75
Anexo 1.6.- Datos de Cilindros de la Segunda Dosificación.	78
Anexo 1.7.- Datos de Cilindros de la Tercera Dosificación.	81
Anexo 1.8.- Datos de Cilindros de la Cuarta Dosificación.	84

INTRODUCCION

Antecedentes

El uso de hormigones ligeros en la construcción ha tomado mayor interés en las últimas décadas, debido a sus ventajas en la reducción de la carga muerta de las estructuras y de la posibilidad de mejorar el comportamiento de esta bajo cargas sísmicas en edificios de mediana y gran altura. (Oliveros Andrade & Tapahuasco Guillén, 2019)

Entre los materiales más utilizados para dosificar hormigones aligerados se encuentran la arcilla expandida, la perlita, el poliestireno expandido y la piedra pómez. Con estos componentes es posible obtener hormigones con resistencias a la compresión que oscilan entre 18 MPa y 26 MPa, presentando siempre densidades menores en relación con los hormigones convencionales. (Díaz L., et al., 2022)

El Código ACI 213R-14: "Guide for Structural Lightweight-Aggregate Concrete" y la norma ASTM C330 / C330M: "Standard Specification for Lightweight Aggregates for Structural Concrete", avalan la utilidad estructural de estos hormigones livianos y recalcan que, para su aplicación, es esencial que cumplan con las resistencias a la compresión superiores a 17 MPa y densidades inferiores a 1850 kg/m³.

La norma española (España, 2021) menciona por otro lado un valor de densidad para hormigones ligeros inferiores a 2000 kg/m³ y superiores a 1200 kg/m³. En adición, la norma no presenta valores de resistencia a la compresión, sin embargo, argumenta una resistencia mínima de 12 MPa para hormigones en masa y 25 MPa para hormigones armados o pretensados.

Las investigaciones ecuatorianas sobre hormigón aligerado han demostrado resultados efectivos en el uso de agregados locales como piedra pómez y arcilla expandida. Morales et al. (2018) demostraron que la piedra pómez puede producir hormigones de baja densidad con resistencias superiores a 20 MPa, por otro lado, Yagual Vera y Villacís (2015) muestran que la arcilla expandida nacional permite alcanzar resistencias comparables a las de un hormigón convencional liviano. Por último, Valle et al., (2024) confirma que los agregados ligeros provenientes de la costa ecuatoriana son materiales viables para la elaboración de hormigones estructurales livianos.

Los estudios anteriormente presentados se han centrado en ensayos de compresión simple, evidenciándose una limitada evaluación del comportamiento estructural a flexión o de elementos como vigas y losas. Esta carencia evidencia la necesidad de estudios que profundicen en la respuesta mecánica de los hormigones ligeros mediante modelado o experimentación estructural, contribuyendo al desarrollo del conocimiento local sobre su posible aplicación en edificaciones ecuatorianas.

Justificación

La industria de la construcción demanda de manera continua la generación de ideas innovadoras que permitan optimizar los recursos y mejorar el desempeño estructural. Es por ello por lo que, la incorporación de hormigones ligeros se presenta como una alternativa viable, capaz de reducir el peso de las edificaciones sin comprometer de forma significativa su resistencia. La evaluación de las resistencias y los esfuerzos a compresión y flexión, mediante el modelado de vigas y otros elementos estructurales a escala, establece un paso fundamental dentro de los estudios investigativos en ingeniería civil.

Un punto positivo de esta investigación es la disponibilidad de los agregados para la fabricación de los hormigones aligerados y la existencia de laboratorios universitarios que ayudaran a la realización de los respectivos ensayos normalizados. Por consiguiente, evaluar la respuesta de distintas dosificaciones bajo esfuerzos de flexión y compresión contribuyen un procedimiento metodológico sólido para el análisis de los hormigones de bajas densidades.

La validación empírica del comportamiento mecánico del hormigón ligero busca establecer un precedente técnico que respalde su uso confiable en sistemas constructivos locales, bajo los criterios de las normativas nacionales e internacionales.

Problema De Investigación

Aunque existen investigaciones previas sobre dosificaciones de hormigón ligero con piedra pómez en Ecuador, los estudios sobre variabilidad de agregados en sus dosificaciones son escasos, es por ello por lo que es necesario evaluar el desempeño mecánico de distintas dosificaciones con la variabilidad de los agregados entre las regiones, costa y sierra.

El presente trabajo busca reducir esta brecha, con el objetivo de proporcionar datos confiables que impulsen el uso de este material a nivel local. De esta forma, la investigación aspira a trascender el ámbito académico y tener un impacto tangible en la práctica profesional y social.

Dentro de los principales beneficiarios de esta investigación son los profesionales de la industria de la construcción, quienes tendrán a su alcance los resultados experimentales y de modelado que fortalezcan la investigación en este campo. La reducción del peso de las estructuras mediante el uso de hormigones aligerados beneficia a las empresas constructoras, puesto que disminuye el costo de las cimentaciones y mejora el comportamiento de las edificaciones, especialmente frente a cargas sísmicas.

El objetivo general de esta investigación es:

Evaluar el desempeño mecánico, bajo esfuerzos de compresión y flexión de un hormigón estructural aligerado, elaborado con piedra pómez y materiales de la costa ecuatoriana, para valorar su viabilidad estructural.

Para ello se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Evaluar la aplicación de dosificaciones de hormigón aligerado a partir de la obtención del material en las condiciones de la provincia Manabí.
- Establecer propuestas de dosificaciones de hormigones aligerados que cumpla con los requisitos de densidad y resistencia a la compresión acorde con la NEC-SE-HM utilizando materiales locales.
- Obtener las propiedades y comportamiento de los hormigones aligerados en probetas y una viga a escala realizando ensayos estandarizados en cada caso.
- Analizar la viabilidad estructural del hormigón estructural aligerado para su empleo en elementos estructurales correlacionando los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio.

Metodología

La metodología de este trabajo comprende tres fases principales. En la primera fase, se evaluará una dosificación experimental del hormigón aligerado diseñada y evaluada en la sierra ecuatoriana, para ello se emplearán agregados disponibles en la costa ecuatoriana, con el objetivo de encontrar y comparar resistencias a compresión; en caso de ser necesario se hará un rediseño en la dosificación, basado en las resistencias de los materiales de la costa. En la segunda fase, se elaborará una viga a escala reducida, la cual será sometida a ensayos de flexión en laboratorio. Finalmente, en la tercera fase, se compararán los resultados experimentales con los valores teóricos y normativos, determinando la viabilidad del material para su aplicación estructural.

Estructura De Capítulos

Finalmente, la presente tesis se estructura en cuatro capítulos, cuyo contenido se detalla a continuación:

- Capítulo I. Estado del arte: Presenta el marco teórico y los antecedentes de investigaciones previas sobre hormigones aligerados, sus materiales constitutivos, propiedades mecánicas y normativas aplicables.
- Capítulo II. Materiales y métodos: Describe los procedimientos experimentales, los materiales empleados, la metodología de dosificación y el diseño de la viga sometida a flexión.
- Capítulo III. Evaluación de resultados: Analiza los resultados obtenidos en los ensayos de compresión y flexión, contrastándolos con los valores teóricos y normativos.

CAPITULO I ESTADO DEL ARTE

1.1. Conceptos Generales del Hormigón Ligero

Valdez Guzman & Suarez Alcivar, (2010) mencionan que: “Se designa convencionalmente como hormigones ligeros o livianos a aquellos que producen una densidad que fluctúa entre 300 kg/m^3 y 1900 kg/m^3 , ya que los normales presentan una densidad normal de 2400 kg/m^3 .”

El hormigón convencional al estar compuesto por agregados pétreos de alta densidad desarrolla una resistencia a la compresión superior y una menor porosidad, sin embargo, al poseer ese tipo de agregados densos, su peso propio incrementa considerablemente.

La resistencia a la compresión del hormigón ligero estructural varía entre 17 y 28 MPa, mientras que su resistencia a la tracción equivale al 8-15% de dicho valor. Al contrastarlo con el hormigón convencional, el ligero muestra un mejor desempeño a tracción en resistencias bajas, hasta 25 MPa, pero pierde efectividad en resistencias altas, superiores a 35 MPa, debido a la fragilidad del árido. Además, el hormigón ligero se caracteriza por ser menos rígido, es decir menor módulo de elasticidad, pero más deformable bajo cargas máximas que el convencional. (Olmedo et al., 2016)

La reducción del peso en estructuras permite tener un menor costo total en estructuras prefabricadas, y genera una reducción significativa de las cargas sobre vigas, pilares y cimientos en la construcción general. Específicamente, es ideal en estructuras postensadas, donde ayuda a la armadura activa a resistir el peso propio, y en recrecidos de hormigón, donde en ocasiones evita la necesidad de apuntalamiento inferior al aligerar la carga sobre la estructura base. Además de la reducción de cargas verticales, su menor masa es crucial en zonas de actividad sísmica, ya que la carga asociada al sismo depende directamente de la masa estructural, y ofrece beneficios secundarios importantes como la mejora en el aislamiento térmico en muros resistentes de fachada y la posibilidad de reducir el espesor de elementos estructurales que requieren una alta protección frente al fuego. (Olmedo et al., 2016)

El hormigón ligero puede clasificarse en tres grupos según su aplicación prevista:

- **Estructural:** Destinado a la construcción de elementos de carga como vigas, losas y columnas. De acuerdo con la normativa NEC-SE-HM, su resistencia se limita a un máximo de 35 MPa.
- **No Estructural:** Empleado principalmente en rellenos de pisos y elementos prefabricados livianos, con una resistencia a la compresión que es menor a 17 MPa. (ASTM C330/C330M, 2017)
- **Aislante:** Diseñado específicamente para proporcionar aislamiento térmico o acústico, priorizando la baja densidad sobre la capacidad portante.

1.1.1. Hormigones Ligeros Estructurales

La norma ACI 213R-14, (2014) clasifica los hormigones estructurales en:

- **Hormigón Ligero Estructural:** Es aquel hormigón confeccionado con agregado ligero conforme a ASTM C330, que posee una densidad de equilibrio entre 1.120 y 1.920 kg/m³ y una resistencia a la compresión a los 28 días superior a 17 MPa.
- **Hormigón Ligero de Alta Resistencia:** Es aquel que alcanza una resistencia a la compresión igual o superior a 41 MPa. Este material desafía la noción tradicional de que ligero implica débil, permitiendo su uso en elementos sometidos a altas solicitaciones.

Por otro lado, Expanded Shale, Clay and Slate Institute (ESCSI), (2008) establece otros dos tipos de hormigones aligerados:

- **Hormigón Totalmente Ligero:** Mezcla compuesta exclusivamente por agregado grueso ligero y agregado fino ligero. Este tipo de hormigón presenta las menores densidades posibles, pero también las mayores reducciones en propiedades mecánicas como el módulo de elasticidad y la resistencia a la tracción.
- **Hormigón Ligero con Arena:** Es una mezcla que combina agregado grueso ligero con agregado fino de peso normal, arena natural. Esta es la variante más común en la industria debido a que la arena natural mejora la trabajabilidad, el acabado superficial y, crucialmente, el módulo de elasticidad y la resistencia al corte en comparación con la mezcla totalmente ligera.

En este trabajo de investigación se analizará hormigones ligeros de tipo estructural, puesto que su principal ventaja es la reducción del peso muerto de los elementos frente a hormigones convencionales.

1.2. Hormigón Celular

El hormigón celular es un material de construcción ligero caracterizado por una estructura macroscópica de poros uniformemente distribuidos. Se produce mediante la introducción de gas o espuma en una mezcla de cemento, lo que resulta en una reducción significativa de la densidad en comparación con el hormigón convencional. (Sanchez de Guzman , 2001)

El hormigón celular se clasifica principalmente en dos tipos basándose en el método de formación de poros y el proceso de curado.

- El Hormigón Celular Curado en Autoclave, es el tipo predominante para elementos prefabricados estructurales. Se obtiene mediante la adición de un agente expansor, típicamente polvo de aluminio, que reacciona químicamente con el hidróxido de calcio y el agua para liberar gas hidrógeno (Narayanan & Ramamurthy, 2000)
- El Hormigón Celular Espumoso, este se produce inyectando una espuma preformada estable directamente en la mezcla de mortero fresco. Este método no requiere autoclave, permitiendo su producción y vertido *in situ*. (Comité 523 del ACI, 2013)

Los rangos típicos de densidad para hormigones celulares varían entre 300 kg/m³ y 800 kg/m³, para aplicaciones de aislamiento y tabiquería ligera. El ACI 523 (2013), define que “El hormigón celular de baja densidad como aquel con una densidad secada al horno igual o inferior a 800 kg/m³”.

Para densidades de uso común, de 600 a 800 kg/m³, la resistencia de los hormigones celulares oscila entre 2.5 y 10 MPa. Aunque esta es inferior al hormigón tradicional, su relación resistencia peso es altamente eficiente para mampostería portante de baja altura. (Narayanan & Ramamurthy, 2000)

La limitación más inmediata y cuantificable del hormigón celular es su resistencia a la compresión, que es de magnitud inferior a la del hormigón estructural moderno. Mientras

que la normativa actual, ACI 318, contempla hormigones estructurales con resistencias características que parten de los 25 MPa y alcanzan rutinariamente los 50, 80 o incluso 100 MPa, este hormigón celular opera en un rango precario de 2 a 6 MPa. (Robert G. & Rossiter Jr, 1988)

Por otro lado, el mecanismo de trabazón mecánica falla catastróficamente. Las barras de acero corrugado están diseñadas para interactuar con un material rígido y resistente, es decir los agregados pétreos, esto permite que pueda soportar las altas presiones de contacto en la cara de las corrugas. El hormigón celular, al ser blando y poroso, no ofrece esta resistencia. Cuando la barra de acero se tracciona, las corrugas actúan como cuchillas que "cortan" o trituran la matriz de tobermorita adyacente en lugar de trabarse en ella. (Alhashimi & Ghareb, 2019)

El caso más documentado de fallo sistémico del hormigón celular como material estructural es la crisis del RAAC (*Reinforced Autoclaved Aerated Concrete*) en el Reino Unido, que ha obligado al cierre urgente de cientos de escuelas, hospitales y edificios públicos construidos entre 1950 y 1990.

El artículo de Korec Evsen et al (s. f), indica que se han identificado modos de fallo consistentes que explican por qué el material no funciona:

- **Fallo de Cortante en el Apoyo:** Los paneles de techo han fallado cerca de los apoyos, vigas o muros. La grieta de cortante se inicia y propaga casi verticalmente debido a la falta de trabazón de agregados. El refuerzo longitudinal, a menudo mal anclado o desplazado durante la fabricación, no logra interceptar la grieta eficazmente.
- **Deslizamiento de Anclaje:** Se mostro que las barras de refuerzo se retraen dentro del panel, evidenciando la pérdida total de adherencia. En muchos casos, las barras transversales de anclaje soldadas, elementos necesarios por la falta de adherencia natural, estaban mal posicionadas o corroídas.
- **Colapso por Flecha Excesiva y Encharcamiento:** Se evidenciaron paneles que se deformaron excesivamente por fluencia permitieron la acumulación de agua, saturando el material y llevando la tensión de las armaduras más allá del límite elástico, culminando en ruptura dúctil o fallo de compresión del cordón superior.

Debido a lo presentado, el hormigón aligerado celular no puede ser usado como material para elementos estructurales, por lo que en el presente trabajo no será empleado como caso de estudio para la dosificación del hormigón.

1.3. Áridos o Agregados Ligeros para Hormigón

El uso de agregados ligeros constituye de manera esencial la elaboración de hormigones de baja densidad, al sustituir los áridos convencionales de alta densidad se reduce la masa volumétrica del hormigón.

Entre los agregados ligeros más utilizados están la piedra pómez, la arcilla expandida y la perlita, sin embargo, este último es usado principalmente para hormigones aislantes y no estructurales. (Díaz et al., 2022)

La piedra pómez es un agregado liviano que se usa mucho en la construcción porque tiene buena resistencia mecánica y baja estructura porosa, por lo tanto, las propiedades del concreto ligero en base a este agregado, aportan las exigencias de los concretos semi ligeros. En Ecuador se ha evaluado este agregado debido a su disponibilidad en zonas volcánicas. (Valle et al., 2024)

Por último, las arcillas expandidas producen concreto con una densidad entre 1400 y 1800 kg/m³. Aunque sea han obtenido valores de hasta 800 kg/m³. El concreto hecho con agregado de esquisto o arcilla expandida tienen por lo general más resistencia que cuando se emplea cualquier otro agregado ligero. (Yagual Vera & Villacis Apolinario, 2015)

La disponibilidad de agregados ligeros en Ecuador es un factor que puede facilitar o reducir su incorporación en la práctica estructural. La piedra pómez de origen volcánico al ser un recurso natural accesible, principalmente en provincias como Cotopaxi y Latacunga, facilita su extracción para uso como agregados livianos en hormigones.

1.3.1. Propiedades físicas y mecánicas de los agregados ligeros.

La calidad de los hormigones ligeros depende de manera principal de la calidad del árido. En el hormigón convencional, el agregado suele ser más resistente que la pasta de cemento, por lo que, en los hormigones ligeros, el agregado limita la resistencia máxima del compuesto. (ASTM C330/C330M, 2017)

La norma ASTM C330 establece límites estrictos para la granulometría. A diferencia del agregado normal, la segregación en el agregado ligero es crítica, puesto que las partículas más grandes tienden a flotar si la mezcla es muy fluida. Una graduación continua es esencial para trabajar la mezcla.

Designación del tamaño nominal	25,0 mm (1 in.)	19,0 mm (¾ in.)	12,5 mm (½ in.)	9,5 mm (¾ in.)	4,75 mm (Nº 4)	2,36 mm (Nº 8)	1,18 mm (Nº 16)	300 µm (Nº 50)	150 µm (Nº 100)	75 µm (Nº 200)
Agregado fino 4,75 mm a 0	-	-	-	100	85-100	40-80	10-35	5-25	-	-
Agregado grueso										
25,0 mm a 4,76 mm	95-100	25-60	0-10	0-5	-	-	-	-	-	0-10
19,0 mm a 4,75 mm	100	90-100	10-50	0-15	-	-	-	-	-	0-10
12,5 mm a 4,75 mm	-	100	90-100	40-80	20-40	0-20	0-10	-	-	0-10
9,5 mm a 2,36 mm	-	-	100	80-100	50-40	0-20	0-10	-	-	0-10
Agregado combinado fino y grueso										
12,5 mm a 0	-	100	95-100	-	50-80	-	5-20	2-15	-	0-10
9,5 mm a 0	-	-	100	90-100	85-90	35-65	10-25	5-15	-	0-10

Figura 1.1.- Requisitos de Gradación para Agregados Livianos para Concreto Estructural.

Tomado de: Normativa ASTM C330.

1.4. Densidad a Granel y Requisitos de Resistencia

La norma ASTM C330 impone límites a la densidad del material suelto y seco para asegurar que el material pueda ser considerado ligero antes de entrar a la mezcla. En ella se indica que la densidad máxima del agregado fino será de un máximo de 1.120 kg/m³ y el agregado grueso será de un máximo 880 kg/m³. (ASTM C330/C330M, 2017)

Además, la norma exige una prueba de desempeño única: el agregado debe ser probado dentro de un hormigón. Debido a que no se puede medir la resistencia de una partícula porosa individualmente (como se hace con la roca mediante el ensayo de carga puntual o Abrasión de Los Ángeles), se debe fabricar un hormigón de prueba. Este hormigón debe cumplir con la relación densidad/resistencia especificada en la *Figura 1.2*.

Densidad de equilibrio calculada máx., kg/m³ (lb/ft³)	Resistencia a tracción indirecta promedio a 28 días, mínima MPa (psi)	Resistencia a compresión promedio a 28 días, mínima MPa (psi)
Todos los agregados livianos		
1760 (110)	2.2 (320)	28 (4000)
1680 (105)	2.1 (300)	21 (3000)
1600 (100)	2.0 (290)	17 (2500)
Combinación de agregados normales y livianos		
1840 (115)	2.3 (330)	28 (4000)
1760 (110)	2.1 (310)	21 (3000)
1680 (105)	2.1 (300)	17 (2500)

Figura 0.1.- Requisitos de Resistencia a la Compresión y Resistencia a Tracción Indirecta.

Tomado de: Normativa ASTM C330

1.5. Ensayos de Caracterización de Agregados Fino y Grueso

Un agregado fino es aquel material que pasa por el tamiz de 3/8" (9.5 mm), además de poder ser tamizado por el No. 4 (4.75 mm) y es finalmente retenido por el No. 200 (75 um). Por otro lado, un agregado grueso es un material granular de estructura pétreo, se caracteriza por tener una geometría mayor a 4.75 mm, como por ejemplo las gravas, piedra triturada o canto rodado.

Códigos Internacionales como el ASTM, AASHTO, Norma Europea (EN), determinan ensayos a realizar para los agregados ligeros y gruesos, de manera que regula los requisitos físicos y de calidad de los agregados, a continuación, se detallarán los ensayos regidos por normativa ASTM.

1.5.1. Granulometría (C136/C136M)

Es la distribución de los diferentes tamaños de las partículas existentes en los agregados medidos por un análisis de tamices. En este ensayo se determina la distribución de tamaños de partículas de los agregados. De acuerdo con ASTM C136/C136M, (2019), los tamices utilizados a manera de coladores para agregados finos varían desde la malla No. 200 hasta 4.75 mm.

AGREGADO	ASTM C136	(mm)
Grueso	2"	50.8
	1 1/2"	37.5
	1"	26.5
	3/4"	19
	1/2"	13.2
	3/8"	9.5
Fino	No. 4	4.75
	No. 8	2.36
	No. 16	1.18
	No. 30	600 μm
	No. 50	300 μm
	No. 100	150 μm
	No. 200	75 μm

Figura 0.2.- Tamaño de tamices según el tipo de agregado.

Tomado de: Normativa ASTM C136

1.5.2. Peso Unitario (C29/C29M)

Este mide la densidad aparente del material grueso y fino, ya sea suelto o compactado, además, este valor es de gran importancia para evaluar la porosidad del agregado. El peso volumétrico es la representación total del árido, incluyendo las partículas del agregado y los vacíos existentes.



Figura 0.3.- Materiales utilizados en el ensayo de Peso Unitario.

Tomado de: Calderón et al., 2015.

1.5.3. *Peso Específico y Absorción (C128-04a)*

Determina el peso específico seco, peso específico saturado con superficie seca (SSS), peso específico aparente y la absorción del agua después de 24 horas, parámetro crítico para los agregados ligeros, importante para la preparación de un hormigón.



AASHTO T 84

Figura 0.4.- Esquema de la forma del agregado al alcanzar el estado SSS.

Tomado de: Sosa et al., 2023.

1.5.4. *Contenido de humedad superficial (C70 o C566)*

Se refiere a la cantidad de agua superficial retenida por las partículas de los agregados, este, además, está relacionado con la porosidad de las partículas. Necesario para realizar posibles correcciones en el contenido de agua en la dosificación de los hormigones.

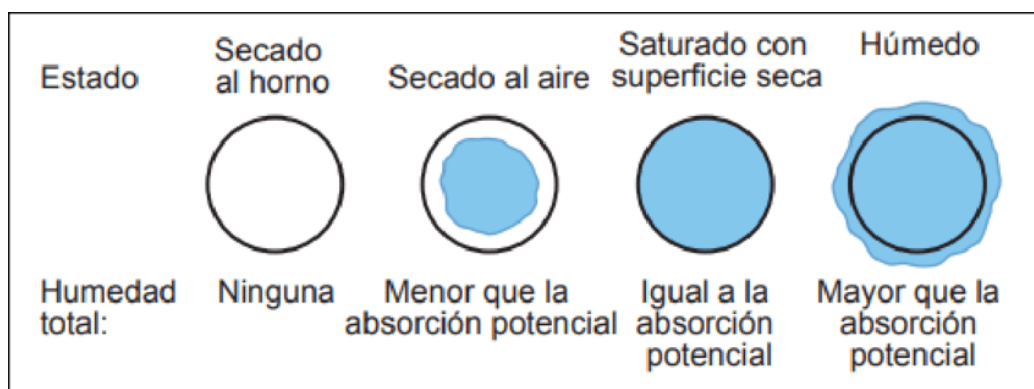


Figura 0.5.- Condiciones de humedad de los agregados.

Tomado de: Becerra, 2018.

1.5.5. Degradación o resistencia al desgaste (C131M-14)

En este ensayo se determina la resistencia mecánica de los agregados grueso al ser sometido por una máquina (Máquina de Los Ángeles), además, mide la durabilidad y resistencia que tendrá el hormigón.



Figura 0.6.- Máquina de Los Ángeles.

1.5.6. Impurezas orgánicas (C40)

Ensayo que evalúa la cantidad de impurezas o material orgánicos en los agregados finos, cuya presencia en los agregados pudiese afectar negativamente al fraguado del hormigón. Este ensayo se efectúa por una prueba de colorimétrica con hidróxido de sodio, como se muestra en la *Figura 1.8*.



Figura 0.7.- Prueba de impurezas inorgánicas en el agregado fino.

Tomado de: Aguilera & Aguirre, 2021.

1.6. Métodos de Dosificación de Hormigones

Una de las metodologías para la dosificación de hormigones es la planteada por el ACI 211.1 (2002), en la que estipula un número de pasos para su elaboración, de manera que asegure la calidad del hormigón.

1.6.1. Método ACI

Paso 1: Selección del Asentamiento:

En este paso se define el rango de asentamiento permitido, cuyo valor en centímetros varía según el tipo de elemento a fundir y define la trabajabilidad de la mezcla, esta tabla se muestra a continuación:

ASENTAMIENTOS RECOMENDADOS PARA VARIOS TIPOS DE CONSTRUCCIÓN

TIPO DE CONSTRUCCIÓN	ASENTAMIENTO (cm)	
	MÁXIMO	MÍNIMO
FUNDICIONES: PAREDES Y ZAPATAS REFORZADAS	12.7	5
ZAPATAS SIMPLES, CAISSONS Y MUROS DE SUBESTRUCTURAS	10	2.5
LOSAS, VIGAS Y PAREDES REFORZADAS	15	7.6
PAVIMENTOS Y VEREDAS	7.6	5
CONSTRUCCIONES	7.6	2.5

Figura 0.8.- Tabla de asentamientos para varios tipos de construcción.

Tomado de: ACI 211.1.

Paso 2. Elección del Tamaño Máximo Nominal:

La selección del tamaño máximo nominal tiene una incidencia directa en la dimensión de las secciones de los elementos estructurales, debido al espaciamiento libre entre los aceros de refuerzos de acero, de manera que siempre sea elegido el de mayor dimensión.

TAMAÑO MÁXIMO DE AGREGADO RECOMENDADO PARA VARIAS OBRAS

Dimensión Mínima de la Sección (cm)	TIPOS DE CONSTRUCCIÓN			
	Paredes, Vigas, Columnas	Muros sin Refuerzo	Losa Fuertemente Armadas	Losa Ligeramente Armada o Sin Refuerzo
6.4 - 12.7	1.27 - 1.9	1.9	1.9 - 2.5	1.9 - 3.8
15.2 - 28.0	1.9 - 3.8	3.8	3.8	3.8 - 7.6
30.5 - 73.7	3.8 - 7.6	7.6	3.8 - 7.6	7.6
76.2 - más	3.8 - 7.6	15.2	3.8 - 7.6	7.6 - 15.2

Figura 0.9.- Tabla del Tamaño Máximo del Agregado Grueso.*Tomado de: ACI 211.1.***Paso 3. Estimación del Contenido de Aire:**

El contenido volumétrico de aire en un hormigón es beneficioso a parámetros como la cohesión y manejabilidad de la mezcla, en casos de congelamiento y deshielos, es necesario la inclusión de aire adicional o intencional.

Paso 4. Estimación de la Cantidad de Agua de Mezclado:

Para este paso, se realiza una relación de valores obtenidos en los pasos anteriores, el asentamiento y el tamaño máximo del agregado seleccionados; de esta manera, se logra obtener la cantidad de agua necesaria.

TAMAÑO MÁXIMO DEL AGREGADO GRUESO

Asentamiento (cm)	0.95	1.27	1.9	2.54	3.81	5.08	7.62	15.24
Hormigón sin Aire Incluido								
2.5 a 5.1	208	198	183	178	163	153	144	124
7.6 a 10.2	228	218	203	193	178	168	158	139
15.2 a 17.8	243	228	213	203	188	178	178	149
Cantidad aproximada de aire atrapado (%)	3	2.5	2	1.5	1	0.5	0.3	0.2
Hormigón con Aire Incluido								
2.5 a 5.1	183	178	163	153	144	134	124	109
7.6 a 10.2	203	193	178	168	158	149	139	119
15.2 a 17.8	213	203	188	178	168	158	149	129
Porcentaje de Aire Atrapado (%)	8	7	6	5	4.5	4	3.5	3

Figura 0.10.-Tabla de Tamaño Máximo del Agregado Grueso.*Tomado de: ACI 211.1.*

Paso 5. Elección de la Relación de Agua / Cemento:

Este parámetro es sumamente importante en la dosificación, puesto que, define de gran manera, la resistencia a la compresión que se necesita en el hormigón en laboratorio, cuyos valores se muestran a continuación:

<i>Resistencia a la compresión a los 28 días (kg/cm²)</i>	<i>Relación agua/cemento (a partir del peso)</i>	
	<i>Concreto sin aire incluido</i>	<i>Concreto con aire incluido</i>
420	0.41	-
350	0.48	0.4
280	0.57	0.48
210	0.68	0.59
140	0.82	0.74

Figura 0.11.- Tabla de la Relación de Agua / Cemento.

Tomado de: ACI 211.1.

Paso 6. Cálculo de la Cantidad de Cemento:

Una vez determina el volumen de agua necesaria y la relación de agua / cemento, se aplica la relación entre los dos valores, como lo define el código ACI 211.1

$$\text{Cantidad de Cemento} = \frac{\text{Volumen de Agua}}{\text{Relación de Agua / Cemento}}$$

Paso 7. Estimación del Volumen de Agregados:

Para la obtención del volumen de agregados necesarios, se relaciona el módulo de finura y el tamaño máximo nominal del agregado (*Paso 2*), estos valores se presentan a continuación:

Tamaño Máximo del Agregado grueso (mm)	Módulo de Finura de la Arena			
	2.4	2.6	2.8	3
9.5	0.5	0.48	0.46	0.44
12.5	0.59	0.57	0.55	0.53
19	0.66	0.64	0.62	0.6
25	0.71	0.69	0.67	0.65
37.5	0.75	0.73	0.71	0.69
50	0.78	0.76	0.74	0.72
75	0.82	0.8	0.78	0.76
150	0.87	0.85	0.83	0.81

Figura 0.12.- Tabla del Módulo de Finura de la Arena.

Tomado de: ACI 211.1.

Para calcular el volumen de agregado fino se debe de restar al volumen total de la dosificación, es decir 1 m^3 , la suma de agregado grueso, agua, aire y el cemento:

$$V_{arena} = 1\text{m}^3 - V_{agua} - V_{cemento} - V_{ripio} - V_{aire}$$

Paso 8. Ajuste por Humedad:

En el campo laboral, los materiales no se encontrarán en las condiciones ideales que la condición superficie saturada seca (SSS), afectando directamente a la cantidad de agua determinada para la mezcla. Es por ello, que se realiza una corrección del agua, en donde se reduce al volumen de agua aportada por la humedad de los agregados, es decir, el contenido de humedad total menos el porcentaje de absorción de los agregados utilizados. (ACI 211.1, 2002)

Paso 9. Ajuste de la Mezcla de Prueba:

Este paso es realizado cuando el asentamiento no cumple con lo estipulado, es por ello, que se realiza un cilindro de prueba, en donde se efectúan reajuste de humedad, y se verifica el asentamiento y la trabajabilidad del hormigón.

1.7. Diseño de Mezclas con Piedra Pómez como Agregado Ligero

1.7.1. Propiedades de la piedra pómez ecuatoriana.

Para el alcance de esta investigación, se recurrirá a la Fábrica de Bloques Eloy Alfaro, de donde se proporcionará este material, para posteriormente realizar la trituración manual del material, hasta alcanzar el diámetro requerido.

La piedra pómez utilizada en la dosificación de hormigones aligerados es mayormente triturada, cuyos tamaños obtenidos posterior son variados, la densidad de esta piedra ronda entre los 0.3 a 0.9 gr/cm³, y su dureza es de 5 a 6 Mohs¹.

De acuerdo con el estudio realizado por Macías O., (2006), en donde se obtuvieron los siguientes resultados de las propiedades físicas de la piedra pómez, cuyos valores se tomarán como referencia para el conocimiento general de las propiedades de este material.

<i>Material</i>	<i>Densidad real (SSS) gr/cm³</i>	<i>Densidad Seca gr/cm³</i>	<i>Porcentaje de Absorción %</i>	<i>Módulo de finura</i>	<i>Tamaño máximo mm</i>	<i>Densidad aparente suelta gr/cm³</i>	<i>Densidad aparente compactada gr/cm³</i>	<i>Contenido total de Humedad %</i>
<i>Piedra Pómez</i>	1.05	0.59	77.26	6.08	12.5	0.31	0.33	19.85

Figura 0.13.- Propiedades Físicas de la Piedra Pómez.

Tomado de: Macías O., 2006.

Como se puede observar de los resultados mostrados por Macas, los parámetros de humedad como el porcentaje de absorción y contenido de humedad son elevados, información relevante en la elaboración del hormigón aligerado, puesto que, esta absorción de humedad afectaría considerablemente a la cantidad de agua de la mezcla.

Es por ello por lo que se recomienda, antes del proceso de la elaboración del hormigón ligero, la piedra pómez sea sumergida en agua durante un tiempo de 24 horas, ya que, es idóneo que el material se encuentre en estado saturado con superficie seca (SSS), de

¹ Escala que mide la capacidad de un material de resistir a rayaduras proporcionadas por otro material (Nesse, 2017).

esta manera, la cantidad de agua determinada para la mezcla, no se verá afectada. (Morales Gubio et al., 2018)

1.8. Estudios Nacionales Previos

Para la elaboración de esta investigación, se tomarán trabajos de titulación y/o artículos con tema de dosificación de hormigones aligerados cuyo material principal sea piedra pómez, además que los valores de densidad y resistencia obtenidos estén afines con el objetivo de este trabajo y estén dentro de los rangos permitidos por las normativas vigentes.

La primera dosificación por evaluar es la elaborada por Morales, Santamaría, Caicedo y Tipán, cuyo diseño parte de tres normativas: ACI 318-14, ACI 211.1-98 y ACI 213R-14. Obteniendo una resistencia a la compresión de 282.3 kg/cm² y una densidad de 1.91 kg/cm³, la cantidad de los agregados para 1m³ de hormigón se presenta a continuación:

MATERIAL	PESOS (kg)	DOSIFICACIÓN
<i>Agua</i>	208	0.45
<i>Cemento</i>	462.22	1
<i>Arena</i>	792.40	1.71
<i>Pómez</i>	326.54	0.71
<i>Aditivo (Superplastificante SF-106)</i>	4.62	0.01

Figura 0.14.- Primera Dosificación de Hormigón Aligerado.

Tomado de: Morales et al., 2018

La siguiente investigación tomada como referencia es la elaborada por (Macas, 2006), cuyo proceso de dosificación se basa en la norma ACI 211.2-98 específicamente por el “Método por Peso”, en donde evaluaron los resultados de resistencia y densidad con piedra pómez triturada, manejando varias relaciones de agua y cemento. Se considerará la dosificación con la piedra pómez con relación de agua / cemento de 0.45, cuya resistencia a los 28 días fue de 21.7 MPa y densidad de 1753.82 kg/cm³.

<i>Material</i>	Cantidad en peso para 1m³ (Kg)	Dosificación
<i>Agua</i>	225	0.45
<i>Cemento</i>	500	1
<i>Arena</i>	850	1.70
<i>Piedra Pomez</i>	350	0.7
<i>Plastificante</i>	1	0.002

Figura 0.15.- Segunda Dosificación de Hormigón Aligerado.

Tomado de: Macas E., 2006.

1.9. Ensayos para Evaluar el Comportamiento del Hormigón Liger

1.9.1. Ensayo de Resistencia a la Compresión

Es necesario determinar la resistencia a la compresión del hormigón aligerado para evaluar su capacidad portante. Según ACI 318 (2022), la resistencia a compresión es el parámetro principal para clasificar a un hormigón como estructural.

Para realizar este ensayo es necesario elaborar cilindros de 150 mm × 300 mm o 100 mm × 200 mm. En estos se realizará una compactación mediante mesa vibratoria o varillado en dos capas.

Para el curado del cilindro, las probetas se sumergen en agua saturada a 23 ± 2 °C hasta el día del ensayo, es importante tener en cuenta que el curado mínimo será entre 7 y 28 días, siendo 28 días el valor de resistencia estructural.

Para evaluar los cilindros se ubicarán los cilindros centrados en la maquina universal, y se aplicara una velocidad de carga de 0.25 MPa/s a 0.05 MPa/s De acuerdo con ACI 213R (1999), un concreto aligerado se considera estructural cuando cumple, una resistencia mínima a los 28 días mayor o igual a 17MPa.

Se considera que un hormigón ligero estructural presenta normalmente una densidad de equilibrio comprendida aproximadamente entre 1440 y 1850 kg/m³, de acuerdo con los criterios establecidos por ACI y ASTM para el hormigón estructural ligero. Valores de densidad inferiores a este rango suelen corresponder a hormigones extremadamente ligeros, los cuales se emplean generalmente con fines no estructurales o aislantes, dependiendo de los requisitos del proyecto.

1.9.2. Ensayo del Módulo de Rotura o Flexión

El ensayo de módulo de rotura permite evaluar la resistencia del hormigón aligerado frente a esfuerzos de tracción indirecta inducidos por flexión, propiedad fundamental para el análisis y diseño de elementos estructurales como losas, vigas y tableros de puentes. Este parámetro se determina mediante ensayos normalizados de flexión en vigas prismáticas, conforme a los procedimientos establecidos en la norma ASTM C78 (2021), que emplea el método de carga en los puntos tercios. Asimismo, la norma ASTM C293 (2016) establece el procedimiento para la determinación de la resistencia a la flexión mediante el método de carga en el punto medio.

Para realizar las probetas en este procedimiento se necesitarían prismas de 150 mm × 150 mm × 500 o 600 mm, colados y compactados con el mismo procedimiento del hormigón de obra. El curado se realizará de igual manera que para los ensayos de compresión.

Para ejecutar el ensayo, la viga se coloca simplemente apoyada y se aplica una carga creciente de manera uniforme hasta la falla, a partir de la cual se determina el módulo de rotura. De acuerdo con la guía ACI 213R (2014), para el hormigón aligerado el módulo de rotura puede estimarse como un valor comprendido entre 0.45 y 0.65 $\sqrt{f'_c}$.

1.10. Relaciones porcentuales de agregado grueso

Rodríguez Ticona (2021), evaluó un diseño patrón con 0% de piedra pómez, 40% de reemplazo de agregado grueso convencional por piedra pómez. Utilizó un aditivo plastificante para compensar pérdidas y buscar un hormigón estructural de 21 MPa. Mediante su estudio encontró que, a los 28 días, el diseño patrón alcanzó 24.8 MPa, mientras que el reemplazo del 40% obtuvo una resistencia de 23.92 MPa demostrando que con el uso de aditivos es viable incorporar porcentajes cercanos al 40% manteniendo la aptitud estructural y aligerando la masa.

Por otro lado, Colombo D, & Mendoza P. (2021), realizaron una investigación de carácter documental y bibliográfico que recopiló y cruzó datos de múltiples proyectos previos, enfocándose en rangos de 17%, 20% y 50% de piedra pómez. Mediante eso

determinaron que los reemplazos bajos, de entre 17% y 20%, garantizan de forma segura resistencias a la compresión estructurales entre 18,5 MPa y 22,6 MPa.

Manotupa Dueñas (2022), evaluó de forma estricta y puramente experimental la sustitución directa del agregado grueso convencional por piedra pómez de media pulgada en incrementos fijos de 25%, 50%, 75% y 100%. Buscó una resistencia objetivo de 21MPa en muestras estándar sin adiciones especiales. Sus resultados mostraron que, a los 28 días, el diseño patrón con 0% de piedra pómez alcanzó 23 MPa, mientras que el reemplazo del 25% fue el único que cumplió con la seguridad estructural al obtener 21,8 MPa. A partir del 50% de sustitución, la mezcla falló mecánicamente, cayendo a 17,2 MPa e incrementó drásticamente su permeabilidad, por lo que el autor recomendó mantener las dosificaciones por debajo del 30%.

Por último, Mina Caicedo (2025), diseñó un hormigón estructural liviano de 21 MPa utilizando agregados de la cantera Megarock en la provincia de Manabí. Evaluó el reemplazo parcial del agregado grueso convencional por piedra pómez triturada en proporciones de 10%, 20% y 30%, incorporando un 0.3% de aditivo plastificante para controlar la trabajabilidad. Mediante su estudio encontró que, a los 28 días, el diseño patrón alcanzó 24,3 MPa, el reemplazo del 10% obtuvo 22,8 MPa y la dosificación con 20% alcanzó 21,1 MPa, cumpliendo ambos con la meta estructural. El reemplazo del 30% disminuyó la densidad satisfactoriamente a 1797,72 kg/m³, pero su resistencia bajó a 20,3 MPa, demostrando que a mayor cantidad de pómez la resistencia disminuye. El autor concluyó que el 20% es el porcentaje óptimo local, ya que equilibra una reducción de peso normativo según el ACI 213R y cumple con la resistencia requerida.

Los autores antes mencionados evaluaron que los hormigones estructurales con una relación 70- 30 de agregado grueso, siendo 70% de ripio y 30% de piedra pómez muestran resultados positivos para mejorar las densidades tradicionales de hormigón estructural, llámese tradicional a los hormigones que emplean ripio, arena y cemento como agregados del hormigón.

CAPITULO II MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Materiales Utilizados en las Diferentes Ensayos

2.1.1. Agregados Utilizados

Arena Homogenizada (Arena Negra):

Este tipo de arena contiene una distribución uniforme del tamaño de las partículas, además de tener un contenido de humedad controlado y baja cantidad de finos.



Figura 2.1.- Arena Homogenizada, Megarock.

Cemento:

Para las dosificaciones se utiliza el cemento Holcim GU para todo tipo de construcción en general y el cemento Chimborazo HE de alta resistencia inicial.



Figura 2.2.- Cemento Holcim GU.

Piedra Ripio 3/8" – 3/4":

La piedra ripio utilizada para mejorar la resistencia de diseño de las dosificaciones, respetándose el tamaño del agregado de los diseños iniciales.



Figura 2.3.- Piedra Ripio, MEGAROCK.

Piedra Pomez:

Este tipo de piedra de origen volcánico presenta una alta cantidad de porosidad que le da ese beneficio de ser más liviano que la piedra ripio, ayudando a disminuir la densidad de los hormigones, para las dosificaciones, se utilizaron en estado 100% saturada.



Figura 2.4.- Piedra Pomez

2.1.2. Materiales para los Ensayos de Caracterización

Tamices:

Material utilizado para el ensayo de Granulometría de acuerdo con el ASTM C136/C136M, además de obtener el tamaño de los agregados, según las dosificaciones.



Figura 2.5.- Tamices, Laboratorio de suelos ULEAM.

Canasta Metálica Mallada:

Material utilizado para determinar valores de gravedad específica de los agregados, de acuerdo con las normas ASTM C127.



Figura 2.6.- Canasta Metálica Mallada, Laboratorio de Suelos ULEAM.

Matraz o Frasco de Le Chatelier:

Recipiente volumétrico para la determinación de la densidad de sólidos finos e insolubles como el cemento hidráulico, cal y cenizas; de acuerdo con la normativa ASTM C188.



***Figura 2.7.- Frasco de Le Chatelier,
Laboratorio de Suelos ULEAM.***

Tomado de: (Química Laboratorios, 2017)

2.2. Métodos Aplicados en la Investigación

2.2.1. Ensayos de Caracterización

De acuerdo con la metodología de dosificación de hormigones por el método ACI 211.1., (2002), se deberán de realizar los ensayos mostrados a continuación, no obstante, en esta investigación, se evaluará la variabilidad del comportamiento del hormigón aligerado con el intercambio de los agregados, es por ello, que diferenciar las propiedades y la caracterización de estos, influirán directamente en las conclusiones de los resultados.

Granulometría:

Se efectuó este ensayo en los agregados utilizados en la dosificación, para evaluar si el material cumple con las normativas vigentes. Además, de obtener la cantidad de material necesaria de agregado, según las dosificaciones; siguiendo la normativa ASTM C136.



Figura 2.8.- *Proceso de Tamizado.*

Densidades Suelta y Densidad Compactada:

Para este ensayo se utilizó un recipiente volumétrico medible, en donde, en su interior se colocó cada uno de los agregados (ripio y pómez) en dos capas de igual altura, en un principio, el material suelto y posteriormente por cada capa, se le compacta introduciendo una varilla de 3/8 un número de veces de 25 cabe recalcar que este proceso se efectúa un mínimo de 3 veces para evitar errores, de acuerdo con la norma ASTM C40.

Tabla 2.1.- *Tabla de Densidades Suelta y Compactada de la Piedra Ripio.*

PIEDRA MEGAROCK			
ENSAYO DE DENSIDADES			
Medidas del Cilindro			
Diámetro (cm)	Alto (cm)	Peso del Cilindro (gr)	Volumen (cm³)
15.16	16.68	7466.2	3010.82
15.17	16.8	7466	3036.48
15.38	16.74	-	3109.98
15.18	16.7	-	3022.39
15.22	16.73	7466.1	3044.92

Densidad Aparente Suelta ASTM C40			
PROBETAS	Peso Cilindro + Material (gr)	Peso del Material (gr)	Densidad Sin Compactar (gr/cm³)
Probeta 1	11654.4	4188.3	1.376
Probeta 2	11706.6	4240.5	1.393
Probeta 3	11598.8	4132.7	1.357
PROMEDIO			1.375
Densidad Aparente Compactada ASTM C40			
PROBETAS	Peso Cilindro + Material (gr)	Peso del Material (gr)	Densidad Compactada (gr/cm³)
Probeta 1	12088.6	4622.5	1.518
Probeta 2	12141.6	4675.5	1.536
Probeta 3	12068.9	4602.8	1.512
PROMEDIO			1.522

Tabla 2.2.- Tabla de Densidades Suelta y Compactada de la Piedra Pómez.

PIEDRA POMEZ			
ENSAYO DE DENSIDADES			
Medidas del Cilindro			
Diámetro (cm)	Alto (cm)	Peso del Cilindro (gr)	Volumen (cm3)
15.14	16.68	7465.4	3002.88
15.1	16.66	-	2983.45
15.23	16.72	-	3045.97
15.16	16.69	7465.4	3010.77
Densidad Aparente Suelta ASTM C40			
PROBETAS	Peso Cilindro + Material (gr)	Peso del Material (gr)	Densidad Sin Compactar (gr/cm³)
Probeta 1	9084.6	1619.2	0.538
Probeta 2	9078.4	1613	0.536
Probeta 3	9056.2	1590.8	0.528
PROMEDIO			0.534

Densidad Aparente Compactada ASTM C40			
PROBETAS	Peso Cilindro + Material (gr)	Peso del Material (gr)	Densidad Compactada (gr/cm³)
Probeta 1	9293.4	1828	0.607
Probeta 2	9213.6	1748.2	0.581
Probeta 3	9327.4	1862	0.618
PROMEDIO			0.602



Figura 2.9.- Recipiente Volumétrico para Ensayo de Densidad Suelta y Compactada.

Densidad Aparente y SSS:

Este ensayo se realiza mediante la saturación del material durante 24 horas, para posteriormente realizar un secado superficial y luego ser sumergido en agua con una canasta mallada, es notorio mencionar que todos estos pesos se anotan para poder calcular la densidad aparente, densidad SSS y el porcentaje de absorción.

Tabla 2.3.- Tabla de Datos del Ensayo de Absorción Piedra Ripio.

PIEDRA MEGAROCK	
ENSAYO DE ABSORCIÓN ASTM C127 - C128	
Peso del Material Seco (gr) A	2572.4
Peso del Material SSS (gr) B	2716.8
	1641
Peso del Material Sumergido (gr) C	1642.6
	1640
	1638.4
PROMEDIO	1640.5
Gravedad Específica $[A / (B - C)]$	2.39
Densidad Relativa SSS $[B / (B - C)]$	2.52
Densidad Relativa Aparente $[A / (A - C)]$	2.76
Absorción % $[(B - A) / A] \times 100$	5.61

Tabla 2.4.- Tabla de Datos del Ensayo de Absorción Piedra Pómez.

PIEDRA POMEZ	
ENSAYO DE ABSORCIÓN ASTM C127 - C128	
Peso del Material Seco (gr) A	995.8
Peso del Material SSS (gr) B	1431.8
Peso del Material Sumergido (gr) C	309.4
Gravedad Específica $[A / (B - C)]$	0.89
Densidad Relativa SSS $[B / (B - C)]$	1.28
Densidad Relativa Aparente $[A / (A - C)]$	1.45
Absorción % $[(B - A) / A] \times 100$	43.78



Figura 2.11.- Secado Superficial del Ripio Saturado.



Figura 2.10.- Peso Sumergido de la Piedra Pómez SSS.

Humedad:

El contenido de humedad es un ensayo que cuantifica porcentualmente la cantidad de agua existente en cierta cantidad de material, debidamente cuantificado. Se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\omega = \frac{W_{\text{húmedo}} - W_{\text{seco}}}{W_{\text{seco}}} * 100$$

Tabla 2.5.- *Tabla de datos del Contenido de Humedad de los agregados.*

CONTENIDO DE HUMEDAD ASTM C566	
PIEDRA MEGAROCK	
Peso del Material Húmedo (gr)	100
Peso del Material Seco (gr)	98.968
Humedad %	1.043
ARENA HOMOGENIZADA	
Peso del Material Húmedo (gr)	100
Peso del Material Seco (gr)	93.32
Humedad %	7.157

2.2.2. Evaluación de las Dosificaciones

Para la evaluación del comportamiento mecánico del hormigón aligerado, se realizará un número de 12 cilindros estándar de 20 cm de alto y 10 cm de ancho, para determinar la resistencia a la compresión del hormigón y a su vez, se moldeará una viga con medidas de 15x15x50 cm para poder estimar su resistencia a flexión o módulo de rotura.

Cabe recalcar, en primera instancia, la dosificación a evaluar serán las seleccionadas con anterioridad, con algunas variabilidades según las propiedades del agregado.



Figura 2.12.- Molde de los Cilindros.



Figura 2.13.- Molde de Viga.

Corrección de Dosificaciones

De acuerdo con los ensayos de caracterización realizados, se presentó que el contenido de humedad de la arena entre la sierra y la costa son diferentes, por lo que se optó por efectuar correcciones de contenido de agua porcentuales de la dosificación inicial, para lograr solventar esa variación de humedades. Se utilizó la siguiente ecuación del método ACI:

$$W_{Wmezcla} = W_W + \left[W_{arena} \left(\frac{\%abs}{100} \right) + W_g \left(\frac{\%abs}{100} \right) \right] - \left[W_{arena} \left(\frac{\%w}{100} \right) + W_g \left(\frac{\%w}{100} \right) \right]$$

Tabla 2.6.- Resultados de las Propiedades de los Agregados, (Morales et al., 2018)

	Unidad	Arena Homogenizada	Piedra Pomez
Contenido de Humedad	%	0.89	100
Contenido de Absorción	%	2.57	33.61
Densidad en estado SSS	gr/cm ³	2.58	1.23
Densidad seca compactada	gr/cm ³	1.7	0.53
Densidad seca suelta	gr/cm ³	2.57	0.47
Módulo de Finura	-	3.02	2.78

Tomado de: Morales et al., 2018

Tabla 2.7.- Resultados de las Propiedades de los Agregados, (Macas E., 2006)

	Unidad	Arena Homogenizada	Piedra Pomez
Contenido de Humedad	%	3.09	100
Contenido de Absorción	%	1.54	77.26
Densidad en estado SSS	gr/cm ³	2.635	1.046
Densidad seca compactada	gr/cm ³	1.633	0.308
Densidad seca suelta	gr/cm ³	1.773	0.332
Módulo de Finura	-	3.06	-

Tomado de: Macas E., 2006.

Tabla 2.8.- Resultados de las Propiedades de los Agregados, Costa.

	Unidad	Arena Homogenizada	Piedra Pomez	Piedra Ripio
Contenido de Humedad	%	7.157	100	1.043
Contenido de Absorción	%	4.5	43.78	5.61
Densidad en estado SSS	gr/cm ³	2.55	1.28	2.52
Densidad seca compactada	gr/cm ³	1.636	0.602	1.522
Densidad seca suelta	gr/cm ³	1.445	0.534	1.375
Módulo de Finura	-	2.529	-	-

2.2.3. Dosificaciones Utilizadas

Tabla 2.9.- Primera Dosificación, 100% Piedra Pómez, (Morales et al., 2018)

PRIMERA DOSIFICACIÓN			
MATERIAL	PESO (KG)	DOSIFICACIÓN	CANTIDAD PARA 12 CILINDROS (KG)
Cemento	462.22	1	19.376
Agua	208	0.450	6.444
Piedra Pomez	326.54	0.706	13.688
Arena	792.4	1.714	33.216
Plastificante	0.19375	0.000	0.194
Retardante	0.857	0.002	0.036

Tabla 2.10.- Segunda Dosificación, 100% Piedra Pómez. (Macas E., 2006)

SEGUNDA DOSIFICACIÓN			
MATERIAL	PESO (KG)	DOSIFICACIÓN	CANTIDAD PARA 12 CILINDROS (KG)
Cemento	500	1	21.343
Agua	225	0.450	10.4
Piedra Pomez	350	0.700	14.94
Arena	850	1.700	36.283
Plastificante	1	0.002	0.043
Retardante	0.857	0.002	0.036

2.3. Relaciones Porcentuales de Agregados Grueso

Se reemplazó el 70% del agregado grueso con piedra ripio, con el objetivo de mejorar la resistencia de las dosificaciones obtenidas, sin afectar de forma desmedida las densidades obtenidas, esto debido a que el ripio posee resistencias más altas a la compresión. La elección del porcentaje a usar se justificó con anterioridad por otros autores.

Tabla 2.11.- Tercera Dosificación, 70% Ripio, (Morales et al., 2018)

TERCERA DOSIFICACIÓN			
MATERIAL	PESO (KG)	DOSIFICACIÓN	CANTIDAD PARA 12 CILINDROS (KG)
Cemento	462.22	1	19.376
Agua	208	0.450	6.444
Grueso (70% Ripio – 30% Pómez)	326.54	0.706	13.688
Arena	792.4	1.714	33.216
Plastificante	0.19375	0.000	0.194
Retardante	0.857	0.002	0.036

Tabla 2.12.- Cuarta Dosificación, 70% Ripio, (Macas E., 2006)

CUARTA DOSIFICACIÓN			
MATERIAL	PESO (KG)	DOSIFICACIÓN	CANTIDAD PARA 12 CILINDROS (KG)
Cemento	462.22	1	19.376
Agua	208	0.450	6.444
Agregado Grueso (70% Ripio – 30% Pómez)	326.54	0.706	13.688
Arena	792.4	1.714	33.216
Plastificante	0.19375	0.000	0.194
Retardante	0.857	0.002	0.036

2.4. Evaluación de la Resistencia a Flexión

Para este ensayo, se es necesario la “Universal Testing Machines UH-F500knX”, de autoridad del Laboratorio Hormigón, Suelos y Materiales “Bolívar Ortiz Logroño”.

Siguiendo las directrices de la normativa ASTM C78 (2021), cuyo proceso, en síntesis, es someter a un espécimen (viga a los 28 días de curado) a una carga puntual en el centro del claro, con una velocidad de $0.05 \text{ N/mm}^2/\text{sec}$ que, a su vez, se encuentra apoyada en dos puntos a los extremos del claro, de manera que se vayan ejerciendo esfuerzos a los tercios del claro. La máquina hidráulica, va registrando la fuerza y el desplazamiento de la probeta, al mismo tiempo, el software genera una curva de esfuerzo-deformación (*véase la figura 3.7. – 3.10.*); el ensayo finaliza una vez que se haya producido la falla.



Figura 2.14.- Maquina Universal.



Figura 2.15.- Viga sometida a Carga.

CAPÍTULO III EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS

3.1. Presentación de Resultados Obtenidos

3.1.1. Valores de Densidad del Hormigón Aligerado

Primera Dosificación

A continuación, se presenta los valores de densidades obtenidas en la primera dosificación, la cual, se basa en la propuesta por (Morales et al., 2018) (véase la *Tabla 2.9.*), quienes obtuvieron una densidad promedio a los 28 días de curado de 1919 kg/m³.

Tabla 3.1.- Valores de Densidades del Hormigón, Primera Dosificación.

Días	N° Cilindro	Área (cm²)	Densidad (kg/m³)	D Promedio (kg/m³)
7	Probeta 1	79.248	1932.738	1941.127
	Probeta 2	79.091	1927.526	
	Probeta 3	78.579	1963.118	
14	Probeta 4	79.288	1933.466	1949.256
	Probeta 5	79.051	1960.527	
	Probeta 6	79.130	1953.775	
21	Probeta 7	78.331	1985.246	1976.287
	Probeta 8	78.592	1954.815	
	Probeta 9	78.645	1976.014	
28	Probeta 10	77.965	1989.071	1973.825
	Probeta 11	78.749	1962.554	
	Probeta 12	78.017	1989.251	
	Probeta 13	78.749	1984.240	
	Probeta 14	78.592	1959.257	

Se observa un aumento de su densidad a los 28 días de 2.86% con respecto a la dosificación de Morales, luego del cambio de agregados como la arena homogenizada y piedra pómez.

Segunda Dosificación

En la siguiente tabla, se presentan los valores obtenidos de densidad del hormigón aligerado con piedra pómez, cuya la dosificación fue obtenida de (Macas E., 2006), (véase la *Tabla 2.10.*), quienes obtuvieron una densidad a los 28 días de 1753.82 kg/m³.

Tabla 3.2.- Valores de Densidades del Hormigón, Segunda Dosificación.

Días	N° Cilindro	Área (cm²)	Densidad (kg/m³)	D Promedio (kg/m³)
7	Probeta 1	80.489	1813.434	1807.546
	Probeta 2	79.854	1806.621	
	Probeta 3	78.959	1802.583	
14	Probeta 4	78.383	1843.408	1831.323
	Probeta 5	78.226	1852.426	
	Probeta 6	78.854	1798.134	
21	Probeta 7	78.697	1861.571	1861.279
	Probeta 8	79.012	1821.603	
	Probeta 9	78.226	1900.664	
28	Probeta 10	78.697	1855.599	1872.813
	Probeta 11	79.012	1865.751	
	Probeta 12	78.226	1897.089	

Como se puede observar, en esta investigación se obtuvo una densidad de 1872.813 kg/m³, la cual representa un aumento de 6.78% de la densidad conseguida por Macas.

Dosificaciones Mixtas

Para las siguientes dosificaciones, se utilizó un cemento de mejor calidad, Cemento Chimborazo HE (Alta Resistencia), además de agregar el ripio como parte del agregado grueso del hormigón.

Tercera Dosificación

A continuación, se presentan los valores de densidad del hormigón obtenidas, como parte de la propuesta para mejorar las propiedades del hormigón de la primera dosificación.

Tabla 3.3.- Valores de Densidades del Hormigón, Segunda Dosificación.

Días	Nº Cilindro	Área (cm²)	Densidad (kg/m³)	D Promedio (kg/m³)
7	Probeta 1	78.854	2059.305	2076.376
	Probeta 2	78.383	2080.150	
	Probeta 3	78.226	2089.673	
14	Probeta 4	78.540	2066.722	2092.739
	Probeta 5	78.540	2141.462	
	Probeta 6	78.540	2070.033	
21	Probeta 7	78.540	2134.841	2119.689
	Probeta 8	78.540	2143.499	
	Probeta 9	78.540	2080.728	
28	Probeta 11	78.540	2074.107	2095.498
	Probeta 12	78.540	2070.542	
	Probeta 13	78.540	2141.844	

Se obtuvo una densidad a los 28 días de 2095.49 kg/m³, el cual representa un aumento del 6.16%, con respecto a la densidad obtenida en la primera dosificación, y 9.02% de densidad con respecto a la densidad obtenida por (Morales et al., 2018).

Cuarta Dosificación

A continuación, se presentan los valores de densidad del hormigón obtenidas, como parte de la propuesta para mejorar las propiedades del hormigón de la segunda dosificación.

Tabla 3.4.- Valores de Densidades del Hormigón, Cuarta Dosificación.

Días	Nº Cilindro	Área (cm²)	Densidad (kg/m³)	D Promedio (kg/m³)
7	Probeta 1	78.461	2050.942	2076.352
	Probeta 2	78.461	2067.983	
	Probeta 3	78.383	2110.132	
14	Probeta 4	78.540	2036.674	2041.809
	Probeta 5	78.540	2040.494	
	Probeta 6	78.540	2048.260	
21	Probeta 7	78.540	2042.022	2062.691
	Probeta 8	78.540	2105.429	
	Probeta 9	78.540	2040.621	
28	Probeta 11	78.540	2011.718	2015.199

Probeta 12	78.540	2019.867	
Probeta 13	78.540	2014.010	

En esta dosificación, se obtuvo una densidad a los 28 días de 2015.19 kg/m³, el cual representa un aumento de 7.60% con respecto a la segunda dosificación, y 14.38% con respecto a Macas.

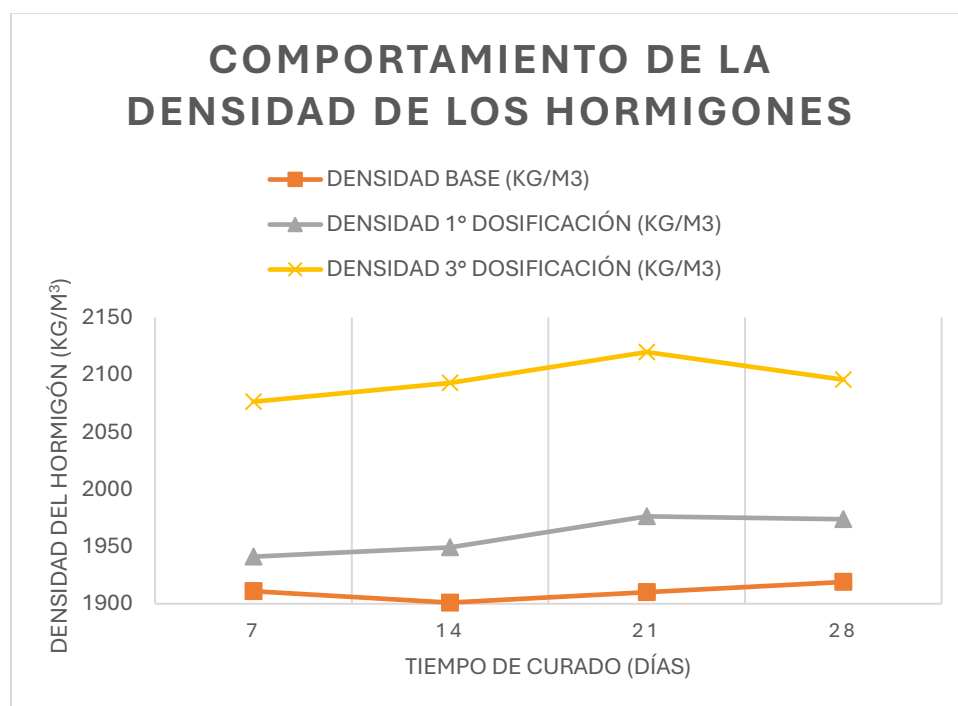


Figura 3.1.- Gráfica de Densidades de Hormigones Aligerados.

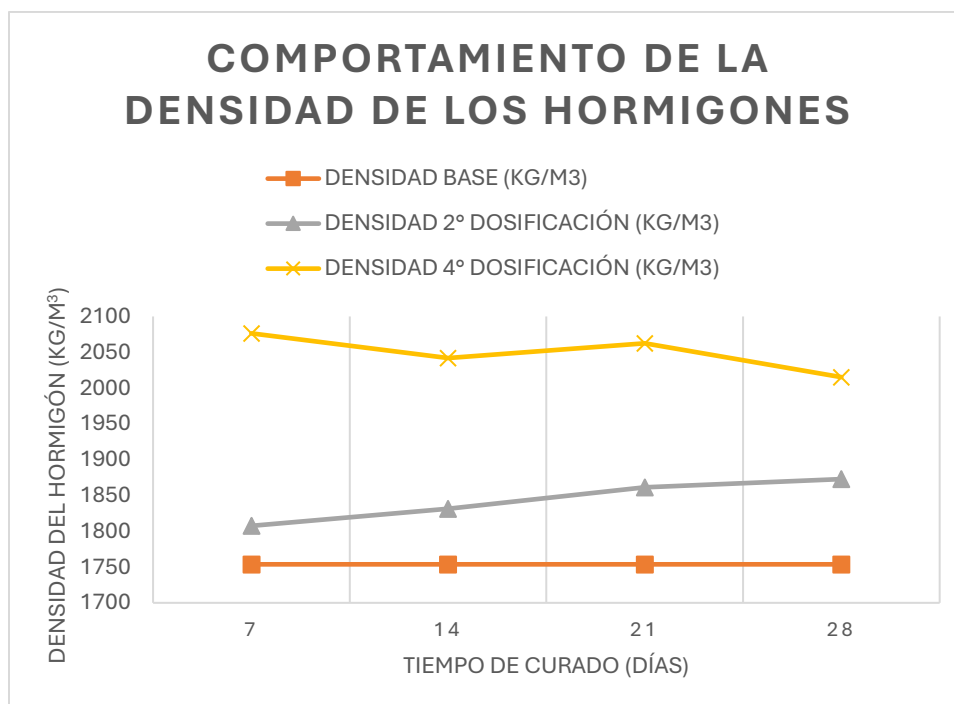


Figura 3.2.- Gráfica de Densidades de Hormigones Aligerados

3.1.2. Valores de Resistencia a la Compresión del Hormigón

Primera Dosificación

Tabla 3.5.- Valores de Resistencia del Hormigón, Primera Dosificación.

Días	Nº Cilindro	Área (cm²)	Fuerza (KgF)	Resistencia (KgF/cm²)	R Promedio	% Resistencia
7	Probeta 1	79.248	12344.800	155.774	135.942	48.551
	Probeta 2	79.091	12274.500	155.196		
	Probeta 3	78.579	7611.000	96.858		
14	Probeta 4	79.288	13299.900	167.742	179.894	64.248
	Probeta 5	79.051	15638.200	197.824		
	Probeta 6	79.130	13777.800	174.116		
21	Probeta 7	78.331	16253.700	207.502	209.506	74.824
	Probeta 8	78.592	16929.100	215.404		
	Probeta 9	78.645	16651.800	211.735		
28	Probeta 10	77.965	15856.800	203.384	226.599	80.928
	Probeta 11	78.749	17360.100	220.447		
	Probeta 12	78.017	17376.300	222.724		
	Probeta 13	78.749	17617.200	223.712		
	Probeta 14	78.592	18823.900	239.514		

La primera dosificación, correspondiente a un hormigón de 28 MPa reportado en la literatura, alcanzó una resistencia promedio de 22,2 MPa a los 28 días, equivalente al 80,93 % de la resistencia de diseño.

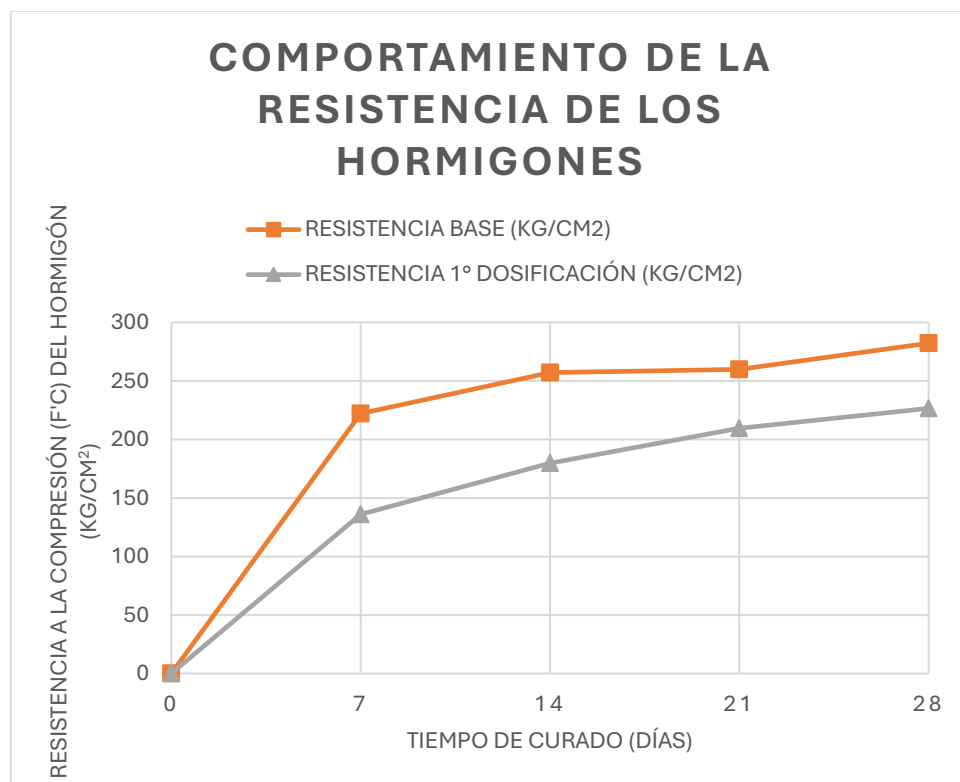


Figura 3.3.- Comportamiento de Resistencia entre Dosificación Base vs 1° Dosificación.

Segunda Dosificación

Tabla 3.6.- Valores de Resistencia del Hormigón, Segunda Dosificación.

Días	N° Cilindro	Área (cm²)	Fuerza (KgF)	Resistencia (KgF/cm²)	R Promedio (KgF/cm²)	% Resistencia
7	Probeta 1	80.489	6587.500	81.843	70.051	33.357
	Probeta 2	79.854	3048.400	38.175		
	Probeta 3	78.959	7116.900	90.134		
14	Probeta 4	78.383	10626.300	135.569	128.289	61.090
	Probeta 5	78.226	10515.100	134.420		
	Probeta 6	78.854	9058.600	114.878		
21	Probeta 7	78.697	11732.600	149.086	145.845	69.450
	Probeta 8	79.012	12176.400	154.109		
	Probeta 9	78.226	10508.900	134.340		
28	Probeta 10	78.697	12331.100	156.691	157.461	74.981
	Probeta 11	79.012	12496.500	158.160		

Probeta 12	78.226	12323.100	157.532		
------------	--------	-----------	---------	--	--

La segunda dosificación, correspondiente a un hormigón de 21 MPa reportado en la literatura, presentó una resistencia promedio de 15,4 MPa a los 28 días, alcanzando el 74,98 % de la resistencia de diseño.

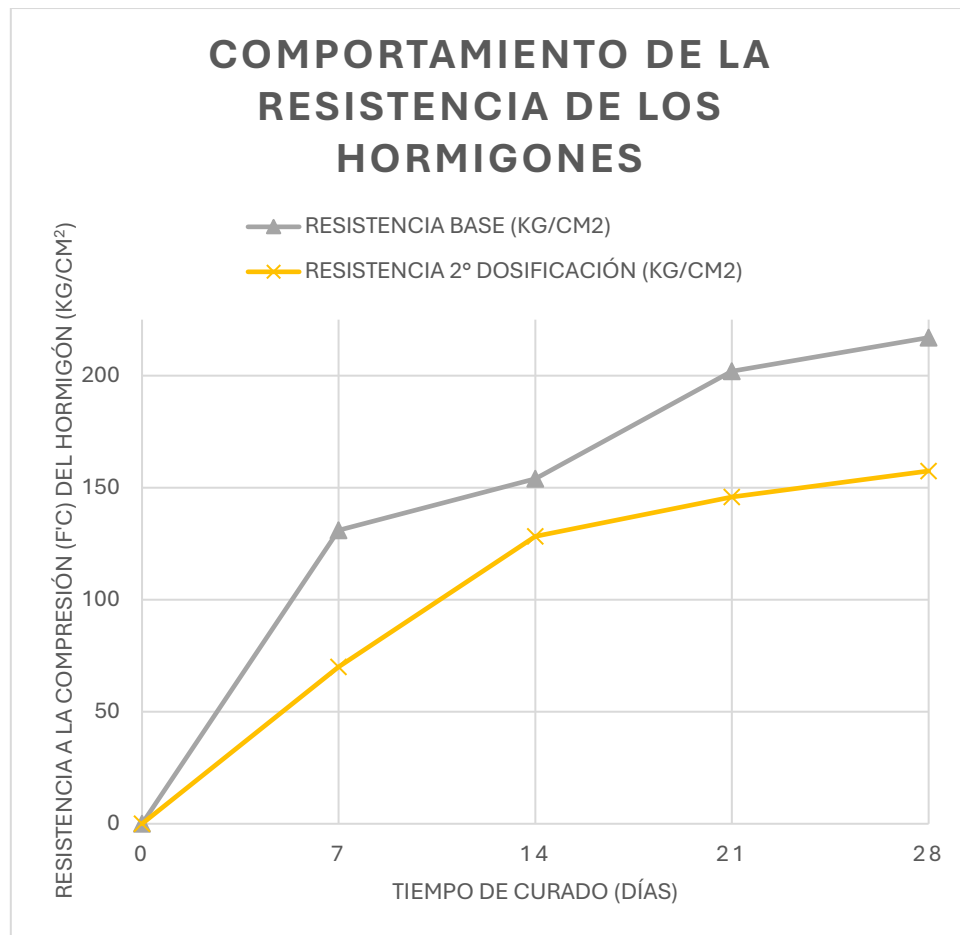


Figura 3.4.- Comportamiento de la Resistencia entre Dosificación Base vs 2° Dosificación.

Tercera Dosificación

Tabla 3.7.- Valores de Resistencia del Hormigón, Tercera Dosificación.

Días	Nº Cilindro	Área (cm ²)	Fuerza (KgF)	Resistencia (KgF/cm ²)	R Promedio	% Resistencia
7	Probeta 1	78.854	13908.300	176.380	180.900	79.833
	Probeta 2	78.383	14424.500	184.026		
	Probeta 3	78.226	14260.200	182.295		
14	Probeta 4	78.540	19062.100	242.706	229.412	101.241
	Probeta 5	78.540	16747.000	213.229		
	Probeta 6	78.540	18244.800	232.300		
21	Probeta 7	78.540	17663.000	224.892	236.716	104.464
	Probeta 8	78.540	19505.800	248.356		
	Probeta 9	78.540	18606.000	236.899		
28	Probeta 11	78.540	21616.200	275.226	268.949	118.689
	Probeta 12	78.540	21246.900	270.524		
	Probeta 13	78.540	20506.500	261.097		

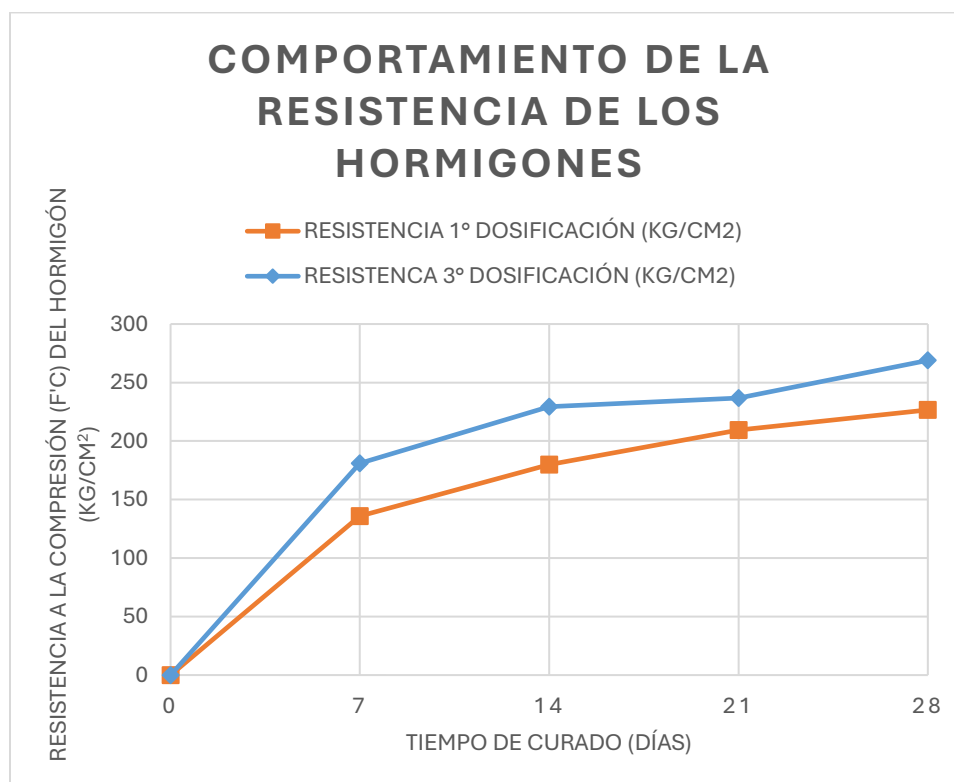


Figura 3.5.- Comportamiento de la Resistencia de la 1º Dosificación vs 3º Dosificación.

La tercera dosificación, diseñada para una resistencia de 24 MPa y elaborada con el 70 % de reemplazo del agregado grueso por ripio, presentó un incremento continuo de la resistencia a compresión con el aumento de la edad de curado, alcanzando una resistencia promedio de 26.9 MPa a los 28 días, equivalente al 118,69 % de la resistencia de diseño.

Los resultados obtenidos demuestran que la mezcla desarrolló adecuadamente sus propiedades mecánicas, superando la resistencia prevista para el diseño y evidenciando que la incorporación del ripio permitió obtener un hormigón con un desempeño estructural satisfactorio.

Cuarta Dosificación

Tabla 3.8.- Valores de Resistencia del Hormigón, Cuarta Dosificación.

Días	N° Cilindro	Área (cm²)	Fuerza (KgF)	Resistencia (KgF/cm²)	R Promedio	% Resistencia
7	Probeta 1	78.4612962	10098	128.700397	140.374413	89.1486903
	Probeta 2	78.4612962	10771.7	137.286797		
	Probeta 3	78.3828152	12160	155.136046		
14	Probeta 4	78.5398163	13836.6	176.173063	176.390362	112.021624
	Probeta 5	78.5398163	14795.1	188.377064		
	Probeta 6	78.5398163	12929.3	164.62096		
21	Probeta 7	78.5398163	15124.5	192.571115	193.615596	122.96099
	Probeta 8	78.5398163	14929.6	190.089571		
	Probeta 9	78.5398163	15565.5	198.186101		
28	Probeta 11	78.5398163	16257.7	206.999465	209.91094	133.309803
	Probeta 12	78.5398163	15113.1	192.425966		
	Probeta 13	78.5398163	18088.3	230.307389		

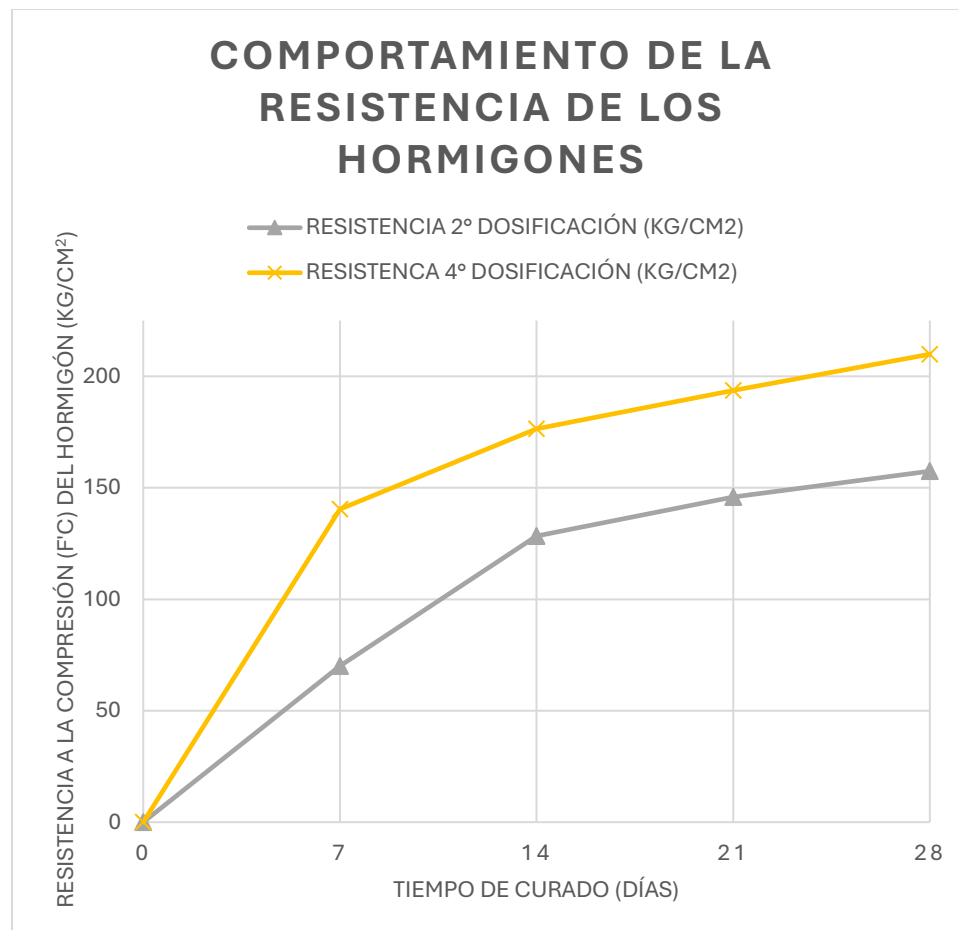


Figura 3.6.- Comportamiento de la Resistencia entre la 2° Dosificación vs 4° Dosificación.

La cuarta dosificación, diseñada para una resistencia de 16 MPa y con un 70 % de reemplazo del agregado grueso convencional por ripio, mostró un incremento progresivo de la resistencia a compresión durante el periodo de curado. A los 28 días alcanzó una resistencia promedio de 20.99 MPa, equivalente al 133,31 % de la resistencia de diseño.

Estos resultados indican que la mezcla cumplió ampliamente con la resistencia prevista, evidenciando que el empleo del ripio como reemplazo parcial del agregado grueso en conjunto con el cambio de cemento por el de alta resistencia inicial constituye una alternativa técnicamente viable para la elaboración de hormigones con la resistencia especificada.

3.1.3. Valores de Resistencia a la Flexión del Hormigón

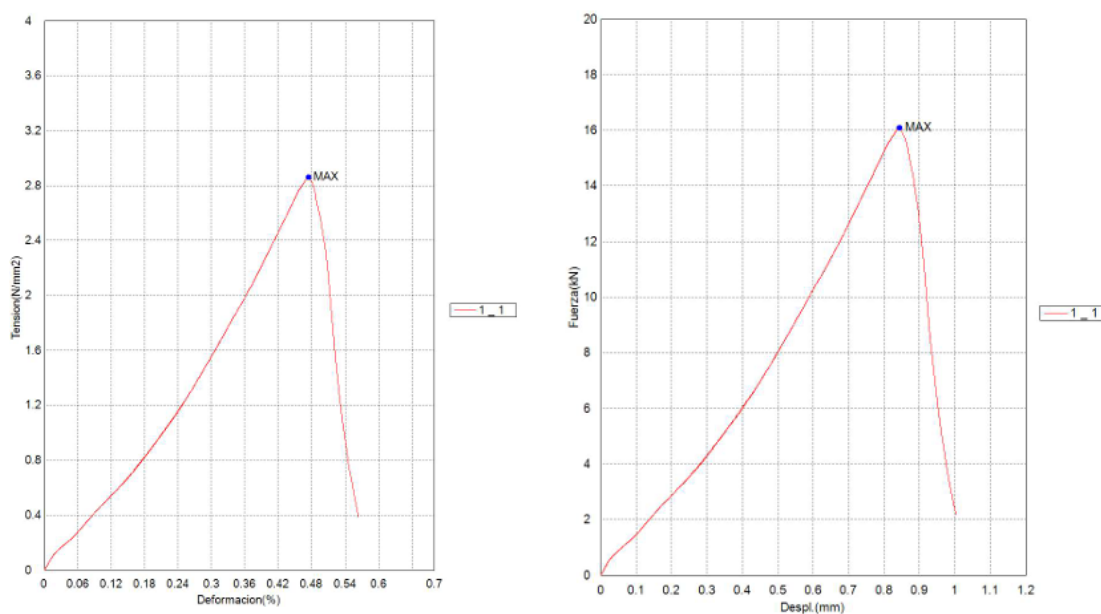
Primera Dosificación

Figura 3.7.- Valores de Resistencia a Flexión del Hormigón, Primera Dosificación.

Nombre de muestra	Espesor	Anchura	Soporte inferior
Unidad	mm	mm	mm
1 _ 1	150.0000	150.0000	400.0000

Nombre	Max._Fuerza	Max._Tension	Max._Desplazamiento	Max._Deformacion
Parametros	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unidad	kN	N/mm2	mm	%
1 _ 1	16.0924	2.86087	0.84350	0.47447
Media	16.0924	2.86087	0.84350	0.47447
Desviacion Estandar	--	--	--	--
Rango	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

Graficos



Tomado de: Laboratorio Hormigón, Suelos y Materiales “Bolívar Ortiz Logroño”

La probeta correspondiente a la dosificación, durante el ensayo mostró una capacidad ultima de 16.09 kN, por lo que el módulo de rotura es de 2.86 MPa. El fallo demostró un desplazamiento de 0.84 mm siendo así una deformación del 0.47%. Los valores de resistencia obtenidos en conjunto a los valores de deformación son inferiores al 0.5%, lo que representa una falla frágil por tracción.

Utilizando la fórmula propuesta por ACI 213R (2014) para estimar el módulo de rotura partiendo de la resistencia a la compresión, el valor obtenido por el ensayo se encuentra dentro del rango permisible rígido por la ecuación. Lo cual establece que el espécimen cumple con este criterio.

$$MR = 0.45(\sqrt{22.66}) = 2.14 \text{ MPa}$$

$$MR = 0.65(\sqrt{22.66}) = 3.09 \text{ MPa}$$

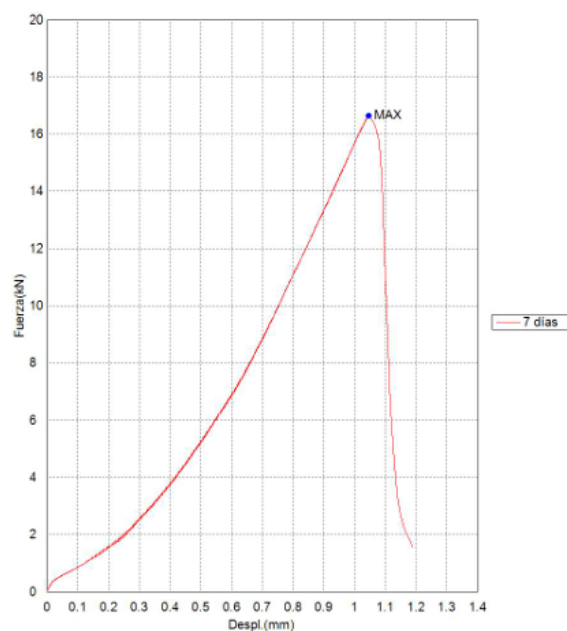
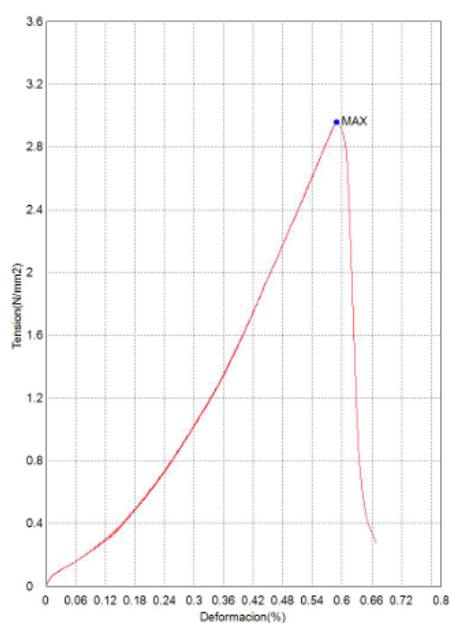
Segunda Dosificación

Figura 3.8.- Valores de Resistencia a Flexión del Hormigón, Segunda Dosificación.

Nombre de muestra	Espesor	Anchura	Soporte inferior
Unidad	mm	mm	mm
7 días	150.0000	150.0000	400.0000

Nombre	Max. Fuerza	Max. Tension	Max. Desplazamiento	Max. Deformacion
Parametros	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unidad	kN	N/mm2	mm	%
7 días	16.6429	2.95874	1.04663	0.58873
Media	16.6429	2.95874	1.04663	0.58873
Desviacion Estandar	--	--	--	--
Rango	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

Graficos



Tomado de: Laboratorio Hormigón, Suelos y Materiales “Bolívar Ortiz Logroño”

La respuesta de esta probeta fue de la forma lineal elástica, siendo su carga ultima de flexión de 16.64 kN. Al procesar esos datos se determinó que el módulo de rotura fue de 2.96 MPa. Este ensayo mostró un desplazamiento de 1.04 mm vinculándose con una deformación del 0.59%. Por otro parte la falla se mostró de forma frágil por tracción indirecta, debido a que los valores de deformación correspondieron a valores inferiores al 0.6%.

Con el mismo procedimiento anterior, se estima el módulo de rotura partiendo de la resistencia a la compresión, el valor obtenido por el ensayo se encuentra dentro del rango permisible rígido por la ecuación. Lo cual establece que el espécimen cumple con este criterio.

$$MR = 0.45(\sqrt{15.75}) = 1.79 \text{ MPa}$$

$$MR = 0.65(\sqrt{15.75}) = 2.57 \text{ MPa}$$

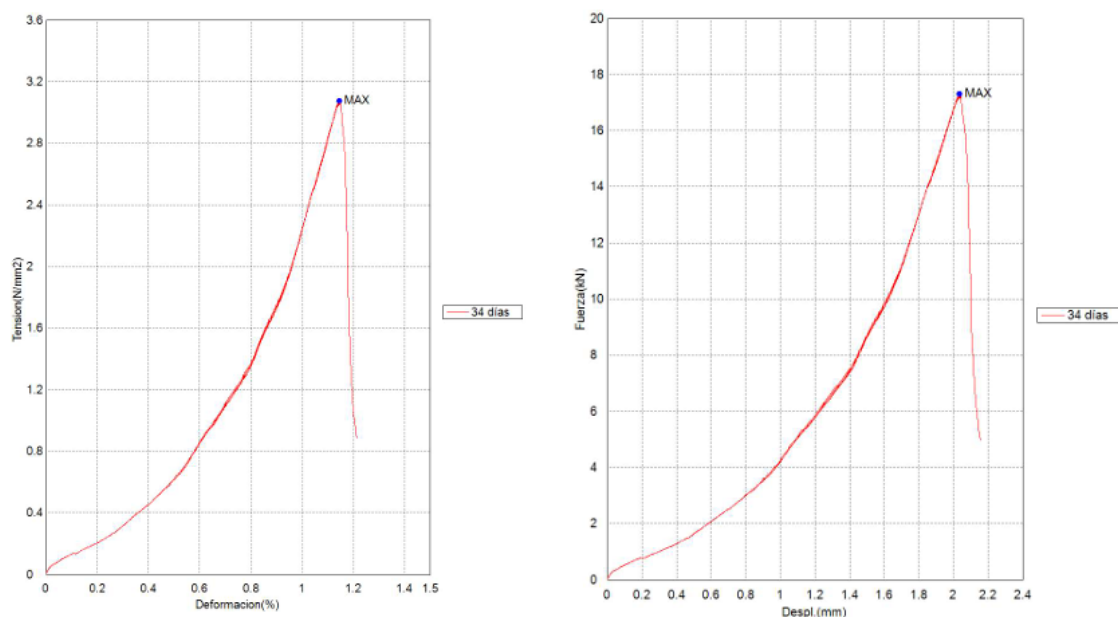
Tercera Dosificación

Figura 3.9.- Valores de Resistencia a Flexión del Hormigón, Tercera Dosificación.

Nombre de muestra	Espesor	Anchura	Soporte inferior
Unidad	mm	mm	mm
34 días	150.0000	150.0000	400.0000

Nombre	Max._Fuerza	Max._Tension	Max._Desplazamiento	Max._Deformacion
Parametros	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unidad	kN	N/mm2	mm	%
34 días	17.3083	3.07703	2.03613	1.14532
Media	17.3083	3.07703	2.03613	1.14532
Desviacion Estandar	--	--	--	--
Rango	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

Graficos



Tomado de: Laboratorio Hormigón, Suelos y Materiales “Bolívar Ortiz Logroño”

La probeta alcanzó una capacidad portante de 17.31 kN, equivalente a un módulo de rotura de 3.08 MPa. En el momento que la probeta falló alcanzó un desplazamiento de 2.04 mm, lo que corresponde a una deformación unitaria del 1.15%. Del mismo que los anteriores ensayos mostró una falla frágil por flexión.

Manejando la ecuación propuesta por ACI 213R (2014) para estimar el módulo de rotura conociendo la resistencia a la compresión, el valor obtenido por el ensayo se

encuentra dentro del rango permisible rígido por la ecuación. Lo cual establece que el espécimen cumple con este criterio.

$$MR = 0.45(\sqrt{26.89}) = 2.33 \text{ MPa}$$

$$MR = 0.65(\sqrt{26.89}) = 3.37 \text{ MPa}$$

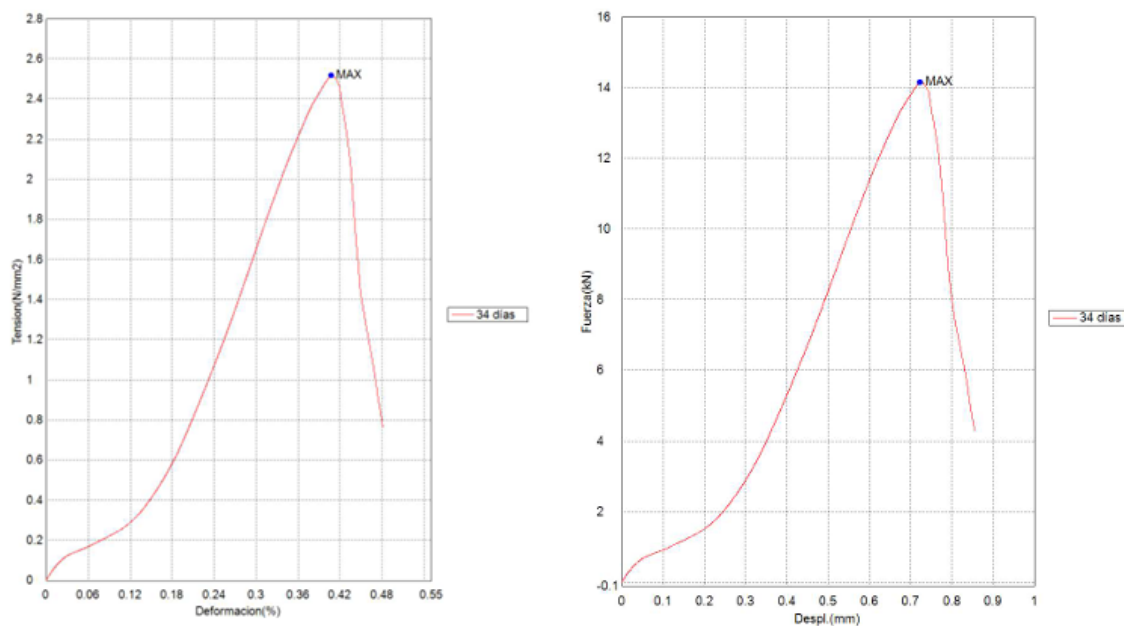
Cuarta Dosificación

Figura 3.10.- Valores de Resistencia a Flexión del Hormigón, Cuarta Dosificación.

Nombre de muestra	Espesor	Anchura	SopORTE inferior
Unidad	mm	mm	mm
34 días	150.0000	150.0000	400.0000

Nombre Parametros Unidad	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas kN	Max._Tension Calc. at Entire Areas N/mm2	Max. _Desplazamiento Calc. at Entire Areas mm	Max. _Deformacion Calc. at Entire Areas %
34 días	14.1545	2.51636	0.72313	0.40676
Media	14.1545	2.51636	0.72313	0.40676
Desviacion Estandar	--	--	--	--
Rango	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

Graficos



Tomado de: Laboratorio Hormigón, Suelos y Materiales “Bolívar Ortiz Logroño”

Este espécimen mostró una resistencia ultima de 14.15 kN, lo que corresponde a un módulo de rotura de 2.52 MPa, reporto un desplazamiento del 0.72 mm, lo que corresponde a una deformación de 0.41%. Posee una falla de naturaleza frágil por flexión.

Utilizando la fórmula propuesta por ACI 213R (2014) para estimar el módulo de rotura partiendo de la resistencia a la compresión, el valor obtenido por el ensayo se encuentra dentro del rango permisible rígido por la ecuación. Lo cual establece que el espécimen cumple con este criterio.

$$MR = 0.45(\sqrt{20.99}) = 2.06 \text{ MPa}$$

$$MR = 0.65(\sqrt{20.99}) = 2.97 \text{ MPa}$$

3.2. Análisis de los Resultados Obtenidos

3.2.1. Análisis de la Densidad del Hormigón Aligerado

El análisis del comportamiento físico de las mezclas evaluadas demuestra que la dosificación del agregado grueso ejerce una influencia directa sobre la masa unitaria del hormigón. Las dosificaciones base, primera y segunda, compuestas por agregados aligerados de piedra pómez, registraron las menores densidades del estudio, con valores promedio a los 28 días de curado de 1973.83 kg/m³ y 1872.81 kg/m³, respectivamente.

Al contrastar estos resultados con la literatura de referencia, la primera dosificación experimentó un incremento del 2.86% respecto a lo reportado por Morales et al. (2018), mientras que la segunda dosificación reflejó un incremento del 6.78% en comparación con los hallazgos de Macas (2006). Estos incrementos marginales se atribuyen a la homogenización de la arena y a las propiedades físicas particulares de la piedra pómez local empleada en esta investigación.

Por otro lado, la transición hacia dosificaciones mixtas, tercera y cuarta, conllevó un incremento previsible en la densidad del material. La incorporación de un 70% de ripio como reemplazo parcial del agregado grueso convencional, en conjunto con la implementación de Cemento Chimborazo HE, elevó las densidades a los 28 días a valores de 2095.50 kg/m³ para la tercera dosificación y de 2015.20 kg/m³ para la cuarta dosificación, aumentando de esa forma una densidad del 6.16% y 7.60%.

3.2.2. Análisis de la Resistencia a la Compresión

Los ensayos de compresión revelaron un comportamiento contrastante entre las mezclas aligeradas puras y las configuraciones mixtas. Las dos primeras dosificaciones mostraron deficiencias al no alcanzar las resistencias presentadas en las tesis de referencia. La primera dosificación alcanzó una resistencia media de 22.2 MPa a los 28 días, siendo el 80.93% de su resistencia de diseño de 28 MPa. Por otro lado, la segunda dosificación mostró un desempeño deficiente al registrar 15.4 MPa, alcanzando un porcentaje de resistencia limitada del 74.98% de su diseño teórico de 21 MPa.

A diferencia de las mezclas precedentes, las dosificaciones modificadas con ripio y cemento de alta resistencia inicial (HE) experimentaron incrementos sustanciales, superando con creces las expectativas de diseño. La tercera dosificación, proyectada para una resistencia de 24 MPa, incrementó progresivamente su capacidad portante hasta alcanzar un promedio de 26.4 MPa a los 28 días, lo que significa que la dosificación alcanzó el 118.69% de la resistencia especificada.

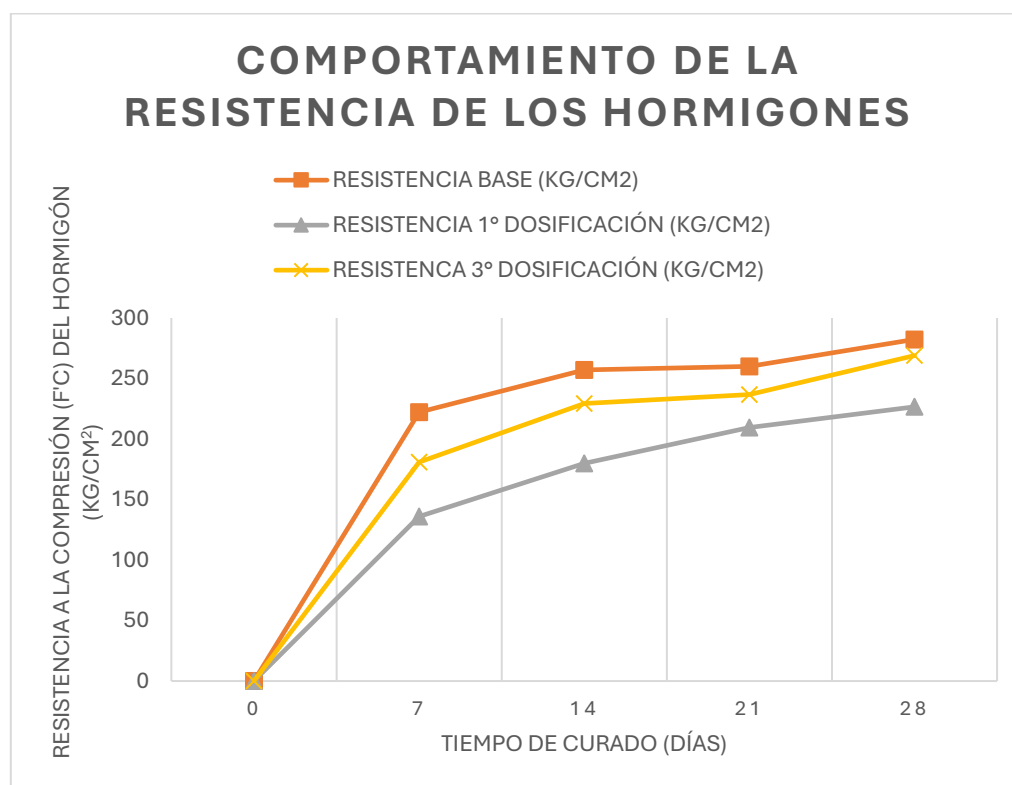


Figura 3.11.- Comportamiento de la Resistencia de los Hormigones Base, 1º y 3º Dosificación.

Del mismo modo, la cuarta dosificación, diseñada originalmente para una meta conservadora de 16 MPa, desarrolló la mayor tasa de ganancia de resistencia relativa en el estudio, alcanzando los 20.6 MPa a los 28 días, equivalente a un notable 133.31% de la resistencia proyectada. Los resultados de este grupo experimental ratifican que la técnica de reemplazo parcial del agregado grueso convencional por ripio es completamente viable.

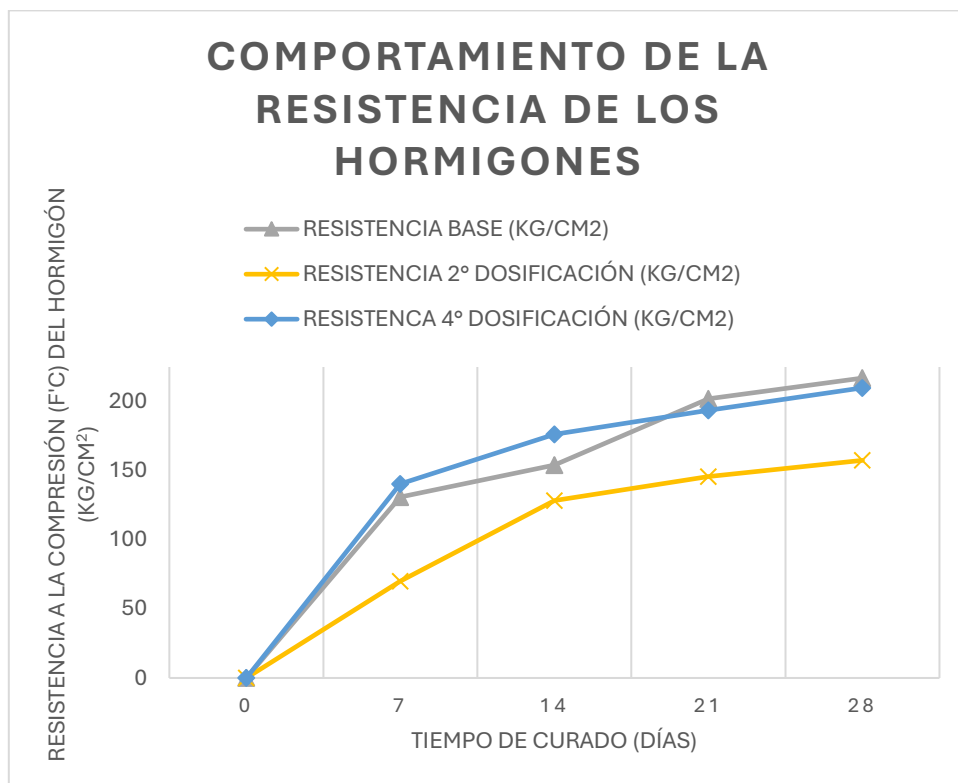


Figura 3.12.- Comportamiento de la Resistencia de los Hormigones Base, 2° y 4° Dosificación.

3.2.3. Análisis de la Resistencia a Flexión

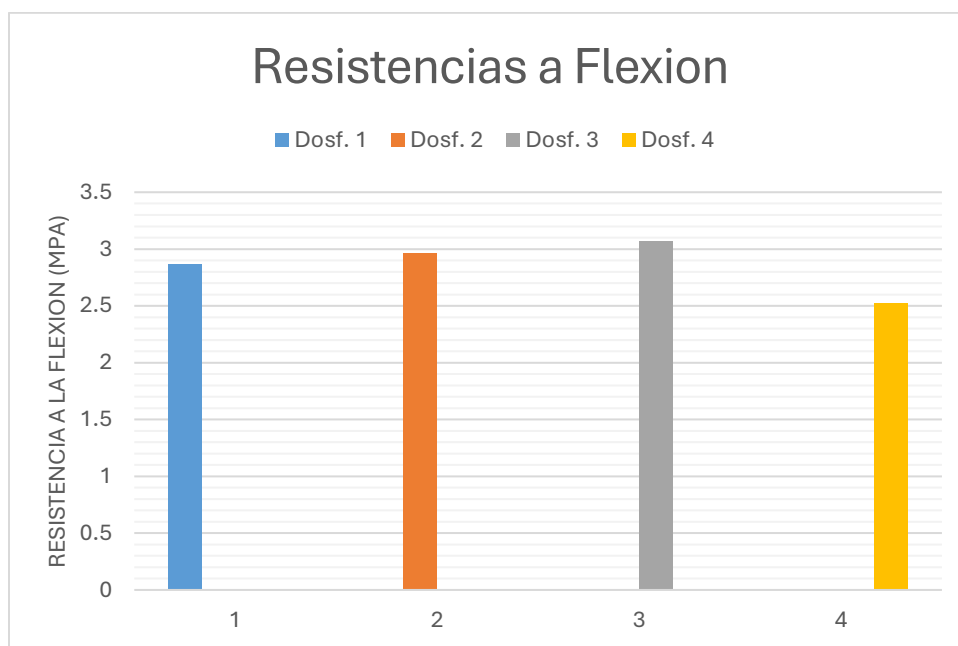


Figura 3.13.- Resistencia a Flexión del Hormigón 1°-2°-3°-4° Dosificaciones.

Al contrastar la primera y tercera dosificación se encuentra que la capacidad portante aumento un 7.56%, la principal diferencia obtenida se muestra en los desplazamientos obtenidos, debido a que la primera probeta falló con 0.84mm de desplazamiento máximo, mientras que la tercera se desarrolló a un máximo de 2.04 mm, lo que corresponde a un incremento del 141.40% en el desplazamiento máximo que es capaz de soportar el hormigón. Es importante recalcar que una vez superada la carga última de las probetas cada una describió una falla de tipo frágil.

A diferencia de la primera y tercera dosificación que mostraron un incremento de resistencias, la segunda y cuarta dosificación reveló una disminución del 14.95% en su resistencia, siendo 2.95 MPa a un 2.52 MPa. Por su parte los desplazamientos obtenidos bajaron de un 1.04 mm a 0.72 mm, lo que representa una reducción del 30.91%. Estas probetas también mostraron una falla frágil por flexión.

3.2.4. Análisis Comparativo e Interrelación de las Resistencias Mecánicas

Con el objetivo de evaluar la correlación constitutiva entre esfuerzos axiales y tensores indirectos o fuerzas de tracción, se procedió a hacer un cruce de variables entre la resistencia a la compresión y el módulo de rotura.

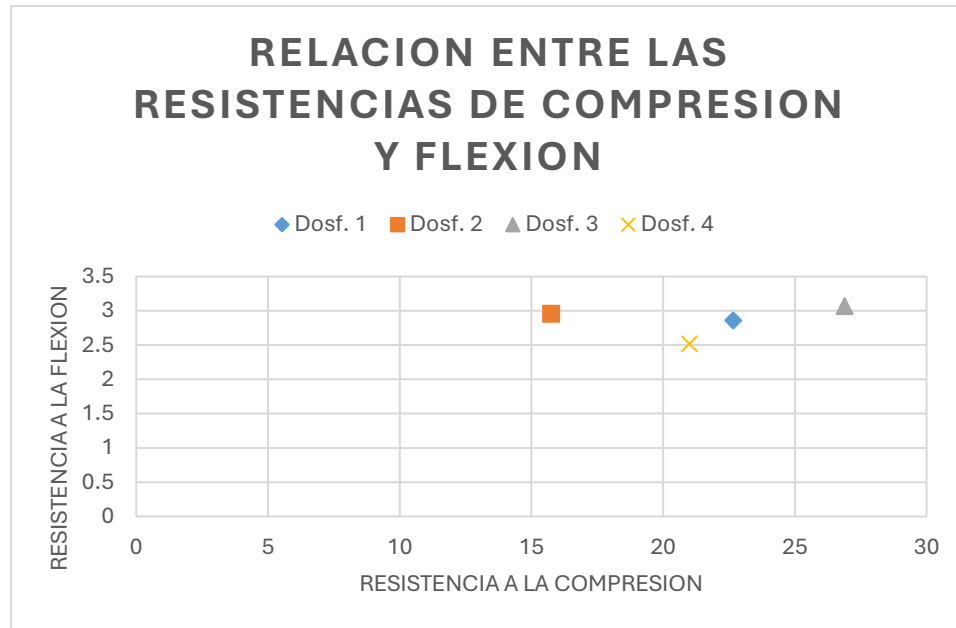


Figura 3.14.- Relación entre las Resistencias a Compresión y Flexión de 1°-2°-3°-4° Dosificaciones.

La figura muestra las propiedades mecánicas de las dosificaciones estudiadas. Estas no muestran una trayectoria lineal, debido a que las dosificaciones tomadas como referencia respondían a distintos tamaños de agregados, resistencias y densidades, es por ello por lo que se procederá analizarlas en pares.

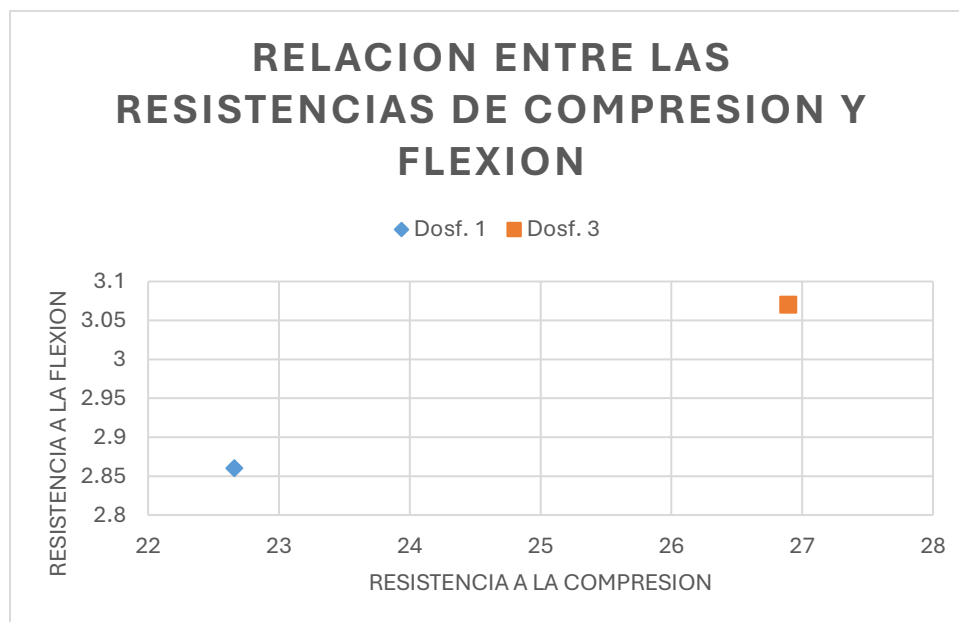


Figura 3.15.- Relación entre las Resistencias de Compresión y Flexión de la 1° y 3° Dosificación.

Al examinar de forma independiente el comportamiento de estas dosificaciones, se observa como la tercera dosificación, adicionada con ripio y cemento de alta resistencia inicial (HE), generó un incremento proporcional en ambas propiedades. La resistencia a la compresión aumentó de 22.66 MPa a 26.89 MPa, mientras que el módulo de rotura se elevó de 2.86 MPa a 3.07 MPa.

3.2.5. Interrelación de las Propiedades Físicas y Mecánicas del Hormigón

Con el propósito de evaluar las dosificaciones estudiadas desde una perspectiva general, se procedió a correlacionarlas de forma simultánea las variables de densidad, resistencia a la compresión y módulo de rotura. En la siguiente figura se expone el comportamiento cruzado de todas las dosificaciones analizadas.

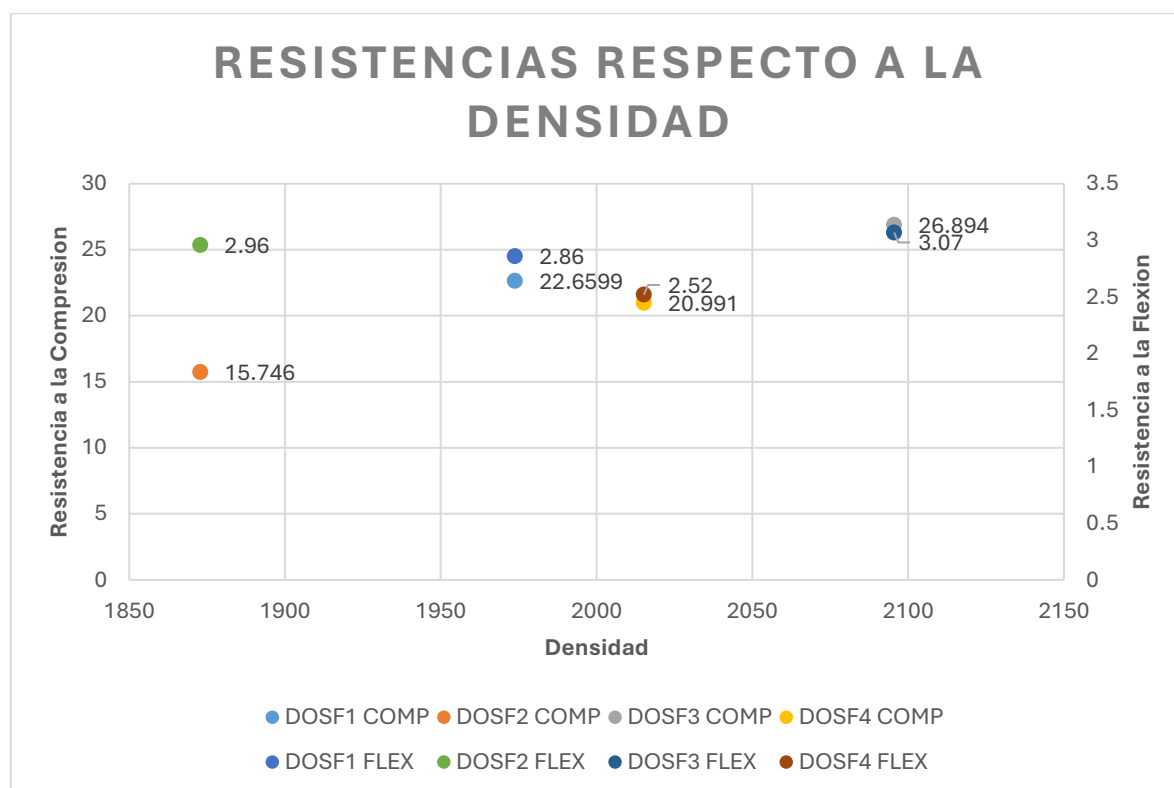


Figura 3.17.- Resistencias respecto a la Densidad de todas las dosificaciones.

Nótese que los marcadores circulares corresponden a los valores de compresión, indexados a la izquierda del gráfico, mientras que los cuadrados corresponden a los datos de flexión indexados a la derecha del gráfico.

Al evaluar las curvas elásticas implícitas para las dosificaciones 1, 3 y 4, se identifica un patrón directamente proporcional, correspondiente a las resistencias esperadas de flexión y compresión, a medida que las muestras se desplazan a la derecha en el eje horizontal, las densidades, se observa un incremento en las resistencias de compresión.

3.2.6. Análisis de los resultados

Al evaluar la variabilidad de los costos asociados a la elaboración de las diferentes dosificaciones presentadas, el mayor factor económico corresponde a la logística del abastecimiento de la piedra pómez, con mayor énfasis, en escenarios donde el agregado en cuestión presenta una disponibilidad limitada en los centros de distribución locales. Para producir íntegramente las dosificaciones bases es necesario emplear agregados de la zona, condición que incrementa sustancialmente los costos cuando sea necesario producirlos en grandes volúmenes. En este contexto, el hecho de utilizar agregados provenientes de la costa representa una alternativa técnicamente viable para mitigar las limitaciones de suministros.

Con los resultados obtenidos, se aprecia que luego de este proceso de intercambio, se obtuvo una reducción del 20% y 25% de su resistencia, a su vez, un aumento de 2.86% y 6.78% de su densidad en comparación de las dosificaciones de Morales y Macas, respectivamente. Por otro lado, para las dos siguientes dosificaciones se experimentó un aumento de 9.02% y 14.38% en su densidad, y una disminución de 3.94% y 0.04% de su resistencia a la compresión en comparación de la de Morales y Macas, respectivamente; por lo que estos parámetros conseguidos, se utilizan como derivaciones de la experimentación.

Si bien es cierto, para estas dos dosificaciones en específico, la experimentación difiere de las normativas ACI 213R-14 y ASTM en los parámetros de hormigones livianos, en los siguientes puntos:

- Para la primera dosificación, se cumple con las directrices de las normativas en su densidad y resistencia a la compresión.
- Para la segunda dosificación, se cumple con el parámetro de densidad, sin embargo, la reducción de la resistencia a la compresión difiere con el argumento de resistencia mínima de 17 MPa.

- Para la tercera dosificación, se sigue cumpliendo con la resistencia a la compresión, no obstante, la densidad superó el límite permitido de los 2000 kg/m³ estipulados por la norma antes citada.
- Para la cuarta dosificación, se mejoró el criterio de la resistencia a la compresión, sin embargo, la densidad superó el límite permisible de la normativa.

Es en este contexto, que resulta pertinente evaluar la aplicación del mismo procedimiento en diseño de hormigones que, tras la sustitución de los agregados, cumplan con los requisitos establecidos por las normativas ACI y ASTM. Asimismo, los porcentajes de variación obtenidos en las propiedades del hormigón liviano constituyen como base de referencia para futuras investigaciones orientadas a profundizar en el análisis de este material y que se pueda ampliar la información de los resultados obtenidos en el presente escrito.

El uso de la piedra pómez como agregado grueso influye de manera considerable en el contenido de humedad de los especímenes en el curado. Es por ello por lo que, para todas las dosificaciones, se utilizó en su condición 100% saturada. Sin embargo, esta cantidad de agua influye directamente en la resistencia a la compresión de las muestras. El agua genera presiones internas al deformarse la muestra, además de favorecer la propagación de microfisuras, de manera que la carga máxima medida sea inferior a la de diseño.

Se evidenció, además, que, si a los especímenes se dejaban mayor tiempo de reposo luego del curado, la resistencia a la compresión aumentaba de manera favorable, incluso alcanzando a las resistencias de las dosificaciones bases.

Tabla 3 9.- *Tabla de Pérdida de Humedad de Especímenes en 24 horas.*

N Especimen	Peso Saturado (kg)	Peso Seco (kg)	Porcentaje de pérdida (%)
1	2938.6	2920.6	0.61
2	2970	2949.8	0.68
3	2995.6	2971	0.82
4	3212	3199.2	0.398
5	3224	3205.2	0.583
6	3318.4	3237	0.3375

7	3257.6	3246.4	0.34
8	3376	3363.8	0.361
9	3263	3251.6	0.399

A continuación, se presentó una tabla resumen de algunos especímenes evaluados, los cuales presentaron una pérdida de humedad mayor al 0.2%, superando los márgenes de evaporación permisibles estipulados por el ACI (2020) y las prácticas de conservación de la ASTM C31. Este criterio solventaría la razón de la pérdida de resistencia de diseño.

CONCLUSIONES

Mediante la investigación se determinó que el uso de hormigones aligerados estructurales en la provincia de Manabí se encuentra principalmente condicionada por la logística de abastecimiento del agregado ligero, piedra pómez, además de la alta variabilidad de las propiedades físicas y mecánicas de los materiales de la región Costa en comparación de la Sierra.

La evaluación de las dosificaciones de referencia evidenció que el intercambio de agregados por materiales de la costa genera un comportamiento físico y mecánico distinto al original, lo que dificulta el cumplimiento de los estándares del ACI-213 y la NEC-SE-HM. Puesto que, las dosificaciones puras, es decir las 100% piedra pómez, cumplieron con el parámetro de la densidad estructural ligera registrando valores de 1973.83 kg/m^3 y 1872.81 kg/m^3 , pero sufrieron durante los ensayos mecánicos alcanzando únicamente el 80.93% y 74.98% de sus resistencias de diseño iniciales, lo que ubicó a la segunda dosificación con un 15.4 MPa, valor por debajo del mínimo de 17 MPa. Por otro lado, las dosificaciones mixtas, de 70% ripio y 30% pómez, optimizadas con cemento de alta resistencia inicial (HE) superaron las metas estructurales, alcanzando un 118.69% de la resistencia de compresión para la tercera dosificación, 26.89 MPa, y el 133.31% para la cuarta dosificación, 20.99 MPa, sin embargo, excedieron el límite máximo de densidad para hormigones aligerados al registrar 2095.5 kg/m^3 y 2015.20 kg/m^3 respectivamente.

Los ensayos estandarizados demostraron que la incorporación de ripio en las dosificaciones mixtas mejora de forma significativa las resistencias constructivas del material bajo esfuerzos de compresión y de flexión. Al contrastar la primera dosificación con la tercera dosificación se registró un incremento del 7.56% en el módulo de rotura, ascendiendo de un 2.86 MPa a 3.07 MPa. Cabe recalcar que, el principal hallazgo fue en la capacidad de deformación, la viga de la tercera dosificación desarrolló un desplazamiento máximo del 2.04 mm frente a los 0.84 mm de la primera. Lo que representa un incremento del 141.40% de su capacidad de deformación. Es importante resaltar que una vez superada la carga última, todas las muestras fallaron de forma frágil por tracción.

A través del análisis de los resultados se puede concluir que la tercera dosificación, mixta y basada en Morales et al. se presenta como una alternativa de viabilidad estructural

para la fundición de elementos estructurales en el contexto de construcción local. Si bien esta dosificación sacrifica su clasificación con hormigón ligero, al incrementar su densidad un 6.16%, este aumento se justifica al garantizar una resistencia a la compresión de 26.89 MPa y un módulo de rotura óptimo de 3.07 MPa. Esto la convierte en una dosificación segura y eficiente para optimizar el peso propio de las estructuras de Manabí, mejorando la respuesta sismorresistente global de la estructura y sin comprometer la seguridad ante estados límites de servicio.

RECOMENDACIONES

Por consiguiente, a lo anteriormente mostrado, se recomienda:

- Evaluar un mayor número de dosificaciones que contengan características similares a las evaluadas en la presente investigación, con el objetivo de obtener una muestra con estadísticas más representativas para analizar la variabilidad de las propiedades mecánicas del hormigón alivianado con piedra pómez.
- Efectuar una evaluación del comportamiento estructural de las dosificaciones presentadas, mediante elementos estructurales como viga, columnas o losa, de esta manera, se obtengan resultados que representen datos más fieles al desempeño bajo cargas similares a la realidad.
- Evaluar otras relaciones de agregados grueso, ripio y piedra pómez. Con la finalidad de explorar un equilibrio óptimo que permita alcanzar la resistencia mínima estructural sin exceder la densidad máxima de 1850 kg/cm^3 .
- Estudiar la inclusión de aditivos incorporadores de aire en la mezcla, con el objetivo de evaluar si la introducción de microburbujas en la pasta cementicia logra reducir la densidad sin afectar la ganancia de resistencia a la compresión.

REFERENCIAS

- ACI 211.1. (2002). Standar Practice for Selecting Proportions for Normal Heavyweighthand Mass Concrete. *ACI Committe*, 38.
- ACI 213R-14. (2014). *Guide for Structural Lightweight-Aggregate Concrete*. Retrieved from [https://www.concrete.org/Portals/0/Files/PDF/Previews/213-14\(23\)_preview.pdf](https://www.concrete.org/Portals/0/Files/PDF/Previews/213-14(23)_preview.pdf)
- ACI 216-R. (1999). *ACI 213R-87: Guide on Structural Lightweight Aggregate Concrete*. American Concrete Institute.
- ACI Committee 318. (2022). *Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19)*. American Concrete Institute.
- Alhashimi, O. I., & Ghareb, A.-H. Y. (2019). *Efecto de la resistencia de unión del acero de refuerzo con recubrimiento epoxi sobre la destrucción del carácter de vigas de hormigón celular curado en autoclave en flexión*.
- ASTM C128-04a. (2004). Método de ensayo normalizado para determinar la densidad, densidad relativa (gravedad específica), y la absorción de agregados finos. ASTM Internacional.
- ASTM C131M-14. (2014). Resistencia a la degradaci'ón del agregado grueso de tamaño pequeño por abrasión e impacto en la máquina de Los Ángeles. ASTM International.
- ASTM C136/C136M. (2019). Método de prueba estándar para análisis granulométrico de agregados finos y gruesos. ASTM International.
- ASTM C29/C29M-17a. (2017). Método de prueba estándar para determinar la densidad aparente ("peso unitario") y vacíos en el agregado. ASTM International.
- ASTM C293/C293M. (2016). *Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Center-Point Loading)*. ASTM International.

- ASTM C330/C330M. (2017). *Standard Specification for Lightweight Aggregates for Structural Concrete*. Retrieved from <https://dl.azmanco.com/standards/ASTM-C/ASTM-C-Series-Full/C/C330.pdf>
- ASTM C40-04. (2004). Método de ensayo normalizado para la detección de impurezas orgánicas en agregados finos para concreto. ASTM International.
- ASTM C78/C78M-21. (2021). *Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)*. ASTM International.
- Carrera Paredes, K., & Changoluisa Yunda, S. (2019). *Diseño De Hormigones Ligeros Con Diferentes Materiales Locales Y Análisis Comparativo Con Un Hormigón Ordinario*.
- Colombo Duran, J. P., & Mendoza Perez, G. (2021). *Piedra Pomez como Agregado Grueso para Mejorar las Propiedades Fisico Mecanicas del Concreto Ligero Estructural*. Lima - Peru. Retrieved from <https://hdl.handle.net/20.500.14138/4783>
- Comité 523 del ACI. (2013). *Guía ACI PRC-523.1-06 para hormigón celular de baja densidad colado in situ*. American Concrete Institute.
- Diaz Merino , L., Altamirano Tocto, L., & Muñoz Perez, S. (2022). *Uso de Materiales Ligeros para la Produccion de hormigon de baja densidad: Una revision literaria*. Retrieved from <https://revistas.ubiobio.cl/index.php/RHS/article/view/5158>
- España. (2021). Real Decreto 470/2021. (p. 1789). Boletín Oficial del Estado, núm. 164. Retrieved from <https://www.boe.es/eli/es/rd/2021/06/29/470/dof/spa/pdf>
- Expanded Shale, Clay and Slate Institute (ESCSI). (2008). *Structural Lightweight Aggregate Concrete*. Retrieved from <https://www.escsi.org/wp-content/uploads/2020/09/CT-SLWAC-PCA-2008.pdf>
- Expanded Shale, Clay and Slate Institute (ESCSI). (2019). *Structural Lightweight Concrete in the Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19)*. Retrieved from https://www.escsi.org/wp-content/uploads/2024/08/ESCSI_Technical-Sheet_7900.095-2019_FINAL.pdf

- Korec, E., Grassl, P., Jirásek, M., & Wong, H. S. (n.d.). Los paneles RAAC pueden colapsar repentinamente antes de cualquier advertencia de agrietamiento de la superficie inducido por la corrosión. *NPJ Materiales de Degradacion*.
- Macas, E. (2006). Dosificación de Hormigón Estructural Liviano Utilizando Piedra Pomez., (p. 165). Loja.
- Macías O., E. (2006). Dosificación de Hormigón Estructural Liviano Utilizando Piedra Pómez. *Universidad Católica de Loja*, 165.
- Manotupa Dueñas, M. (2022). *Influencia de sustitución del agregado grueso por piedra pómez en permeabilidad y resistencia por compresión del concreto 210 kg/cm²*, 2022. Lima Peru. Retrieved from <https://hdl.handle.net/20.500.12692/109050>
- Mina Caicedo, A. B. (2025). *Diseño y caracterización de hormigón estructural liviano de $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ con reemplazo parcial de agregado grueso por piedra pómez en Manabí*. Jipijapa - Ecuador. Retrieved from <http://repositorio.unesum.edu.ec/handle/53000/9510>
- Morales Gubio, L., Santamaría Carrera, J., Barona Caicedo, W., & Tipán Quinatoa, F. (2018). *Hormigón estructural de baja densidad para edificaciones*. Retrieved from <https://revistadigital.uce.edu.ec/index.php/INGENIO/article/download/1704/1798/7401?utm>
- Morales Gubio, L., Santamaría Carrera, J., Caicedo Barona, W., & Tipán Quinatoa, F. (2018). Hormigón estructural de baja densidad para edificaciones. *UCE*, 13.
- Narayanan, N., & Ramamurthy, K. (2000). Estructura y propiedades del hormigón celular: una revisión. *Compuestos de cemento y hormigón*. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0958946500000160?via%3Dihub>
- National Ready Mixed Concrete Association (NRMCA). (2016). *CIP 36: Structural Lightweight Concrete*. Retrieved from <https://eaglerockconcrete.com/wp-content/uploads/concrete-in-practice-36pr.pdf>

- Oliveros Andrade, E. A., & Tapahuasco Guillén, D. (2019). *Influencia del concreto liviano en el desempeño sísmico*. Retrieved from https://repositorioacademico.upc.edu.pe/bitstream/handle/10757/628219/Oliveros_AE.pdf?sequence=5&isAllowed=y
- Olmedo, F., Mateos, I., Dias, F., Gonzalez, M., & Cobo, A. (2016). *Diferencias de comportamiento entre un hormigón convencional y un hormigón ligero*. Anales de Edificación .
- Reyes Velez, J. I. (2021). *DETERMINACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD EN HORMIGONES*. UNESUM. Retrieved from <https://repositorio.unesum.edu.ec/bitstream/53000/2956/1/TESIS%20%20JOSSELYN%20REYES.pdf>
- Robert G., M., & Rossiter Jr, W. (1988). *A Review of Autoclaved Aerated Concrete Products*.
- Rodriguez Ticona, V. M. (2021). *Estudio de las propiedades físicas y mecánicas del concreto ligero para uso estructural, adicionando piedra pómez, Juliaca-Puno, 2021*. Lima - Peru. Retrieved from <https://hdl.handle.net/20.500.12692/87108>
- Sanchez de Guzman , D. (2001). *Tecnología del Concreto y del Mortero*. Retrieved from <https://books.google.co.ve/books?id=EWq-QPJhsRAC&printsec=frontcover&dq=concreto&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwiruqLx967KAhUM6CYKHXLpDqkQ6AEIGjAA#v=onepage&q=concreto&f=false>
- Servicio Ecuatoriano de Normalización. (2022). *NTE INEN 1855-2: Hormigón preparado en obra – Requisitos*. Construcciones UCE. Retrieved from <https://construccionesuce.wordpress.com/2022/08/28/nte-inen-1855-2-hormigon-preparado-en-obra-requisitos/>
- Servicio Ecuatoriano de Normalización. (n.d.). *INEN 1573: Determinación de la resistencia a la compresión*. Retrieved from <https://prezi.com/p/khqyyyuo2sd5/inen-1573-determinacion-a-la-resistencia-a-la-compresion/>

- Valdez Guzman , F., & Suarez Alcivar, G. (2010). *Hormigones Livianos*. Retrieved from <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/10620/1/T-68474%20VALDEZ%20-%20SUAREZ.pdf>
- Valle, A. I., Marcillo Zapata, C. A., Brito Noboa, J. P., & Hidalgo Robalino, D. H. (2024). *Estudio exploratorio de piedra pómez como agregado en la producción de concretos ligeros*.
- Yagual Vera, D., & Villacis Apolinario, D. (2015). *Hormigon Liviano de Alto Desempeño con Arcilla Expandida*. Retrieved from <https://repositorio.upse.edu.ec/server/api/core/bitstreams/c9e13e02-b8f5-4777-8d1e-c0e70a2b9b59/content>

ANEXOS

Anexo 1.1.- Informe del Laboratorio Hormigón, Suelos y Materiales "Bolívar Ortiz Logroño". Resultados del ensayo a flexión Primera Dosificación.



LABORATORIO HORMIGÓN, SUELOS Y MATERIALES "BOLIVAR ORTIZ LOGROÑO"

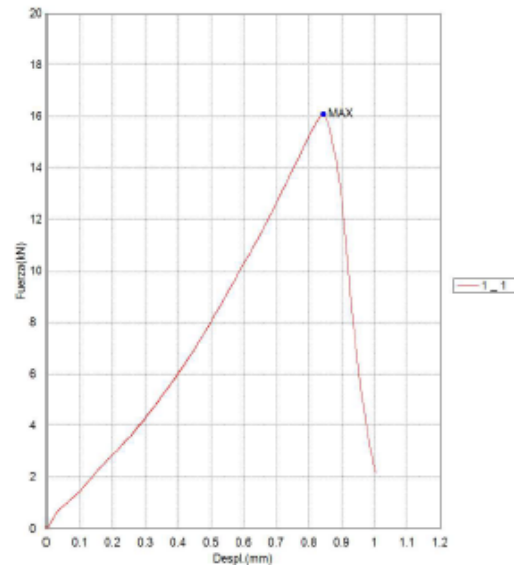
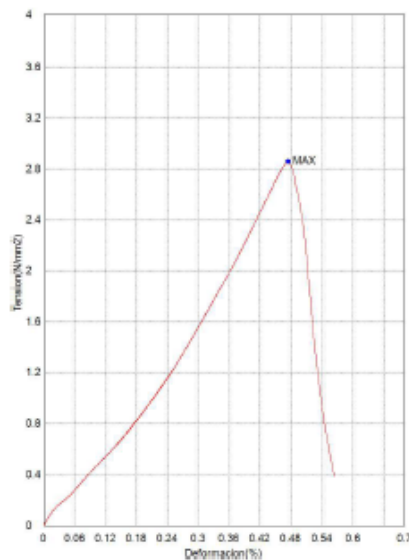
Nombre de producto		Nombre de metodo de ensayo	Test A Flexion 3p vigas hormigón normada.xmux
Operador	Ing Javier Bravo	Fecha de informe	5/26/2026
Fecha de ensayo	5/26/2026	Temperatura	20°C
Modo de Ensayo	Sencillo	Tipo de ensayo	Flexión 3 ptos.
Velocidad	0.05N/mm2/sec	Forma	Plana
Nºde partidas:	1	Nºde muestras:	1

Parametros y Resultados

Nombre de muestra	Espesor	Anchura	Soporte inferior
Unidad	mm	mm	mm
1 _ 1	150.0000	150.0000	400.0000

Nombre Parametros	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas kN	Max._Tension Calc. at Entire Areas N/mm2	Max._Desplazamiento Calc. at Entire Areas mm	Max._Deformacion Calc. at Entire Areas %
1 _ 1	16.0924	2.86087	0.84350	0.47447
Media	16.0924	2.86087	0.84350	0.47447
Desviacion Estandar	—	—	—	—
Rango	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

Graficos



Todos los datos proporcionados por el Laboratorio "Bolívar Ortiz Logroño" son: propiedad del mismo y de la empresa o usuario que le corresponda. Cualquier uso inadecuado de esta información o divulgación de los mismos, puede conllevar a acciones legales. Gracias por trabajar con nosotros.

Anexo 1.2.- Informe del Laboratorio Hormigón, Suelos y Materiales "Bolívar Ortiz Logroño". Resultados del ensayo a flexión Segunda Dosificación.



**LABORATORIO HORMIGÓN, SUELOS Y MATERIALES
"BOLIVAR ORTIZ LOGROÑO"**

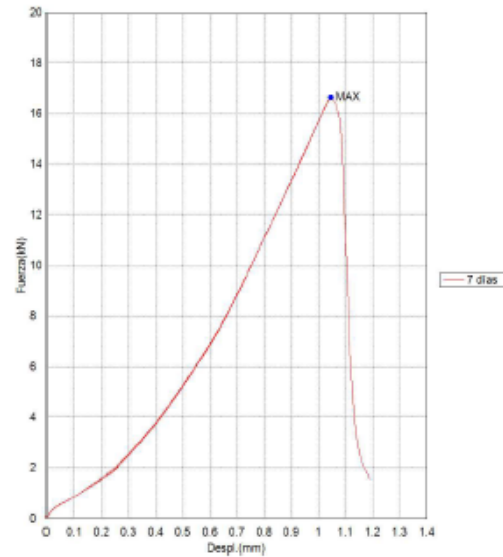
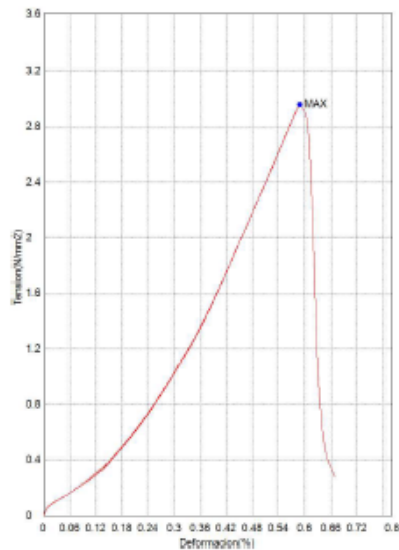
Nombre de producto		Nombre de metodo de ensayo	Test A Flexion 3p vigas hormigón normado.xmux
Operador	Ing Javier Bravo	Fecha de informe	6/3/2026
Fecha de ensayo	6/3/2026	Temperatura	20°C
Modo de Ensayo	Sencillo	Tipo de ensayo	Flexión 3 ptos.
Velocidad	0.05N/mm2/sec	Forma	Plana
Nºde partidas:	1	Nºde muestras:	1

Parametros y Resultados

Nombre de muestra	Espesor	Anchura	Soporte inferior
Unidad	mm	mm	mm
7 días	150.0000	150.0000	400.0000

Nombre	Max._Fuerza	Max._Tension	Max._Desplazamiento	Max._Deformacion
Parametros	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas	Calc. at Entire Areas
Unidad	kN	N/mm2	mm	%
7 días	16.6429	2.95874	1.04663	0.58873
Media	16.6429	2.95874	1.04663	0.58873
Desviacion Estandar	--	--	--	--
Rango	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

Graficos



Todos los datos proporcionados por el Laboratorio "Bolívar Ortiz Logroño" son: propiedad del mismo y de la empresa o usuario que le corresponda. Cualquier uso inadecuada de esta información o divulgación de los mismos, puede conllevar a acciones legales. Gracias por trabajar con nosotros.

Anexo 1.3.- Informe del Laboratorio Hormigón, Suelos y Materiales "Bolívar Ortiz Logroño". Resultados del ensayo a flexión Tercera Dosificación.



LABORATORIO HORMIGÓN, SUELOS Y MATERIALES "BOLIVAR ORTIZ LOGROÑO"

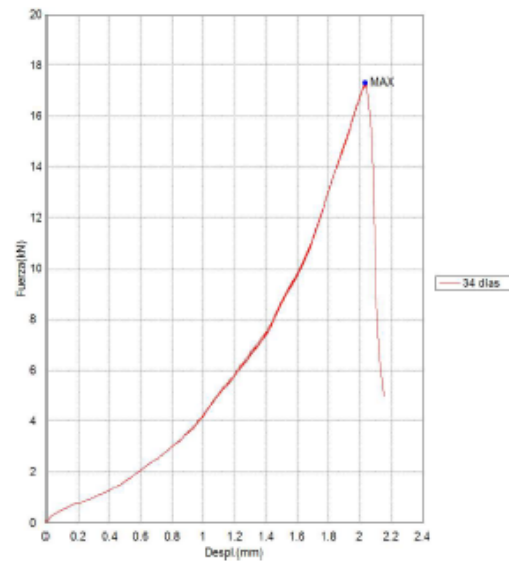
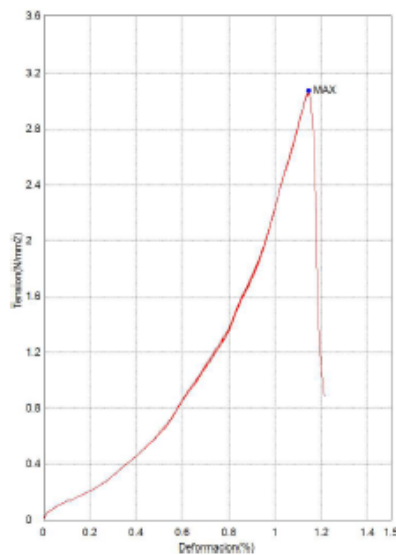
Nombre de producto	35 días	Nombre de metodo de ensayo	Test A Flexion 3p vigas hormigón normado.xmux
Operador	Ing Javier Bravo	Fecha de informe	6/22/2026
Fecha de ensayo	6/22/2026	Temperatura	20°C
Modo de Ensayo	Sencillo	Tipo de ensayo	Flexión 3 ptos.
Velocidad	0.05N/mm2/sec	Forma	Plana
Nº de partidas:	1	Nº de muestras:	1

Parametros y Resultados

Nombre de muestra	Espesor	Anchura	Soporte inferior
Unidad	mm	mm	mm
34 días	150.0000	150.0000	400.0000

Nombre Parametros	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas Unidad	Max._Tension Calc. at Entire Areas N/mm2	Max._Desplazamiento Calc. at Entire Areas mm	Max._Deformacion Calc. at Entire Areas %
34 días	17.3083	3.07703	2.03613	1.14532
Media	17.3083	3.07703	2.03613	1.14532
Desviacion Estandar	--	--	--	--
Rango	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

Graphicos



Anexo 1.4.- Informe del Laboratorio Hormigón, Suelos y Materiales "Bolívar Ortiz Logroño". Resultados del ensayo a flexión Cuarta Dosificación.



LABORATORIO HORMIGÓN, SUELOS Y MATERIALES "BOLIVAR ORTIZ LOGROÑO"

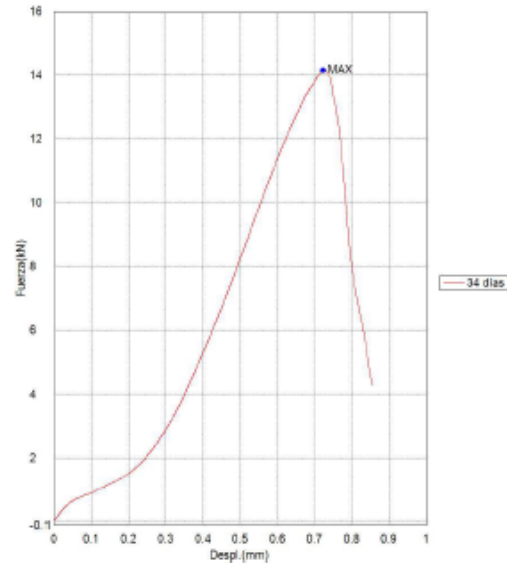
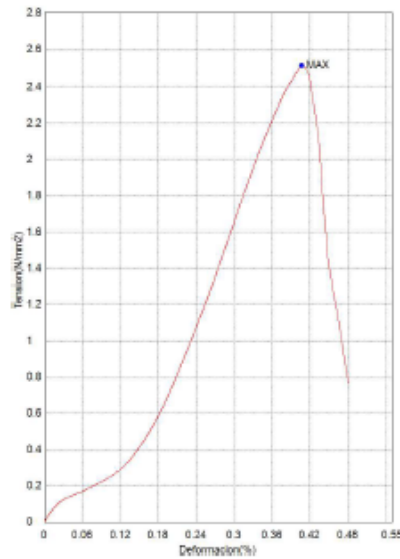
Nombre de producto		Nombre de metodo de ensayo	Test A Flexion 3p vigas hormigón normado.xmux
Operador	Ing. Javier Bravo	Fecha de informe	6/22/2026
Fecha de ensayo	6/22/2026	Temperatura	20°C
Modo de Ensayo	Sencillo	Tipo de ensayo	Flexión 3 ptos.
Velocidad	0.05N/mm2/sec	Forma	Plana
Nº de partidas:	1	Nº de muestras:	1

Parametros y Resultados

Nombre de muestra	Espesor	Anchura	Soporte inferior
Unidad	mm	mm	mm
34 días	150.0000	150.0000	400.0000

Nombre Parametros	Max._Fuerza Calc. at Entire Areas Unidad	Max._Tension Calc. at Entire Areas N/mm2	Max._Desplazamiento Calc. at Entire Areas mm	Max._Deformacion Calc. at Entire Areas %
34 días	14.1545	2.51636	0.72313	0.40676
Media	14.1545	2.51636	0.72313	0.40676
Desviacion Estandar	--	--	--	--
Rango	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000

Graficos



Todos los datos proporcionados por el Laboratorio "Bolívar Ortiz Logroño" son: propiedad del mismo y de la empresa o usuario que le corresponda. Cualquier uso inadecuado de esta información o divulgación de los mismos, puede conllevar a acciones legales. Gracias por trabajar con nosotros.

Anexo 1.5.- Datos de Cilindros de la Primera Dosificación.

N° PROBETA	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Volumen (m³)	Densidad (kg/m³)
<i>PROBETA 1</i>	10.02	20.18	3.084	0.002	1932.738
	10.05	20.07			
	10.11	20.15			
	10	20.14			
<i>PROMEDIO</i>	10.045	20.135			
N° PROBETA	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Volumen (m³)	Densidad (kg/m³)
<i>PROBETA 2</i>	10.09	20.08	3.069	0.002	1927.526
	10	20.17			
	10.03	20.18			
	10.02	20.09			
<i>PROMEDIO</i>	10.035	20.13			
N° PROBETA	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Volumen (m³)	Densidad (kg/m³)
<i>PROBETA 3</i>	9.97	20.11	3.091	0.002	1963.118
	9.99	20.05			
	10.01	19.97			
	10.04	20.01			
<i>PROMEDIO</i>	10.003	20.035			
N° PROBETA	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Volumen (m³)	Densidad (kg/m³)
<i>PROBETA 4</i>	10.02	20.09	3.075	0.002	1933.466
	10.03	20.02			
	10.08	20.06			
	10.06	20.07			
<i>PROMEDIO</i>	10.048	20.060			
N° PROBETA	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Volumen (m³)	Densidad (kg/m³)
<i>PROBETA 5</i>	9.98	20.05	3.107	0.002	1960.527
	10.08	20.08			
	10.07	20			

PROMEDIO	10	20.06			
	10.033	20.048			
N° PROBETA	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Volumen (m³)	Densidad (kg/m³)
PROBETA 6	10.01	20	3.099	0.002	1953.775
	10.09	20.09			
	9.99	20.05			
	10.06	20.04			
PROMEDIO	10.038	20.045			
N° PROBETA	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Volumen (m³)	Densidad (kg/m³)
PROBETA 7	10.04	20.12	3.118	0.002	1985.246
	9.95	19.98			
	9.97	20.06			
	-	-			
PROMEDIO	9.987	20.053			
N° PROBETA	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Volumen (m³)	Densidad (kg/m³)
PROBETA 8	10.02	19.94	3.074	0.002	1954.815
	9.99	20.04			
	10	20.05			
	-	-			
PROMEDIO	10.003	20.010			
N° PROBETA	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Volumen (m³)	Densidad (kg/m³)
PROBETA 9	10.03	20.01	3.112	0.002	1976.014
	10.04	20.02			
	9.95	20.05			
	-	-			
PROMEDIO	10.007	20.027			
N° PROBETA	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Volumen (m³)	Densidad (kg/m³)
PROBETA 10	10.02	20.11	3.124	0.002	1989.071
	9.93	20.16			
	9.94	20.17			

<i>PROMEDIO</i>	-	-			
	9.963	20.147			
N° PROBETA	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Volumen (m³)	Densidad (kg/m³)
	9.97	20.11	3.108	0.002	1962.554
<i>PROBETA 11</i>	10.04	20.1			
	10.03	20.12			
	-	-			
<i>PROMEDIO</i>	10.013	20.110			
N° PROBETA	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Volumen (m³)	Densidad (kg/m³)
	10.01	20.13	3.122	0.002	1989.251
<i>PROBETA 12</i>	9.99	20.11			
	9.9	20.1			
	-	-			
<i>PROMEDIO</i>	9.967	20.113			
N° PROBETA	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Volumen (m³)	Densidad (kg/m³)
	9.99	20.1	3.141	0.002	1984.240
<i>PROBETA 13</i>	10	20.12			
	10.05	20.09			
	-	-			
<i>PROMEDIO</i>	10.013	20.103			
N° PROBETA	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Volumen (m³)	Densidad (kg/m³)
	10.02	20.25	3.124	0.002	1959.257
<i>PROBETA 14</i>	10.02	20.29			
	9.97	20.33			
	-	-			
<i>PROMEDIO</i>	10.003	20.29			

Anexo 1.6.- Datos de Cilindros de la Segunda Dosificación.

N° PROBETA	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Volumen (m³)	Densidad (kg/m³)
<i>PROBETA 1</i>	10.230	20.340	2.967	0.002	1813.434
	10.140	20.300			
	10.000	20.350			
	-	-			
<i>PROMEDIO</i>	10.123	20.330			
N° PROBETA	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Volumen (m³)	Densidad (kg/m³)
<i>PROBETA 2</i>	10.020	20.490	2.946	0.002	1806.621
	10.120	20.350			
	10.110	20.430			
	-	-			
<i>PROMEDIO</i>	10.083	20.423			
N° PROBETA	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Volumen (m³)	Densidad (kg/m³)
<i>PROBETA 3</i>	10.050	20.190	2.878	0.002	1802.583
	9.990	20.250			
	10.040	20.230			
	-	-			
<i>PROMEDIO</i>	10.027	20.223			
N° PROBETA	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Volumen (m³)	Densidad (kg/m³)
<i>PROBETA 4</i>	9.990	20.140	2.922	0.002	1843.408
	9.980	20.280			
	10.000	20.250			
	-	-			
<i>PROMEDIO</i>	9.990	20.223			
N° PROBETA	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Volumen (m³)	Densidad (kg/m³)
<i>PROBETA 5</i>	9.990	20.310	2.934	0.002	1852.426
	10.000	20.260			
	9.950	20.170			

	-	-			
PROMEDIO	9.980	20.247			
N° PROBETA	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Volumen (m³)	Densidad (kg/m³)
	10.010	20.030			
	10.020	20.220			
PROBETA 6	10.030	20.010	2.848	0.002	1798.134
	-	-			
PROMEDIO	10.020	20.087			
N° PROBETA	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Volumen (m³)	Densidad (kg/m³)
	10.010	20.000			
	-	-			
PROBETA 7	-	-	2.930	0.002	1861.571
	-	-			
PROMEDIO	10.010	20.000			
N° PROBETA	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Volumen (m³)	Densidad (kg/m³)
	10.030	20.010			
	-	-			
PROBETA 8	-	-	2.880	0.002	1821.603
	-	-			
PROMEDIO	10.030	20.010			
N° PROBETA	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Volumen (m³)	Densidad (kg/m³)
	9.980	20.020			
	-	-			
PROBETA 9	-	-	2.977	0.002	1900.664
	-	-			
PROMEDIO	9.980	20.020			
N° PROBETA	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Volumen (m³)	Densidad (kg/m³)
	10.010	20.000			
	-	-			
PROBETA 10	-	-	2.921	0.002	1855.599
	-	-			

	-	-			
PROMEDIO	10.010	20.000			
N° PROBETA	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Volumen (m³)	Densidad (kg/m³)
	10.030	20.010			
PROBETA 11	-	-			
	-	-	2.950	0.002	1865.751
	-	-			
PROMEDIO	10.030	20.010			
N° PROBETA	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Volumen (m³)	Densidad (kg/m³)
	9.980	20.020			
PROBETA 12	-	-			
	-	-	2.971	0.002	1897.089
	-	-			
PROMEDIO	9.980	20.020			

Anexo 1.7.- Datos de Cilindros de la Tercera Dosificación.

N° PROBETA	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Volumen (m³)	Densidad (kg/m³)
<i>PROBETA 1</i>	10.010	20.000	3.248	0.002	2059.305
	10.030	-			
	-	-			
	-	-			
<i>PROMEDIO</i>	10.020	20.000			
N° PROBETA	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Volumen (m³)	Densidad (kg/m³)
<i>PROBETA 2</i>	9.980	19.980	3.258	0.002	2080.150
	10.000	-			
	-	-			
	-	-			
<i>PROMEDIO</i>	9.990	19.980			
N° PROBETA	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Volumen (m³)	Densidad (kg/m³)
<i>PROBETA 3</i>	9.970	19.990	3.268	0.002	2089.673
	9.990	-			
	-	-			
	-	-			
<i>PROMEDIO</i>	9.980	19.990			
N° PROBETA	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Volumen (m³)	Densidad (kg/m³)
<i>PROBETA 4</i>	10	20	3.246	0.002	2066.722
	-	-			
	-	-			
	-	-			
<i>PROMEDIO</i>	10	20			
N° PROBETA	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Volumen (m³)	Densidad (kg/m³)
<i>PROBETA 5</i>	10	20	3.364	0.002	2141.462
	-	-			
	-	-			
	-	-			
<i>PROMEDIO</i>	10	20			

N° PROBETA	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Volumen (m³)	Densidad (kg/m³)
PROBETA 6	10	20	3.252	0.002	2070.033
	-	-			
	-	-			
	-	-			
PROMEDIO	10	20			
N° PROBETA	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Volumen (m³)	Densidad (kg/m³)
PROBETA 7	10	20	3.353	0.002	2134.841
	-	-			
	-	-			
	-	-			
PROMEDIO	10	20			
N° PROBETA	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Volumen (m³)	Densidad (kg/m³)
PROBETA 8	10	20	3.367	0.002	2143.499
	-	-			
	-	-			
	-	-			
PROMEDIO	10	20			
N° PROBETA	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Volumen (m³)	Densidad (kg/m³)
PROBETA 9	10	20	3.268	0.002	2080.728
	-	-			
	-	-			
	-	-			
PROMEDIO	10	20			
N° PROBETA	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Volumen (m³)	Densidad (kg/m³)
PROBETA 10	10	20	3.258	0.002	2074.107
	-	-			
	-	-			
	-	-			
PROMEDIO	10	20			

N° PROBETA	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Volumen (m³)	Densidad (kg/m³)
<i>PROBETA 11</i>	10	20	3.252	0.002	2070.542
	-	-			
	-	-			
	-	-			
<i>PROMEDIO</i>	10	20			
N° PROBETA	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Volumen (m³)	Densidad (kg/m³)
<i>PROBETA 12</i>	10	20	3.364	0.002	2141.844
	-	-			
	-	-			
	-	-			
<i>PROMEDIO</i>	10	20			

Anexo 1.8.- Datos de Cilindros de la Cuarta Dosificación.

N° PROBETA	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Volumen (m³)	Densidad (kg/m³)
<i>PROBETA 1</i>	9.98	20.01	3.220	0.002	2050.942
	10.01	-			
	-	-			
	-	-			
<i>PROMEDIO</i>	9.995	20.01			
N° PROBETA	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Volumen (m³)	Densidad (kg/m³)
<i>PROBETA 1</i>	9.97	20.03	3.250	0.002	2067.983
	10.02	-			
	-	-			
	-	-			
<i>PROMEDIO</i>	9.995	20.03			
N° PROBETA	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Volumen (m³)	Densidad (kg/m³)
<i>PROBETA 1</i>	9.97	19.97	3.303	0.002	2110.132
	10.01	-			
	-	-			
	-	-			
<i>PROMEDIO</i>	9.99	19.97			
N° PROBETA	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Volumen (m³)	Densidad (kg/m³)
<i>PROBETA 1</i>	10	20	3.199	0.002	2036.674
	-	-			
	-	-			
	-	-			
<i>PROMEDIO</i>	10	20			
N° PROBETA	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Volumen (m³)	Densidad (kg/m³)
<i>PROBETA 1</i>	10	20	3.205	0.002	2040.494
	-	-			
	-	-			

<i>PROMEDIO</i>	-	-			
	10	20			
<i>N° PROBETA</i>	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Volumen (m³)	Densidad (kg/m³)
	10	20			
<i>PROBETA 1</i>	-	-			
	-	-			
<i>PROMEDIO</i>	-	-			
	10	20			
<i>N° PROBETA</i>	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Volumen (m³)	Densidad (kg/m³)
	10	20			
<i>PROBETA 1</i>	-	-			
	-	-			
<i>PROMEDIO</i>	-	-			
	10	20			
<i>N° PROBETA</i>	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Volumen (m³)	Densidad (kg/m³)
	10	20			
<i>PROBETA 1</i>	-	-			
	-	-			
<i>PROMEDIO</i>	-	-			
	10	20			
<i>N° PROBETA</i>	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Volumen (m³)	Densidad (kg/m³)
	10	20			
<i>PROBETA 1</i>	-	-			
	-	-			
<i>PROMEDIO</i>	-	-			
	10	20			
<i>N° PROBETA</i>	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Volumen (m³)	Densidad (kg/m³)
	10	20			
<i>PROBETA 1</i>	-	-			
	-	-			
<i>PROMEDIO</i>	-	-			
	10	20			
<i>N° PROBETA</i>	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Volumen (m³)	Densidad (kg/m³)
	10	20			
<i>PROBETA 1</i>	-	-			
	-	-			
<i>PROMEDIO</i>	-	-			
	10	20			
<i>N° PROBETA</i>	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Volumen (m³)	Densidad (kg/m³)
	10	20			
<i>PROBETA 1</i>	-	-			
	-	-			
<i>PROMEDIO</i>	-	-			
	10	20			

<i>PROMEDIO</i>	-	-			
	10	20			
<i>N° PROBETA</i>	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Volumen (m³)	Densidad (kg/m³)
	10	20			
<i>PROBETA 1</i>	-	-	3.173	0.002	2019.867
	-	-			
	-	-			
<i>PROMEDIO</i>	10	20			
<i>N° PROBETA</i>	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Peso (kg)	Volumen (m³)	Densidad (kg/m³)
	10	20			
<i>PROBETA 1</i>	-	-	3.164	0.002	2014.010
	-	-			
	-	-			
<i>PROMEDIO</i>	10	20			