



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**DISEÑO DE MEZCLA DE CONCRETO CELULAR PARA BLOQUES EN
TABIQUERÍA CON UNA RESISTENCIA DE 2 MPA**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
título de Ingeniero Civil

AUTOR: JORGE LUIS CAMPOVERDE ABRIL

TUTOR: ING. FERNANDO RENÉ CÁRDENAS ÁLVAREZ, MSc.

Cuenca - Ecuador

2024

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Jorge Luis Campoverde Abril con documento de identificación N° 0151805710, manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 22 de julio del 2024

Atentamente,



Jorge Luis Campoverde Abril

0151805710

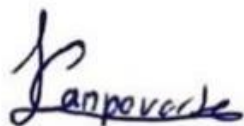
**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, Jorge Luis Campoverde Abril con documento de identificación N° 0151805710, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Proyecto de investigación: “Diseño de mezcla de concreto celular para bloques en tabiquería con una resistencia de 2 Mpa”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Civil, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 22 de julio del 2024

Atentamente,



Jorge Luis Campoverde Abril

0151805710

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Fernando René Cárdenas Álvarez con documento de identificación N° 0102086592, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: DISEÑO DE MEZCLA DE CONCRETO CELULAR PARA BLOQUES EN TABIQUERÍA CON UNA RESISTENCIA DE 2 MPA, realizado por Jorge Luis Campoverde Abril con documento de identificación N° 0151805710, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto de investigación que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 22 de julio del 2024

Atentamente,



Ing. Fernando René Cárdenas Álvarez, MSc
0102086592

Dedicatoria

A mi abuelo, Jorge Luis Campoverde la persona que desde pequeño fue mi inspiración en todos los aspectos de mi vida. A quien debo gran parte de las cosas buenas que me han pasado, y quien me hizo un hombre amable, respetuoso y responsable, tal como él fue. Aunque ya no esté físicamente, sé que siempre me cuidará y estará orgulloso de mí. Que descanse en paz.

A mi abuela, Carmen Inocenta Burgos, quien fue una madre para mí y una de las personas que más quiero en este mundo. Le debo todo y más. Su apoyo constante, sus sacrificios y su presencia en los momentos más difíciles fueron fundamentales para muchos de mis logros. Sin su ayuda, no habría sido capaz de alcanzar muchas de las metas que me propuse. Sé que está orgullosa de mí y de considerarme como un hijo más.

A mis abuelos, Jorge Orlando Abril y Mariana de Lourdes Ampudia, por su amor incondicional, por formar gran parte de mi niñez y enseñarme los mejores valores que cada uno tiene. Su compañía en los momentos más indicados de mi vida me formó como la persona que soy y me prepararon para el futuro.

A mis padres, Jorge Luis Campoverde y Andrea Verónica Abril, sé que estarán orgullosos de mí y del hombre en el que me he convertido, gracias a su guía y amor incondicional.

A mi hermana, Emilie Estefanía Campoverde, quien siempre estuvo conmigo en las buenas y en las malas. Una de las personas que más quiero. Siempre traté de ser el mejor ejemplo de hermano mayor para ti, y guiarte, espero que te sientas orgullosa de poder decir que soy tu hermano.

Agradecimientos

A mis hermanos Emilie, Fiorella, Carlos, Emma y Nico, Gracias por inspirarme a ser una mejor persona y darles un buen ejemplo. Siempre trataré de estar ahí para ayudarles en los momentos que más me necesiten y para apoyarles en el cumplimiento de sus sueños.

A mis tías Dolores, Ximena, Jazmín y Kiara, Por su constante apoyo y sus palabras de aliento, que han sido fundamentales en mis decisiones. Gracias por creer en mí y animarme a nunca rendirme.

A mis tíos Jaime y Jorge, Por enseñarme la importancia de la familia y a mantener la esperanza en los momentos difíciles. Sus enseñanzas han sido clave para mí.

A mi primo Paul, Por ser un ejemplo de superación y por haber compartido gran parte de mi niñez conmigo. Tu influencia me ha preparado para ser un ejemplo para mis hermanos.

A mi tutor de tesis, Ing. Fernando Cárdenas, Por su compromiso, amabilidad y paciencia. Sus enseñanzas y aportes han sido esenciales en el desarrollo de este proyecto y siempre los llevaré conmigo en mi carrera profesional.

Al Ing. Santiago Vélez, por ser el mejor ejemplo que he tenido de como quiero llevar mi vida profesional. Gracias por sus enseñanzas, consejos, amabilidad, honestidad y amistad.

A mis primos y amigos, Por sus palabras de aliento y constante compañía. Gracias por creer en mí y apoyarme en todo momento.

A mis primos y amigos, sus palabras de aliento y su compañía siempre estuvieron ahí para mí, gracias por creer en mí y apoyarme.

Resumen

En Ecuador, la utilización de bloques de hormigón en tabiquería incrementa la carga muerta de las estructuras, lo que requiere ajustes en los elementos estructurales como cimentaciones, vigas y columnas. Esto aumenta los materiales necesarios y los costos de construcción e ingeniería estructural. La investigación aborda esta problemática proponiendo el uso de concreto celular como alternativa para reducir el peso y cumplir con los estándares de resistencia a la compresión.

La metodología se centró en el diseño de mezclas de concreto celular con diferentes densidades en estado fresco para evaluar su resistencia a la compresión basado en la ACI 523.3R-14. Se realizaron ensayos experimentales en cilindros y bloques con densidades variando desde 800 kg/m³ hasta 1390 kg/m³. Se ajustó las curvas de resistencia para determinar la densidad óptima que proporciona la resistencia a la compresión de 2 Mpa.

Los resultados se interpretaron y se realizaron correcciones en las mezclas para optimizar la densidad y resistencia del concreto celular. El estudio se enfocó en encontrar un diseño de mezcla de concreto celular que cumpla con los requerimientos de las normas, manteniendo sus propiedades físicas y mecánicas.

Abstract

In Ecuador, the use of concrete blocks in partition walls increases the dead load of structures, requiring adjustments in structural elements such as foundations, beams, and columns. This results in increased material requirements and costs of construction and structural engineering. The research addresses this issue by proposing the use of cellular concrete as an alternative to reduce weight and meet compression strength standards.

The methodology focused on designing cellular concrete mixtures with different fresh state densities to evaluate their compressive strength based on ACI 523.3R-14. Experimental tests were conducted on cylinders and blocks with densities ranging from 800 kg/m³ to 1390 kg/m³. The strength curves were adjusted to determine the optimal density that provides the required compressive strength.

The results were interpreted, and corrections were made to the mixtures to optimize the density and strength of cellular concrete. The study focused on finding a cellular concrete mix design that meets the standards' requirements while maintaining its physical and mechanical properties.

Índice

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	7
1.1. <i>Antecedentes</i>	8
2. JUSTIFICACIÓN Y RELEVANCIA.....	10
3. OBJETIVOS.....	13
3.1. <i>Objetivo general</i>	13
3.2. <i>Objetivos Específicos</i>	13
4. MARCO TEÓRICO	14
4.1. <i>Concreto Celular</i>	14
4.2. <i>Historia del concreto celular</i>	15
4.3. <i>Tipos de concreto Alivianado</i>	16
4.3.1. Concretos con Agregados Ligeros	16
4.3.2. Concreto Ligero sin Finos	16
4.3.3. Concreto Celular	18
4.3.3.1 Tipos de concreto celular	18
4.3.3.2 Hormigón celular por incorporación de gases.	18
4.3.3.3. Hormigón celular por Incorporación de Agentes Químicos	18
4.3.3.4. Hormigón Celular por incorporación de agentes espumantes.....	19
4.4. <i>Composición Del Concreto Celular</i>	20
4.4.1. <i>Cemento</i>	20
4.4.2. <i>Agregado fino</i>	20
4.4.2.1. Áridos para uso en morteros.	20
4.4.2.2. Granulometría para morteros.....	21
4.4.2.3. Sustancias Perjudiciales.	21
4.4.2.4. Impurezas orgánicas.....	22
4.4.2.5. Propiedades del agregado fino.	22
4.4.3. <i>Agua</i>	23
4.4.4. <i>Espuma Preformada</i>	23
4.4.5. <i>Agentes espumantes</i>	24
4.5. <i>Proceso de Formación</i>	25
4.6. <i>Diseño de mezcla</i>	27
4.6.1. <i>Proporciones de la mezcla</i>	28
4.6.2. <i>Propiedades físicas del concreto celular</i>	31
4.6.2.1. <i>Propiedades acústicas</i>	31
4.6.2.2 <i>Densidad</i>	32
4.6.2.3. <i>Densidad en estado fresco</i>	32
4.6.2.5. <i>Densidad seca al horno</i>	32
4.6.2.6. <i>Conductividad térmica</i>	32
4.6.2.3. <i>Trabajabilidad</i>	33
4.6.3. <i>Propiedades mecánicas del concreto celular</i>	33
4.6.3.1. <i>Resistencia a la compresión</i>	33
4.6.3.2. <i>Módulo de elasticidad</i>	34
4.6.4. <i>Durabilidad</i>	34
4.6.4.1. <i>Absorción del agua</i>	34
4.6.4.2. <i>Permeabilidad</i>	34
4.6.5. <i>Manejo</i>	35
4.6.5.1. <i>Encofrado</i>	35
4.6.5.2. <i>Acabado</i>	35
4.6.5.3. <i>Curado</i>	35

5. VARIABLES	36
5.1. CARACTERIZACIÓN DE LAS VARIABLES INDEPENDIENTES.....	36
5.1.1. Áridos	36
5.1.2. Espuma Preformada	39
5.1.2.1. Método de generación de espuma.....	40
5.1.2.2. Relación agente espumante/agua	41
5.1.3. Cemento	45
5.1.4. Agua	46
5.1.5. Diseño de mezcla.....	46
5.1.5. Forma de Ensayo	54
5.2. <i>Caracterización de las Variables dependientes</i>	55
5.2.1. Resistencia a la compresión	55
6. HIPÓTESIS.....	55
7. MARCO METODOLÓGICO.....	55
7.1. <i>Diseño experimental</i>	55
7.2. <i>Análisis de datos</i>	56
7.3. <i>Proceso de elaboración</i>	57
7.4. <i>Dosificaciones de concreto de celular</i>	57
7.4.1. Diseño de mezcla 1.....	58
7.4.1. Diseño de mezcla 2.....	59
7.4.1. Diseño de mezcla 3.....	60
7.4.1. Correcciones en las dosificaciones	61
7.4.2. Preparado de las probetas	65
7.4.3. Ensayo a compresión.....	66
8. POBLACIÓN Y MUESTRAS	67
9. DESCRIPCIÓN DE LOS DATOS PRODUCIDOS.....	68
10. PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS	68
10.1. <i>Ensayos cilindros</i>	68
10.2. <i>Ensayos Bloques</i>	71
11. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	73
11.1. <i>Ecuación de la curva</i>	74
11.2. <i>Validación de la curva</i>	78
11.3. <i>Costo de elaboración</i>	78
11.4. <i>Comparativa costos de bloques</i>	79
12. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	79
13. CONCLUSIONES	80
14. BIBLIOGRAFÍA	82

Índice De Gráficos

Imagen 1: Materiales De Construcción Utilizados En El Ecuador	11
Imagen 2: Clasificación De Concretos Ligeros	17
Imagen 3 : Estructura Interna Del Concreto Celular	19
Imagen 4: Estructura Interna De Concreto Celular Con Peróxido De Hidrogeno Y Espuma Preformada	25
Imagen 5: Proceso De Formación De Concreto Celular Con Espuma Preformada	26
Imagen 6: Proceso De Formación Del Mortero	26
Imagen 7: Aditivo Y Proceso De Formación De La Espuma	27
Imagen 8: Concreto Celular	27
Imagen 9: Agregado Fino Utilizado	36
Imagen 10: Curva Granulométrica	38
Imagen 11: Concreto Celular Con Espuma Inestable	39
Imagen 12: Mezcladora Y Paleta Utilizada	40
Imagen 13: Espuma Preformada	41
Imagen 14: Curva Densidad-Aditivo	43
Imagen 15: Curva De La Densidad Con Respecto Al Tiempo	45
Imagen 16: Sedimentación Del Material	53
Imagen 17: Efecto Del Agua Interna Al Realizar Compresión	54
Imagen 18: Cilindros Aun Con Humedad Interna	55
Imagen 19: Probetas De Concreto Celular	65
Imagen 20: Curado De Las Probetas	66
Imagen 21: Ensayo A Compresión De Las Probetas	67
Imagen 22: Grafica De La Resistencia A La Compresión En Cilindros A Los 7 Día	69
Imagen 23: Grafica De La Resistencia A La Compresión En Cilindros A Los 14 Días	70
Imagen 24: Grafica De La Resistencia A La Compresión En Cilindros A Los 14 Días	70
Imagen 25: Grafica De La Resistencia A La Compresión En Bloques A Los 7 Días	71
Imagen 26: Grafica De La Resistencia A La Compresión En Bloques A Los 14 Días	72
Imagen 27: Grafica De La Resistencia A La Compresión En Bloques A Los 28 Días	72
Imagen 28: Sistema Lineal De Ecuaciones Mínimos Cuadrados	74

Índice De Tablas

tabla 1: Norma Aplicadas Al Agregado Fino.....	20
Tabla 2: Granulometría De Mortero	21
Tabla 3: Porcentajes De Partículas Perjudiciales En El Árido Fino	22
Tabla 4: Colorimetría Para Determinar Sustancias Orgánicas.....	22
Tabla 5: Composición Y Propiedades Del Concreto Celular	28
Tabla 6: Conductividad Térmica De Concreto Celular Seco Al Horno.....	29
Tabla 7: Conductividad Térmica De Concreto Celular Seco Al Horno.....	33
Tabla 8: Normas Necesarias Para Realizar Ensayos A La Compresión	34
Tabla 9: Granulometría Del Agregado Fino Procedente Del Rio Jubones.....	37
Tabla 10: Porcentajes Pasantes De La Arena Con Sus Limites	37
Tabla 11: Ensayos Realizados Al Agregado Fino	38
Tabla 12: Propiedades Del Agregado Fino	39
Tabla 13: Prueba De Espuma Para Determinar La Cantidad De Agua	42
Tabla 14: Pruebas De Cantidad De Aditivo Para No Generar Residuos	43
Tabla 15: Prueba De Espuma Con Respecto Al Tiempo.....	44
Tabla 16: Composición Química Cemento Guapan	46
Tabla 17: Composición Y Propiedades Del Concreto Celular	48
Tabla 18: Diseño En Seco Para 1m ³ De Concreto Celular	51
Tabla 19: Diseño En Saturado Superficialmente Seco	52
Tabla 20: Diseño Y Dosificación De La Mezcla 1	58
Tabla 21: Diseño Y Dosificación De La Mezcla 2	59
Tabla 22: Diseño Y Dosificación De La Mezcla 3	60
Tabla 23: Correcciones De La Mezcla 1.....	62
Tabla 24: Correcciones De La Mezcla 2.....	63
Tabla 25: Correcciones De La Mezcla 3.....	64
Tabla 26: Muestras De Concreto Celular	68
Tabla 27: Resultados De La Resistencia A La Compresión En Cilindros A Los 7 Días.....	69
Tabla 28: Resultados De La Resistencia A La Compresión En Cilindros A Los 14 Días.....	69
Tabla 29: Resultados De La Resistencia A La Compresión En Cilindros A Los 28 Días.....	70
Tabla 30: Resultados De La Resistencia A La Compresión En Bloques A Los 7 Días.....	71
Tabla 31: Resultados De La Resistencia A La Compresión En Bloques A Los 14 Días.....	71

Tabla 32: Resultados De La Resistencia A La Compresión En Bloques A Los 28 Días	72
Tabla 33: Datos Para Concreto Celular De 2 Mpa	75
Tabla 34: Diseño De Mezcla De Concreto Celular Para Una Densidad De 937 Kg/M3.....	76
Tabla 35: Corrección De Mezcla De Concreto Celular	77
Tabla 36: Resultados De La Resistencia A La Compresión De La Mezcla Optimizada	78
Tabla 37: Valor De Los Materiales	78
Tabla 38: Valor De Los Materiales Para 1 M3 De Concreto Celular.....	78
Tabla 39: Valor De Los Materiales Para Producir 1 Bloque De Concreto Celular	79
Tabla 40: Comparativa De Precios De Bloques De Construcción	79

Índice De Ecuaciones

Ecuación 1: Formula De La Densidad En Estado Fresco	29
Ecuación 2: Relación Arena Cemento	29
Ecuación 3: Cantidad De Cemento	29
Ecuación 4: Cantidad De Agua Y Arena.....	30
Ecuación 5: Método De Volúmenes Absolutos	30
Ecuación 6: Porcentaje De Vacíos.....	30
Ecuación 7: Volumen De Espuma	31
Ecuación 8: Modulo De Elasticidad	34
Ecuación 9: Cantidades Necesarias Para Hacer 1 M3 De Concreto Celular.....	49
Ecuación 10: Relaciones Agua/Cemento Y Arena/Cemento.....	49
Ecuación 11: Ecuación Con 2 Incógnitas	49
Ecuación 12: Volumen Para Hacer 1m3 De Concreto Celular.....	49
Ecuación 13: Ecuación Con Dos Incógnitas	50
Ecuación 14: Dos Ecuaciones Con Dos Incógnitas.....	50
Ecuación 15: Humedad Del Árido.....	51
Ecuación 16: Corrección Del Agua Humedad Mayor Que Absorción.....	51
Ecuación 17: Arena Ajustada.....	52
Ecuación 18: Agua Corregida Cuando La Humedad Es Menor Que La Absorción	52
Ecuación 19: Densidad Del Concreto Celular	52
Ecuación 20: Volumen Real De Concreto Celular.....	52
Ecuación 21: Sistema De Ecuaciones Calculado	74
Ecuación 22: Ecuación De La Curva	75

Diseño De Mezcla De Concreto Celular Para Bloques En Tabiquería Con Una Resistencia De 2 Mpa.

1. Planteamiento del Problema

En el contexto de la construcción de edificaciones en Ecuador, la utilización generalizada de bloques de hormigón en tabiquería ha generado inquietudes significativas. Estos bloques, aunque son tradicionales y muy usados, incrementan notablemente la carga muerta de las estructuras. Este aumento de carga requiere ajustar el tamaño de elementos estructurales fundamentales como cimentaciones, vigas y columnas, lo que implica no solo un aumento en los materiales necesarios, sino también en los costos de construcción e ingeniería estructural.

Las Estadísticas de Edificaciones (ESED) proporcionadas por el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC) para el año 2023 abordan en detalle esta problemática en Ecuador. Con 30.896 edificaciones y 41.742 viviendas construidas, y la emisión de más de 22.000 permisos de construcción. El censo resalta la dependencia del hormigón en la tabiquería, sobre todo en el uso de bloques, con variaciones porcentuales en distintas regiones, indicando una tendencia nacional hacia el uso de bloques en tabiquería. Sin embargo, existen alternativas en el mercado nacional que intentan solucionar el problema del peso ocasionado por tabiquería en la construcción, con el uso de bloques aligerados, planchas de yeso y planchas de fibrocemento, dentro de este objetivo, el concreto celular, es una alternativa a ser considerada por sus propiedades de aislamiento térmico, acústico y su ligereza, enfrentando el reto de cumplir con los estándares de resistencia a la compresión.

Esta limitación es fundamental, especialmente considerando que los bloques de tabiquería, aunque no son estructurales, deben cumplir con ciertos criterios de resistencia para asegurar la

seguridad y la integridad de las edificaciones. La normativa ecuatoriana NTE INEN 3066, establece estándares para los bloques de concreto, incluyendo aquellos usados en la tabiquería. Estos estándares garantizan que incluso los elementos no estructurales contribuyan a la estabilidad general de la estructura.

Dado este contexto, esta tesis enfrenta un desafío técnico y normativo, desarrollar una mezcla de concreto celular que no solo reduzca el peso de los bloques en tabiquería, sino que también deban tener una resistencia a la compresión mínima de 2 MPa. Este desarrollo no solo alinearía las prácticas constructivas con las normativas vigentes, sino que también representaría un paso hacia la construcción más eficiente y sostenible. Este enfoque podría transformar la industria de la construcción en Ecuador, ofreciendo una solución que equilibra las necesidades de resistencia y sostenibilidad, a la vez que reduce los costos estructurales y promueve la innovación en materiales de construcción.

1.1. Antecedentes

En el artículo de Panesar (2013) se explica la composición del concreto celular, y como éste usualmente tiene entre un 10 -70 % de aire lo que hace que este tipo de concreto sea mucho más liviano que el hormigón, sin embargo, este aire se encuentra en la mezcla en forma de burbujas y una vez que se solidificó adquiere una apariencia porosa, esto influye de gran manera en su resistencia a la compresión, en su artículo también explica que el concreto celular cambia sus propiedades dependiendo del tipo de espuma, y la cantidad que se le agrega a la mezcla, lo que de cierta manera nos podría permitir crear un tipo de hormigón con una buena resistencia que tendría una función en la parte estructural manteniendo esta ligereza propia del concreto celular. “Los principales resultados revelaron que el hormigón celular tiene un buen potencial para ser utilizado

en aplicaciones estructurales ligeras debido a su evolución de las propiedades mecánicas, propiedades de transporte y resistencia térmica, pero es muy sensible al tipo de agente espumante que se utilice.” (Panesar, 2013) (Traducción al español) .

La revisión realizada por Chica & Alzate (2019) presenta los aspectos de los materiales para la producción de concreto celular, así como las distintas dosificaciones que permitan alcanzar buenas propiedades tanto físicas como mecánicas, y como el uso del concreto celular ha aumentado en los últimos años debido a su relación resistencia/peso.

Tiong-Huan Wee (2006) habla de cómo no necesariamente el aumento de contenido de aire, aumenta el tamaño de poros en el concreto, sino de que este aumento de contenido de aire, incrementa la cantidad de poros por unidad de volumen, y esto a su vez incrementa la resistencia a la compresión, es decir que el concreto en lugar de tener celdas más grandes tendrá mayor cantidad de celdas y de menor tamaño, de esta manera mantendrá una estructura interna ordenada de celdas o poros, de ahí obtiene el nombre de concreto celular.

Las propiedades del concreto celular varían dependiendo de la estructura de los poros y como esta influye en la capacidad de soporte, como se mencionaba anteriormente en las propiedades generales, la baja densidad, las propiedades acústicas y térmicas, todas presentes en el concreto celular son adquiridas por su aspecto poroso y las burbujas de aire que se encuentran en estas, pero todo esto a su vez son una desventaja para otro tipo de propiedades mecánicas como demuestra Fang et al. (2022).

Los bloques con concreto celular se han hecho muy populares, no obstante, se debe de tomar en cuenta que las propiedades varían dependiendo de su forma de elaboración. Bhosale et al. (2020) menciona en su artículo que se deben realizar evaluaciones de los bloques para verificar

que cumpla con buenas propiedades mecánicas y físicas, esto es importante porque, así como en el hormigón un cambio en su dosificación, produce mayor o menor resistencia, el concreto celular es igual, cambia sus propiedades dependiendo de las dosificaciones, el tipo y la cantidad de espuma que se le agrega.

2. Justificación y relevancia

En el ámbito de la construcción, la mampostería desempeña un papel esencial, donde la búsqueda constante de eficiencia y sostenibilidad es una característica destacada. Este trabajo se enfoca en el concreto celular, un material distinguido por su baja densidad y excelentes propiedades de aislamiento, convirtiéndose en un componente innovador para la fabricación de bloques de mampostería no estructural. Debido a su naturaleza porosa, su uso en estructuras de carga es limitado; sin embargo, en la mampostería, el concreto celular emerge como una alternativa prometedora en la construcción moderna, combinando los beneficios de la ligereza con la resistencia necesaria.

La utilización de bloques de concretos prefabricados, son utilizados en una variedad de aplicaciones constructivas, entre los cuales tenemos la mampostería. El hormigón, uno de los materiales más utilizados a nivel mundial, está compuesto de cemento, agregados finos, gruesos, agua y, en ocasiones, aditivos; Ante este escenario, el concreto celular representa una solución innovadora. Compuesto por agua, cemento, árido fino y espuma, este concreto crea vacíos en la mezcla, resultando en una estructura porosa que, aunque no es adecuada para soportar cargas excesivas, ofrece ventajas significativas en aplicaciones no estructurales.

El uso generalizado de bloques de hormigón en la construcción ejerce un impacto directo en la economía y la eficiencia del sector de la construcción en Ecuador. Los datos proporcionados del INEC indican que una parte importante de las edificaciones en Ecuador utiliza bloques de hormigón en paredes, subrayando la importancia y el alcance de este problema en el sector. De acuerdo con los datos recogidos en este censo, los porcentajes de estructuras que utilizan bloques de hormigón en Ecuador son 60.7% en la Amazonía, 81.7% en la Costa, 94.5% en la región Insular y 16.0% en la Sierra.

Imagen 1: Materiales de construcción utilizados en el Ecuador



Fuente: Instituto nacional de estadística y censos – Estadísticas de edificaciones (ESED 2023).

El estudio que se propone se centrará en la República del Ecuador, realizando un análisis de las diferentes regiones del país, cada una con prácticas constructivas únicas y específicas. La

diversidad geográfica del Ecuador, que incluye la costa, sierra, Amazonía y la región insular, presenta un amplio espectro de estilos y métodos de construcción. Esta diversidad regional tiene un impacto significativo en la selección de materiales y técnicas de construcción, lo que hace imprescindible un enfoque adaptado a cada contexto. Por ejemplo, la elección de materiales en la región costera puede verse influenciada por factores como la humedad y la salinidad, mientras que, en la sierra, elementos como la temperatura y la topografía juegan un papel crucial.

El enfoque sectorial del estudio se centra en la construcción, con un énfasis especial en la producción y uso de bloques para tabiquería. Esta área es crucial debido al uso extensivo de bloques de hormigón en la construcción ecuatoriana y su impacto en la eficiencia, coste y sostenibilidad de las edificaciones. Esta investigación estudia el concreto celular, como alternativa a los bloques de hormigón, con el objeto de mejorar los materiales de construcción en el entorno ecuatoriano.

El estudio se basará en las normas establecidas, requerimientos y datos proporcionados por los organismos gubernamentales del Ecuador, como el Servicio Ecuatoriano De Normalización (INEN) y el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC).

Además, la investigación se apoyará en directrices y normas internacionales, como las del American Concrete Institute (ACI). El ACI es reconocido globalmente por su experiencia en el campo del hormigón, ofreciendo una perspectiva valiosa en cuanto a estándares de calidad, seguridad y sostenibilidad. La incorporación de estas directrices asegurará que la investigación y sus recomendaciones estén alineadas con las mejores prácticas internacionales, fomentando así una construcción más innovadora y sostenible.

La combinación de enfoques, tanto local como internacional, proporciona una base sólida para el estudio, asegurando que los resultados sean relevantes, aplicables y beneficiosos para el sector de la construcción en Ecuador y, potencialmente, en otras regiones con desafíos similares.

La investigación actual tiene como objetivo desarrollar una mezcla de concreto celular que logre una resistencia mínima de 2 MPa, manteniendo al mismo tiempo una baja densidad. Se investigará su diseño, dosificaciones y propiedades mecánicas, con un enfoque en la optimización de su uso en construcciones ligeras. A pesar de las limitaciones estructurales inherentes a su porosidad y baja densidad, el concreto celular sobresale por sus propiedades aislantes, tanto térmicas como acústicas, y su menor peso en comparación con el hormigón. Este avance representa una posible solución para disminuir la carga muerta en las estructuras y, consecuentemente, reducir los costos asociados con la construcción. Este trabajo se centra en la optimización de recursos en el sector de la construcción, beneficiando tanto a constructores como a propietarios de edificaciones.

3. Objetivos

3.1. Objetivo general

Desarrollar una mezcla de concreto celular que cumpla con una resistencia mínima de 2 MPa, para ser utilizada en la fabricación de bloques destinados a la construcción de tabiques, garantizando sus propiedades físicas y mecánicas.

3.2. Objetivos Específicos

- Obtener las distintas propiedades de los materiales necesarios para la elaboración de concreto celular.

- Optimizar los materiales, para su empleo en la elaboración de concreto celular.
- Analizar las dosificaciones para obtener concreto celular considerando las propiedades de los materiales.
- Analizar y optimizar los resultados obtenidos de los ensayos realizados en el concreto celular.

4. Marco teórico

4.1. Concreto Celular

El concreto celular, conocido también como concreto aireado, representa una forma ligera de mortero que resulta de mezclar cemento Portland y arena con agua para formar una pasta uniforme. A esta combinación se añade un agente espumante, el cual induce la creación de una estructura celular, tal como se detalla en la ACI 523.2R-96. La singularidad de esta estructura proviene de los poros microscópicos generados por la liberación de gases durante la reacción química del agente espumante. Este agente tiene como fin la incorporación de burbujas de aire distribuidas de manera uniforme en la mezcla, que, al solidificarse, crean los vacíos característicos del concreto celular.

Este material ha ganado popularidad en el sector de la construcción en otros países debido a sus propiedades que producen múltiples beneficios. En contraste con el hormigón, el concreto celular se distingue por su baja densidad y la presencia de incontables células de aire repartidas uniformemente en su estructura. Estas micro células de aire dotan al concreto celular de propiedades mecánicas, térmicas y acústicas, al mismo tiempo que mantienen su ligereza, convirtiéndolo en un material de construcción versátil y eficiente.

4.2. Historia del concreto celular

El concreto aligerado, una innovación significativa en el campo de la construcción, fue presentado por primera vez en 1920. La creación de este material, conocido como concreto celular, se remonta a 1923 y se atribuye al arquitecto J. Axel Erikson, cuyo hallazgo fue bastante inesperado. Mientras Erikson intentaba acelerar el proceso de curado de unas muestras de concreto, decidió colocarlas en una autoclave. El resultado fue sorprendente: una masa porosa con una textura y apariencia que recordaba a la roca volcánica, marcando así un hito importante en la historia del material.

Para el año 1930, el concreto aireado empezó a ganar reconocimiento como un material de construcción relevante, particularmente en Suecia, donde se utilizó eficazmente como sustituto del ladrillo en viviendas y otras edificaciones. Con el tiempo, este tipo de concreto comenzó a cobrar mayor importancia a nivel mundial. En 1938, la Unión Soviética lo adoptó para uso en elementos no estructurales, lo que impulsó un notable aumento en la popularidad y aplicación del concreto celular en distintas áreas de la construcción.

La investigación científica desempeñó un rol crucial en la evolución del concreto celular, empezando en 1954 con estudios orientados a comprender y mejorar sus propiedades. Estas investigaciones allanaron el camino para avances significativos en la resistencia, consistencia y durabilidad del material, redefiniendo su uso y aplicaciones en la construcción moderna.

Desde 1970, el concreto celular se expandió en su uso en infraestructuras viales, como subrasante y material de relleno. Esta expansión fue particularmente notable en varios países desarrollados, como se menciona en el artículo de Amran et al. Estos usos demostraron la versatilidad y eficacia del concreto celular en una amplia gama de aplicaciones de construcción.

Con el avance de los años y la continua investigación en tecnología del hormigón, se han logrado mejoras sustanciales en las características del concreto celular. Hoy en día, contamos con estudios avanzados que facilitan el desarrollo de nuevos métodos constructivos, respondiendo así a las crecientes exigencias en la construcción de estructuras y obras diversas. El concreto celular, con su evolución a lo largo del tiempo, se ha establecido como un componente clave en la construcción moderna, ofreciendo soluciones innovadoras y sostenibles para la industria.

4.3. Tipos de concreto Alivianado

El hormigón alivianado se caracteriza por tener una densidad significativamente menor que la del hormigón, generalmente variando entre 400 kg/m^3 y 2000 kg/m^3 . Esta disminución en la densidad no solo implica un cambio en el peso del concreto, sino que también afecta otras propiedades y aplicaciones del material. Sánchez de Guzmán profundiza en la clasificación de los concretos ligeros, identificando tres categorías principales: concretos con agregados ligeros, concreto celular y concreto ligero sin finos. (Sánchez de Guzmán, 2001)

4.3.1. Concretos con Agregados Ligeros

Esta categoría utiliza agregados de bajo densidad. Estos agregados pueden ser naturales, como la pumita, o manufacturados, como la arcilla expandida. La principal ventaja de estos hormigones es su menor densidad comparada con los hormigones convencionales, lo que resulta en estructuras más ligeras y reduce la carga sobre los cimientos.

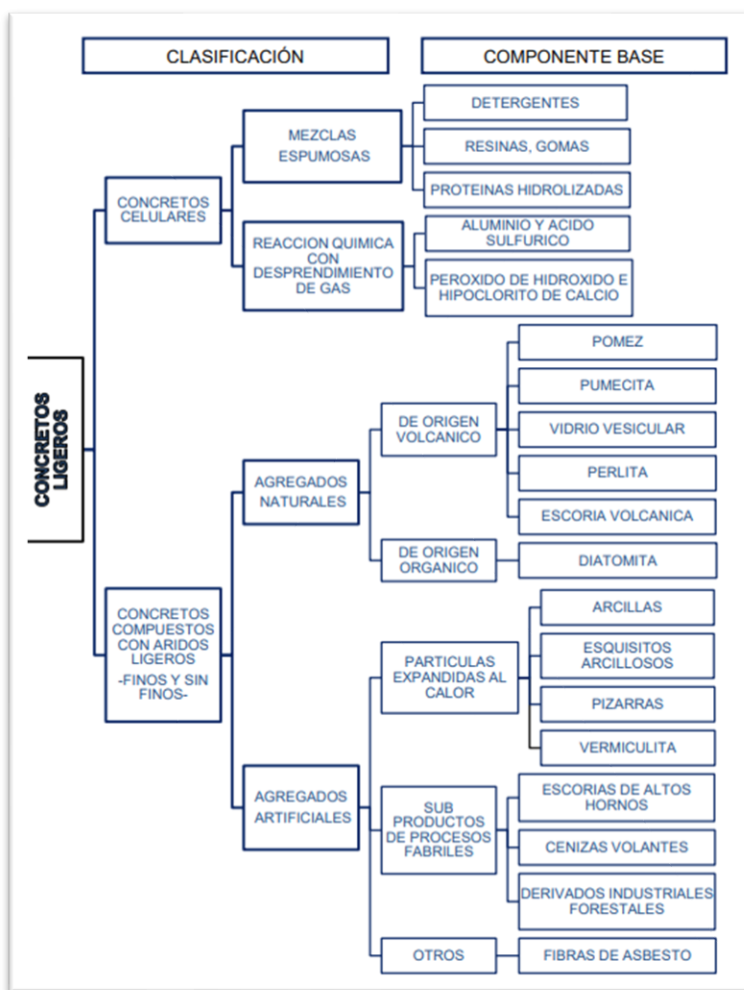
4.3.2. Concreto Ligero sin Finos

En esta categoría, se omite el uso de agregados finos en la mezcla, lo que resulta en un concreto con porosidad interna más alta y, por ende, una densidad más baja. Este tipo de concreto

es útil en aplicaciones donde la reducción del peso es crucial, pero se debe manejar cuidadosamente para asegurar la cohesión y resistencia adecuada del material.

Cada uno de estos tipos de concreto ligero posee características y aplicaciones específicas, ofreciendo soluciones innovadoras para desafíos particulares en el campo de la construcción, desde la reducción de la carga estructural hasta la mejora en la eficiencia energética y acústica, los concretos ligeros representan un avance significativo en la tecnología de materiales de construcción.

Imagen 2: Clasificación de concretos ligeros



FUENTE: MORALES, BERNARDO.

4.3.3. Concreto Celular

Se caracteriza por la inclusión intencional de aire en forma de burbujas. Este aire se introduce mediante el uso de agentes espumantes que reaccionan químicamente durante el proceso de mezclado, formando una matriz porosa. El concreto celular no solo es ligero, sino que también ofrece excelentes propiedades de aislamiento térmico y acústico.

4.3.3.1 Tipos de concreto celular

Existen varios métodos para la elaboración de concreto celular, siendo estos métodos: por desprendimiento gaseoso y por incorporación de agentes espumantes.

4.3.3.2 Hormigón celular por incorporación de gases.

El hormigón celular por incorporación de gases se produce introduciendo gases en la mezcla de hormigón, generalmente a través de reacciones químicas. Estas reacciones se generan al mezclar ciertos compuestos químicos con los componentes básicos del hormigón, como el cemento, agua, áridos gruesos y finos.

4.3.3.3. Hormigón celular por Incorporación de Agentes Químicos

Para inducir la formación de gas, se añaden agentes químicos a la mezcla de hormigón. Estos agentes pueden incluir compuestos como ácido clorhídrico con bicarbonato de sodio, cloruro de cal con agua oxigenada, o carburo de calcio con agua. Estos reactivos generan gases como dióxido de carbono, oxígeno o acetileno, cuando estos compuestos químicos entran en contacto con el agua de la mezcla, se produce una reacción química exotérmica que libera gases. Esta

reacción debe ser controlada cuidadosamente para garantizar una distribución uniforme de las burbujas de gas dentro de la mezcla.

Las burbujas de gas generadas se dispersan a través de la mezcla, creando una estructura porosa en el hormigón. La cantidad y tamaño de las burbujas pueden ser controladas ajustando la cantidad y tipo de agentes químicos utilizados, así como las condiciones de mezcla.

4.3.3.4. Hormigón Celular por incorporación de agentes espumantes

La creación de poros en el hormigón se logra mediante la adición de un agente espumante a la mezcla. Este agente, al ser agitado, produce una espuma compuesta por burbujas de aire. Durante el proceso de endurecimiento del hormigón, estas burbujas quedan encapsuladas, formando micro células aisladas unas de otras. Aunque cualquier producto espumógeno es potencialmente apto para este propósito, la interacción del agua y el proceso de mezcla puede reducir la tensión superficial, provocando la ruptura de las burbujas.

Imagen 3 : Estructura interna del concreto celular



Fuente: Autor

4.4. Composición Del Concreto Celular

4.4.1. Cemento.

Como material aglomerante para la elaboración de concreto celular se utilizará el cemento, debe de cumplir con los requisitos de la NTE INEN 152 (Cemento Portland. Requisitos), NTE INEN 490 y la NTE INEN 2380.

4.4.2. Agregado fino

Uno de los materiales para la elaboración de concreto celular como se mencionó anteriormente es el agregado fino, el agregado también debe de cumplir con los requisitos de la norma NTE INEN 2536 , todas las normas aplicadas se encuentran descritos en la tabla 1.

Tabla 1: Norma aplicadas al agregado fino

Norma	Título
NTE INEN 2536	ÁRIDOS PARA USO EN MORTEROS PARA MAMPOSTERÍA. REQUISITOS
NTE INEN 697	ÁRIDOS. DETERMINACIÓN DEL MATERIAL MÁS FINOS QUE PASA EL TAMIZ CON ABERTURAS DE 75 μm (No. 200), MEDIANTE LAVADO
NTE INEN 698	ÁRIDOS PARA HORMIGÓN. DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE TERRONES DE ARCILLA Y PARTÍCULAS DESMENUZABLES
NTE INEN 855	ÁRIDOS. DETERMINACIÓN DE LAS IMPUREZAS ORGÁNICAS EN EL ÁRIDO FINO PARA HORMIGÓN
NTE INEN 856	ÁRIDOS. DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD, DENSIDAD RELATIVA (GRAVEDAD ESPECÍFICA) Y ABSORCIÓN DEL ÁRIDO FINO
NTE INEN 862	ÁRIDOS PARA HORMIGÓN. DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO TOTAL DE HUMEDAD

Fuente: Autor

4.4.2.1. Áridos para uso en morteros.

Dentro de la normativa para el uso de áridos en la elaboración de mortero hay ciertos requisitos que se deben de realizar, como la granulometría, contenido de materia orgánica , cantidad de materiales que pasan el tamiz No 200.

4.4.2.2. Granulometría para morteros . Los morteros al tener distinta composición que el hormigón, tienen una gradación distinta. La granulometría es el análisis y medición de la distribución del tamaño de las partículas en un material granular, como el suelo, los agregados para la construcción, la arena, entre otros. Este análisis se realiza para determinar la proporción de diferentes tamaños de partículas presentes en una muestra y se expresa generalmente en forma de un gráfico o una tabla.

Tabla 2: Granulometría de mortero

Tamiz	Porcentaje pasante	
	Arena natural	Arena elaborada
4,75 mm (No. 4)	100	100
2,36 mm (No. 8)	95 a 100	95 a 100
1,18 mm (No. 16)	70 a 100	70 a 100
600 μm (No. 30)	40 a 75	40 a 75
300 μm (No. 50)	10 a 35	20 a 40
150 μm (No. 100)	2 a 15	10 a 25
75 μm (No. 200)	0 a 5	0 a 10

Fuente: NTE INEN 2536

4.4.2.3. Sustancias Perjudiciales.

Los áridos para el uso a mortero no deben de exceder los valores indicados en la tabla 3 de la NTE INEN 2536.

Tabla 3: Porcentajes de partículas perjudiciales en el árido fino

Material	Porcentaje máximo permisible en masa
Partículas desmenuzables	1,0
Partículas livianas, flotantes en un líquido que tenga una gravedad específica de 2,0	0,5 ^A
^A Este requisito no es aplicable para el árido de escoria de altos hornos	

Fuente: NTE INEN 2536

4.4.2.4. Impurezas orgánicas

Los áridos utilizados en la elaboración de morteros tienen que estar libres de impurezas orgánicas, compuesto perjudicial en el hormigón y que puede afectar la resistencia, todo árido debe cumplir lo dispuesto en la NTE INEN 855 y debe de ser comprobado que no afecte la resistencia en el mortero, descrito en la NTE INEN 866.

Tabla 4: Colorimetría para determinar sustancias orgánicas

Color normalizado escala de Gardner No.	Número de orden en el comparador
5	1
8	2
11	3 (normalizado de referencia)
14	4
16	5

NOTA. Se debe utilizar el procedimiento de comparación descrito en el numeral 5.7.1, excepto que se debe reportar el número del vidrio del comparador que es más cercano al color del líquido que sobrenada sobre la muestra de ensayo. Cuando se utiliza este procedimiento, no es necesario preparar la solución de color normalizado.

Fuente: NTE INEN 855

4.4.2.5. Propiedades del agregado fino.

Para el diseño de hormigón es muy importante conocer las densidades que este tiene, así como su absorción y humedad, para esto se debe de realizar los ensayos descritos en las normas NTE INEN 856 y NTE INEN 862,

4.4.3. Agua

El agua para la elaboración de concreto celular debe de ser agua potable que no contenga contaminantes como, aceites, sales, ácidos y materia orgánica. Estos suelen afectar en la reacción química que realiza el concreto, afectando en las propiedades físicas y químicas de hormigón de acuerdo a la NTE INEN 2617.

4.4.4. Espuma Preformada

La espuma preformada es creada mediante el uso de un agente espumante diluido en agua, en ciertas proporciones, la espuma preformada es lo que permite que la mezcla obtenga su forma de celda, en la ACI 523.3R-14 (Guía de concretos celulares mayores a 800 kg/m³) recomienda trabajar con espumas con una densidad de 32-80 kg/m³, para obtener estas densidades se vierte la mezcla del agente espumante diluida en las proporciones recomendadas por el fabricante , en un generados de espuma, así se asegura de producir y mantener celdas estables durante el proceso de elaboración y curado del concreto celular, las compañías encargadas de producir este agente espumante para la formación de espuma preformada deben de cumplir con la norma ASTM C796 / C796M (Método estándar para el uso de agentes espumantes en la producción de concreto celular usando espuma preformada) y la ASTM C869 / C869M (Especificaciones para el uso de espuma preformada en la elaboración de concreto celular). Las normas antes mencionadas nos especifican los requerimientos en la espuma para la elaboración de concreto celular usando maquina generadora de espuma.

Para la obtención de la espuma preformada el método más recomendable es el que se menciona en la ACI 523.3R-14 (Guía de concretos celulares mayores a 800 kg/m³), pero se puede obtener la espuma de otras formas, como el batido mecánico, en donde mediante el uso de una

hélíce al revolucionar la mezcla del agua con el agente espumante se obtiene una espuma estable de buena consistencia. Otro método consiste del uso de una compresora de aire para generar una espuma que luego se le agregará a la mezcla en estado fresco, lo que generará la formación de burbujas de aire. Método mencionado en el trabajo de Ramamurthy et al (2009).

4.4.5. Agentes espumantes

La principal función de los agentes espumantes es formar la espuma al mezclarlos con agua, así de esta forma incorpora aire a la mezcla. Los principales agentes espumantes son:

- Industriales
- Detergentes y agentes humectantes
- Proteínas hidrolizadas

Las ventajas de elaborar concreto celular con agentes espumantes es que de esta manera podemos conocer la densidad, volumen y consistencia de la espuma, datos importantes que no se obtuviesen si se realiza concreto celular mediante formación de gases, como menciona Yoc, (2018). Nos muestra la distribución de los poros en concretos celulares uno con peróxido de hidróxido y el otro con espuma preformada. En la *imagen 4* se puede apreciar cómo es la parte interna del concreto celular, están con un aumento de 14X en el microscopio, la imagen de la izquierda corresponde a la mezcla que incluye peróxido de hidrogeno (agua oxigenada) , mientras que la derecha corresponde a la mezcla con espuma preformada.

Imagen 4: Estructura interna de concreto celular con peróxido de hidrogeno y Espuma preformada

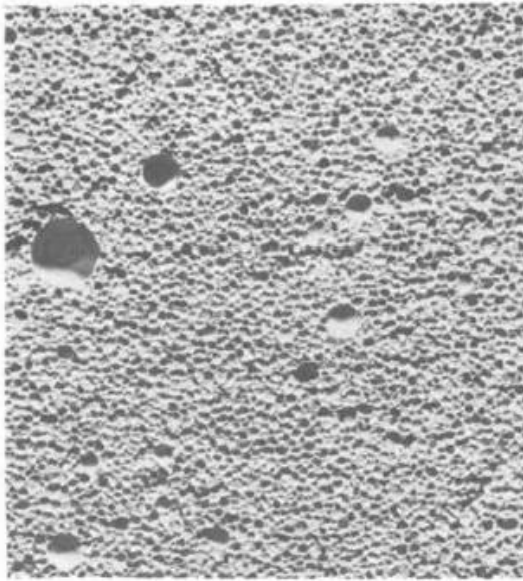


Fig. 12 - Experimental cellular concrete made by hydrogen peroxide process (14X).

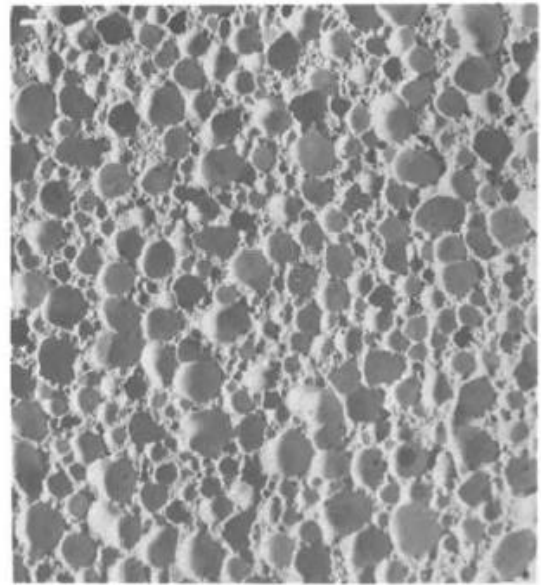


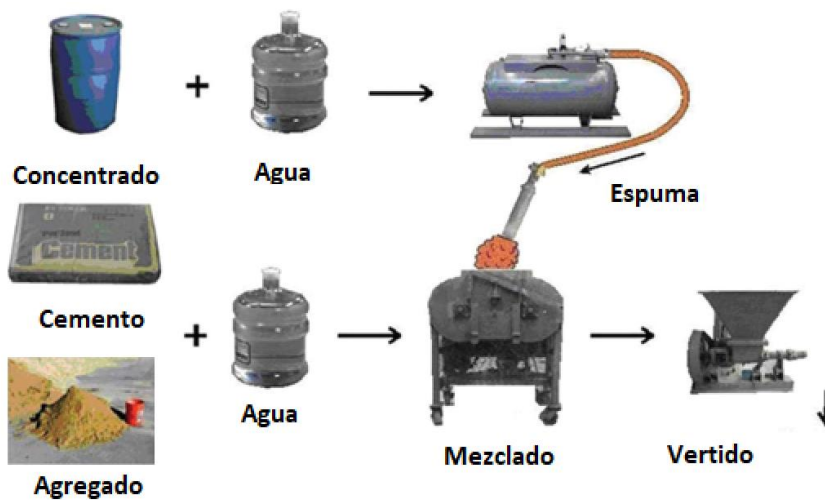
Fig. 13 - Experimental cellular concrete made by prefoam process (14X).

Fuente: Building Research institute. Structural foams. 1961

4.5. Proceso de Formación

Preparación de la Mezcla Base: Se inicia con una mezcla básica de cemento, agua y agregados finos. La proporción de estos componentes es fundamental para determinar la calidad y las propiedades de la mezcla, se elabora un mortero al cual se le debe de agregar la espuma preformada, como se indica en la imagen 5, este proceso es para la generación de concreto celular con espuma preformada, existen aditivos espumantes los cuales se pueden agregar directamente al mortero sin la necesidad de preformar la espuma.

Imagen 5: Proceso de formación de concreto celular con espuma preformada



Fuente: ACI 523.3R-14

Adición de Agentes Espumantes: Los agentes espumantes, como surfactantes o proteínas, se añaden a la mezcla previamente elaborada. Estos compuestos actúan reduciendo la tensión superficial del agua, permitiendo la formación de burbujas de aire estables dentro de la mezcla de hormigón.

Imagen 6: Proceso de formación del mortero



Fuente: Autor

Imagen 7: Aditivo y proceso de formación de la espuma



Fuente: Autor

Imagen 8: Concreto celular



Fuente: Autor

4.6. Diseño de mezcla

Para el diseño de mezcla de este tipo de concreto se partió de la ACI 523.3R-14, en donde se especifica que es una guía para el diseño de concreto celular para hormigones con densidades mayores a 800 kg/m^3 . En la guía nos especifica que para escoger el diseño depende de que propiedad es la que necesitamos, puede ser densidad en estado fresco, resistencia a la compresión, densidad en estado seco y propiedades térmicas. Estos son los parámetros de los que depende la

dosificación que vamos a realizar. Así como todo tipo de concreto la mezcla debe de tener cantidades de material adecuadas, bajo parámetros de diseño y lotes de prueba.

4.6.1. Proporciones de la mezcla

En la ACI 523.3R-14 nos dice que los datos necesarios para empezar con el diseño es la densidad en estado fresco y la relación agua cemento, pero para obtener estos datos es necesario conocer bajo que parámetros va a ser utilizado el concreto celular, si el requerimiento principal es la resistencia a la compresión se puede partir de los datos de la tabla 5. Si el requerimiento principal es la conductividad térmica se utiliza la tabla 6.

Tabla 5: Composición y propiedades del concreto celular

As-cast density, lb/ft ³ (kg/m ³)	Sand-cement ratio	Water-cement ratio	Cement factor, lb/yd ³ (kg/m ³)	Estimated compressive strength, psi (MPa)
50 (800)	0.79	0.60	564 (335)	250 (1.7)
50 (800)	0.55	0.50	658 (390)	300 (2.1)
50 (800)	0.29	0.50	752 (446)	400 (2.8)
60 (960)	1.27	0.60	564 (335)	350 (2.4)
60 (960)	0.96	0.50	658 (390)	400 (2.8)
60 (960)	0.65	0.50	752 (446)	500 (3.5)
70 (1120)	1.75	0.60	564 (335)	450 (3.1)
70 (1120)	1.37	0.50	658 (390)	500 (3.5)
70 (1120)	1.06	0.45	752 (446)	600 (4.1)
80 (1280)	2.22	0.60	564 (335)	600 (4.1)
80 (1280)	1.78	0.50	658 (390)	650 (4.5)
80 (1280)	1.42	0.45	752 (446)	750 (4.8)
90 (1440)	2.85	0.45	564 (335)	1100 (7.6)
90 (1440)	2.19	0.50	658 (390)	1100 (7.6)
90 (1440)	1.78	0.45	752 (446)	1300 (9.0)
100 (1600)	3.18	0.60	564 (335)	1250 (8.6)
100 (1600)	2.65	0.45	658 (390)	1700 (11.7)
100 (1600)	2.14	0.45	752 (446)	1800 (12.4)
110 (1760)	3.66	0.60	564 (335)	2000 (13.8)
110 (1760)	3.06	0.45	658 (390)	2600 (17.9)
110 (1760)	2.44	0.50	752 (446)	2500 (17.2)
120 (1920)	3.32	0.60	658 (390)	3320 (22.9)
120 (1920)	2.80	0.50	752 (446)	3520 (24.3)

Fuente: McCormick 1967

Tabla 6: Conductividad térmica de concreto celular seco al horno

Oven-dry density, lb/ft ³ (kg/m ³)	Thermal conductivity <i>k</i>	
	Btu/h·ft ² ·(°F in.)	W/(m·K)
50 (800)	1.3	0.20
65 (1080)	2.1	0.30
80 (1280)	2.8	0.40
95 (1520)	4.0	0.57
110 (1760)	5.4	0.77

Fuente: ACI 523.3R-14

En caso de que el requerimiento principal sea la resistencia a la compresión, mediante la ecuación 1 se puede obtener el valor de la densidad en estado fresco.

Ecuación 1: Formula de la densidad en estado fresco

$$\gamma_f = 455 \times \ln\left(\frac{f'_c}{0.34}\right) \quad \text{Unidades SI}$$

Para el caso de la relación agua cemento se podría suponer un valor con un rango entre 0.45 y 0.6. Para el caso de la arena la ACI 523.3R-14 nos permite utilizar la ecuación 2 para determinar una relación arena/cemento (s/c).

Ecuación 2: Relación arena cemento

$$\frac{s}{c} = \frac{\gamma_f - 673}{345} \quad \text{Unidades SI}$$

Una vez definido los datos de la densidad en estado fresco, la relación agua/cemento, la relación arena/cemento se puede calcular la cantidad de cemento utilizando el método de volúmenes absolutos, la cantidad de cemento se calcula mediante la ecuación 3.

Ecuación 3: Cantidad de cemento

$$C = \gamma_f / \left(1 + \frac{W}{c} + \frac{S}{c}\right)$$

Calculado el valor de la cantidad de cemento usando las relaciones agua/cemento y la relación arena/cemento, se puede determinar la cantidad de agua y arena que se utiliza para la dosificación.

Ecuación 4: Cantidad de agua y arena

$$W = C \times w/c$$

$$S = C \times s/c$$

Una vez conociendo la cantidad de cemento, agua y arena, se suman los volúmenes absolutos de estos y obtenemos la cantidad total de sólidos para realizar 1m³ de concreto celular, el concreto no solo está formado por sólidos también tiene un porcentaje de aire, por ese motivo debemos de conocer el porcentaje de aire que se encuentra en la mezcla, aplicando el método de volúmenes absolutos.

Ecuación 5: Método de volúmenes absolutos

$$V_A = \frac{C}{G_C \times \gamma_w} + \frac{W}{\gamma_w} + \frac{S}{G_S \times \gamma_w}$$

Ecuación 6: Porcentaje de vacíos

$$A_V = 1 - V_A$$

Mediante la ecuación 6 se obtiene el porcentaje de vacíos de la mezcla, la ecuación 5 es el método de volúmenes absolutos en donde G_C es la densidad del cemento, G_S es la densidad de la arena y γ_w es la densidad del agua. Una vez conocido el volumen de aire de la mezcla de concreto,

se ocupa la ecuación 6 para determinar cuánto de este volumen de aire va a ser espuma, el volumen de espuma es calculado mediante la ecuación 7, en donde ϕ_A es el rendimiento de la espuma.

Ecuación 7: Volumen de espuma

$$V_F = A_V / \phi_A$$

La ACI 523.3R-14 recomienda que el volumen de espuma que se utiliza en la mezcla se reste del volumen de agua principal obtenido por la relación agua/cemento. También recomienda realizar lotes de prueba, en donde se puede ajustar el tema de las densidades en estado fresco, trabajabilidad, resistencia a la compresión, así también datos como la relación agua/cemento, el tipo de cemento y agregados que se utilizaron. Es recomendable realizar lotes de prueba, debido a que este tipo de concreto tiene sus variaciones, por este motivo la ACI 523.3R-14 es más una guía para la elaboración, como su propio nombre indica, esto debido a que hay muchos factores que influyen en el resultado, el tipo de espuma, el método de obtención de espuma, el cemento utilizado, la gradación del agregado y el método de mezclado. Todos los factores mencionados anteriormente influyen en el resultado final.

4.6.2. Propiedades físicas del concreto celular

4.6.2.1. Propiedades acústicas

El concreto celular presenta ventajas como aisladores de sonido, Jiménez en su artículo menciona que la efectividad del concreto celular es la pérdida de transmisión por su estructura porosa, esto en base al coeficiente de transmisión de sonido en el aire, “Dentro de la gama de materiales porosos, el concreto aireado en autoclave es el que presenta mejor rango de poros

abiertos de acuerdo al total de porosidad, que por lo general se establece en torno a un 82.1-91.5% de la masa total” (Laukaitis & Fitks, 2005)

4.6.2.2 Densidad

Hay dos tipos de densidades para el concreto celular, densidad en estado fresco y la densidad seca al horno. La ACI 523.3R-14 es aplicable para concretos celulares con densidades en estado fresco mayores a 800 kg/m³.

4.6.2.3. Densidad en estado fresco

Esta es la densidad en el momento del vertido, esta densidad se obtiene al pesar en un recipiente volumétrico el concreto y se asegura de llenar con mezcla hasta la marca de calibración. Como se mencionó anteriormente el concreto celular al ser auto nivelante y auto consolidante no hay necesidad de varillado ni de vibrado, incluso realizar estas acciones al concreto celular puede dañar completamente la estructura de la mezcla cambiando la densidad y la distribución de las celdas, por este motivo es recomendable, una vez vertido evitar el uso de vibradores y compactadores.

4.6.2.5. Densidad seca al horno

Este tipo de densidad es muy importante para determinar su conductividad térmica, el concreto celular al tener poros puede hacer que la temperatura que está en contacto con el concreto se distribuya en su interior, así también como la humedad.

4.6.2.6. Conductividad térmica

La conductividad térmica del concreto celular depende en gran parte de su densidad y de un coeficiente K, para determinar estos valores se aplicaron las normas ASTM C177 (Método de la placa caliente) y la ASTM C518 (Método del flujo de aire caliente).

Tabla 7: Conductividad térmica de concreto celular seco al horno

Oven-dry density, lb/ft ³ (kg/m ³)	Thermal conductivity <i>k</i>	
	Btu/h·ft ² ·(°F in.)	W/(m·K)
50 (800)	1.3	0.20
65 (1080)	2.1	0.30
80 (1280)	2.8	0.40
95 (1520)	4.0	0.57
110 (1760)	5.4	0.77

Fuente: ACI 523.3R-14

4.6.2.3. Trabajabilidad

El concreto celular es muy trabajable, incluso tiende a auto nivelarse debido a que la mezcla es más fluida que el hormigón, no tiene necesidad de vibración debido a que es auto consolidable, todo esto mencionado en el artículo de (Legatski, 1978).

4.6.3. Propiedades mecánicas del concreto celular

4.6.3.1. Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión del concreto celular depende de muchos factores como el tipo de cemento, propiedades de los áridos, relación agua/cemento, características de la espuma, condiciones de curado, todo esto afecta en la resistencia del hormigón celular; Por este motivo siempre se realiza lotes de prueba en donde nos aseguramos que cumplamos con la resistencia requerida. Las normas en donde nos especifica los métodos y los pasos a seguir para realizar ensayos a compresión en concreto celular están descritas en la tabla 8.

Tabla 8: Normas necesarias para realizar ensayos a la compresión

Norma	Descripcion
ASTM C513/C513M	Metodo para obtencion y prueba a la compresion de especimenes endurecidos de concreto insulado alivianado
NTE INEN 2649	Refrentado de especimenes de hormigon

Fuente: Autor

4.6.3.2. Módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad del concreto celular, es determinado como el módulo secante al 0.45 f'c, ocupando las ecuaciones de la ACI 318s-14 (Ecuación 19.2.2.1 a.).

Ecuación 8: Modulo de elasticidad

$$E_c = 0.043 * W_c^{1.5} * \sqrt{f'_c} \quad \text{Mpa}$$

4.6.4. Durabilidad

4.6.4.1. Absorción del agua

La absorción del concreto celular depende en gran medida por su densidad y la capacidad de absorción de los áridos, los poros en su interior forman celdas interconectadas en donde se encuentran vacíos los cuales permiten una gran absorción de agua, así mismo los agregados utilizados pueden retener una gran cantidad de agua, por ejemplo, en el caso de piedra pómez que es un árido muy absorbente.

4.6.4.2. Permeabilidad

Al disminuir la densidad del concreto celular y aumentar el diámetro de las celdas internas generadas por la inclusión de aire en la espuma, se puede crear un hormigón capaz de ser

permeable, esto teniendo en cuenta que disminuir la densidad y aumentar el diámetro de la celda se sacrifica en resistencia.

4.6.5. Manejo

4.6.5.1. Encofrado

Al igual que el hormigón el concreto celular al momento de vertido tiene que estar en un molde que puede ser de madera, plástico rígido, metal entre otros, dependiendo de en qué va a ser utilizado, la consistencia del concreto celular es más líquida, debido que al ser un material fluido por la presión hidrostática puede llegar a filtrarse o permitir el paso de aire que puede generar burbujas dentro del concreto, por este motivo es recomendable asegurarse de encofrar los moldes de manera que no existan aberturas, o se formen aberturas con el tiempo antes de que el hormigón este endurecido, así mismo lo recomendable es revestir el encofrado de algún agente desmoldante que nos ayude a retirar este molde.

4.6.5.2. Acabado

El concreto celular al ser autonivelante y auto consolidante no necesita de vibrado, y al tener un estado más líquido debe tener en cuenta el vertido, en este tipo de concreto se debe de evitar darle un acabado hasta que el concreto haya llegado a un punto de fraguado en donde se pueda ocupar paletas, llanas u otro tipo de herramientas.

4.6.5.3. Curado

El curado en el hormigón permite que los químicos como la sílice y el calcio se mantengan hidratados para que completen sus reacciones químicas y no pierda resistencia, también para evitar que tome el agua de la mezcla al momento del fraguado, debido a que se genera una reacción

exotérmica liberando calor y secando al hormigón, de acuerdo a la INEN 3124 (Hormigón. elaboración y curado de especímenes de ensayo en el laboratorio).

5. Variables

5.1. Caracterización de las Variables independientes

Las variables independientes son aquellas que se manipulan para observar su efecto sobre las variables dependientes

5.1.1. Áridos

Imagen 9: Agregado fino utilizado



Fuente: Autor

Los áridos que se ocuparan utilizados para la elaboración de concreto celular nos vamos a regir a lo que dice en la norma NTE INEN 2536 (Áridos para uso en morteros para mampostería. Requisitos), debido a que los límites de esta tabla son más estrictos en cuanto a los pesos retenidos en los tamices con menor abertura como se indica en la tabla 10. Esto es debido a que áridos con excesos de finos absorbe más el agua, generando fisuras, mezcla desequilibrada, disminuyendo la resistencia a la compresión y la flexibilidad del concreto.

El agregado utilizado en la investigación y cumple con la granulometría descrita en la NTE INEN 2536 (Áridos para uso en morteros para mampostería. Requisitos) fue extraída de una mina localizada en el Rio Jubones, que se encuentra en la provincia del Azuay, cerca del cantón de Santa Isabel, los resultados obtenidos aplicando la NTE INEN 696 y NTE INEN 697 son los presentados en la tabla 9.

Tabla 9: Granulometría del agregado fino procedente del rio Jubones

N	Abertura (mm)	Peso del Tamiz (g)	Tamiz + Muestra (g)	Peso retenido (g)	% Retenido	% Acumulado retenido	% Que pasa
4	4.75	443.80	447.0	3.2	0.6	0.6	99.4
8	2.36	397.70	407.2	9.5	1.7	2.3	97.7
16	1.18	371.50	465.6	94.1	17.3	19.6	80.4
30	0.60	346.40	492.6	146.2	26.8	46.4	53.6
50	0.30	320.70	421.0	100.3	18.4	64.9	35.1
100	0.15	300.70	452.2	151.5	27.8	92.7	7.3
200	0.075	298.00	313.8	15.8	2.9	95.6	4.4
Fondo	0	260.30	261.9	24.1	4.4	100	0.0
Total				544.7	100		

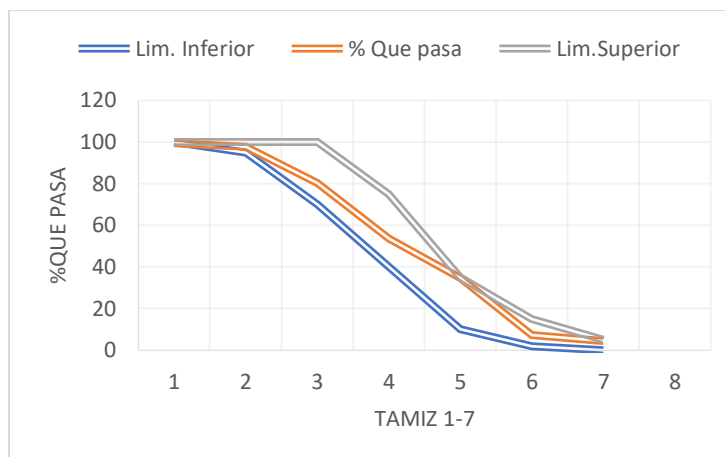
Fuente: Autor

Tabla 10: Porcentajes pasantes de la arena con sus limites

Tamiz No	mm	Lim. Inferior	% Que pasa	Lim.Superior
4	4.75	100	99	100
8	2.36	95	98	100
16	1.18	70	80	100
30	0.60	40	54	75
50	0.30	10	35	35
100	0.15	2	7	15
200	0.075	0	4	5

Fuente: Autor

Imagen 10: Curva Granulométrica



Fuente: Autor

Para verificar si el árido es apto para su uso en concreto celular se realizaron los ensayos en la tabla 11.

Tabla 11: Ensayos realizados al agregado fino

Norma	Título
NTE INEN 2536	ÁRIDOS PARA USO EN MORTEROS PARA MAMPOSTERÍA. REQUISITOS
NTE INEN 697	ÁRIDOS. DETERMINACIÓN DEL MATERIAL MÁS FINOS QUE PASA EL TAMIZ CON ABERTURAS DE 75 μm (No. 200), MEDIANTE LAVADO
NTE INEN 855	ÁRIDOS. DETERMINACIÓN DE LAS IMPUREZAS ORGÁNICAS EN EL ÁRIDO FINO PARA HORMIGÓN
NTE INEN 856	ÁRIDOS. DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD, DENSIDAD RELATIVA (GRAVEDAD ESPECÍFICA) Y ABSORCIÓN DEL ÁRIDO FINO
NTE INEN 862	ÁRIDOS PARA HORMIGÓN. DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO TOTAL DE HUMEDAD

Fuente: Autor

Los resultados obtenidos luego de realizar los ensayos correspondientes son los descritos en la tabla 12.

Tabla 12: Propiedades del agregado fino

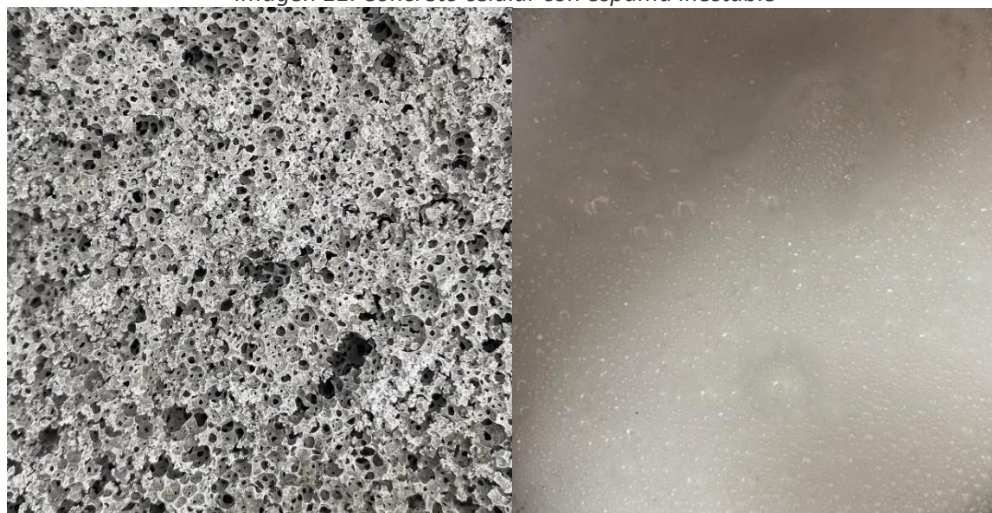
Densidad Relativa aparente (Gravedad especifica aparente)	Absorcion	Particulas livianas	Modulo de finura	Impurezas organicas
g/cm ³	%	%		
2.49	4.6	4.1	2.3	No

Fuente: Autor

5.1.2. Espuma Preformada

Para el caso de la espuma la ACI recomienda densidades de 32-80 kg/m³, en donde para la generación de espuma se utiliza un concentrado de agente espumante diluido en agua, pasando por un generador de espuma, el reto de esta investigación fue encontrar la cantidad agentes espumantes (texapon y glicerina) y el proceso de mezclado que generen una espuma con densidad baja, que produzca una celda estable y pequeña, de esta manera nos aseguramos primero que la espuma no se va a romper al momento de mezclado con el mortero, su posterior vertido en moldes y fraguado.

Imagen 11: Concreto celular con espuma inestable



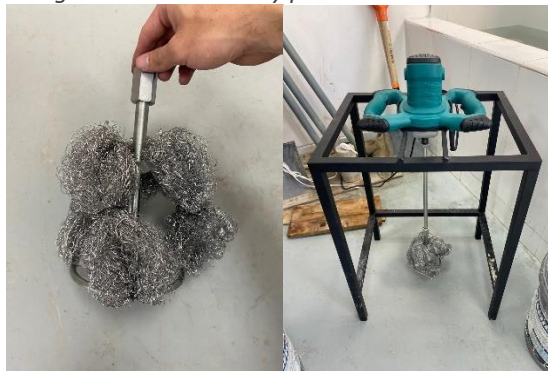
Fuente: Autor

Una vez teniendo en cuenta estos aspectos se tuvo que buscar un agente espumante disponible en el mercado nacional que nos ayude a conseguir una espuma con estas características, como se mencionó anteriormente hay varios agentes espumantes, se optó por Texapon N70 y glicerina, compuestos utilizados en la fabricación de detergentes que al momento de su uso generan espuma como se describe en el documento de *Elaboración de productos químicos agrícolas, de aseo y cosméticos* elaborado por Mercado guzmán, en donde el texapon actúa como tensoactivo, encargado de generar la espuma, se puede encontrar de dos maneras en forma líquida y pasta, en pasta tiene mejores resultados; La glicerina es producto de la saponificación, es decir de la unión de un cuerpo graso y sosa caustica; Por si sola casi no genera espuma pero al ser un humectante ayuda a dar consistencia a la espuma.

5.1.2.1. Método de generación de espuma

Una vez definido el texapon y la glicerina como nuestro agente espumante, se tuvo que definir el método de batido, la ACI recomienda el uso de generadores de espuma que cumplan con la ASTM C796/C796M, pero debido a que no se dispone de ese tipo de equipos, otro método de obtención de espuma es mediante batido.

Imagen 12: Mezcladora y paleta utilizada



Fuente: Autor

Luego de realizar una serie de ensayos con diferentes elementos de batido se llegó a la conclusión que la utilización de paletas de lana de acero, producen mayor volumen y menor densidad, cumpliendo los requerimientos de generación de espuma ASTM C796/C796M.

Imagen 13: Espuma preformada



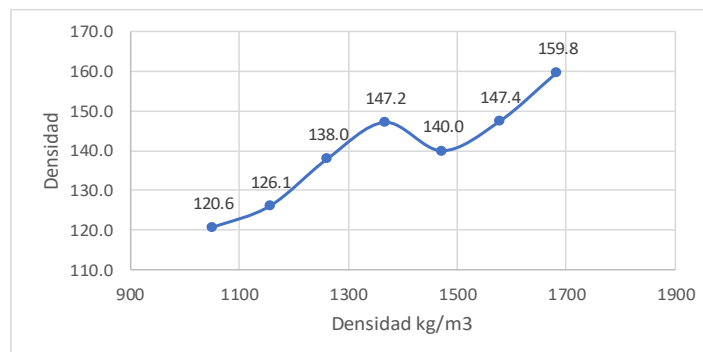
Fuente: Autor

5.1.2.2. Relación agente espumante/agua

Para determinar la cantidad de agente espumante que se le va a llamar aditivo, partimos de la relación utilizada por Arbito, (2016) donde el utiliza 13 cm³ de aditivo por cada 250 cm³ de agua, una vez definida la relación se realizó pruebas de espuma para determinar la cantidad de agua y aditivo que nos de la menor densidad para esto se calculó mediante el peso retenido en un recipiente volumétrico de 2.82 litros.

Tabla 13: Prueba de espuma para determinar la Cantidad de agua

Agua	Texapon	Glicerina	Peso	Peso en recipiente	Densidad
g	g	g	g	g	kg/m ³
1000	26	26	1052	340.2	120.6
1100	28.6	28.6	1157.2	355.5	126.1
1200	31.2	31.2	1262.4	389.1	138.0
1300	33.8	33.8	1367.6	415	147.2
1400	36.4	36.4	1472.8	394.8	140.0
1500	39	39	1578	415.7	147.4
1600	41.6	41.6	1683.2	450.5	159.8

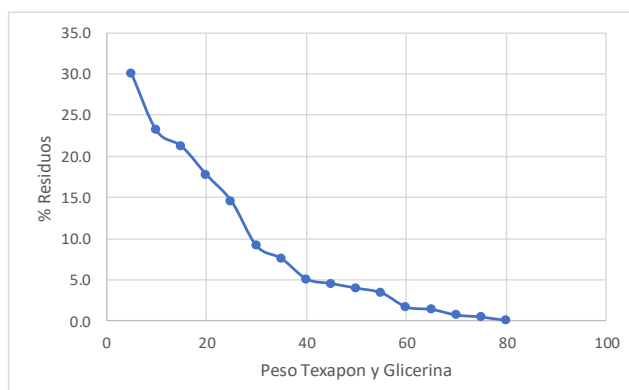


Fuente: Autor

Mediante esta prueba comprobamos que al momento de generar la espuma quedan residuos de aditivo (texapon y glicerina) que no reaccionó con el agua, por este motivo conociendo que obtuvimos una cantidad de agua en donde el peso del recipiente bajo, esto quiere decir que en ese momento reaccionó todo el aditivo, es decir no hubo residuos, lo que necesitamos ahora es determinar la cantidad de aditivo necesario para generar espuma sin que nos de residuos de ningún tipo.

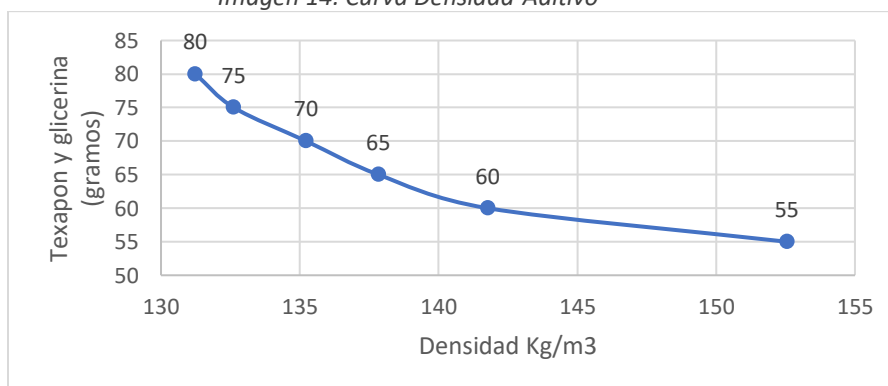
Tabla 14: Pruebas de cantidad de aditivo para no generar residuos

Agua	Texapon	Glicerina	Peso retenido en recipiente	Peso Residuos	Densidad	Porcentaje de residuos
g	g	g	g	g	kg/m ³	%
1400	5	5	409.6	423.9	145	30.1
1400	10	10	421.9	328.5	150	23.1
1400	15	15	411.5	303.7	146	21.2
1400	20	20	425.7	255.7	151	17.8
1400	25	25	407.9	210.6	145	14.5
1400	30	30	420.4	132.9	149	9.1
1400	35	35	403.5	111.1	143	7.6
1400	40	40	385.8	75.1	137	5.1
1400	45	45	395	67.2	140	4.5
1400	50	50	391.1	59.3	139	4.0
1400	55	55	430.2	51	153	3.4
1400	60	60	399.8	25.1	142	1.7
1400	65	65	388.7	20.9	138	1.4
1400	70	70	381.35	10.5	135	0.7
1400	75	75	374	6.7	133	0.4
1400	80	80	370.1	0	132	0.0



Fuente: Autor

Imagen 14: Curva Densidad-Aditivo



Fuente: Autor

Mediante las pruebas de la tabla 14, en donde se mantuvo la cantidad de agua de la prueba anterior, variando la cantidad de texapon y glicerina, aumentando hasta encontrar en qué momento

reaccionó todo el aditivo con el agua y no tener residuos, una vez realizada esta prueba se determinó que con 1400 ml de agua y 160 gramos de aditivo (texapon y glicerina) no se obtuvo residuos teniendo estos una relación aditivo/agua de 0,114 .

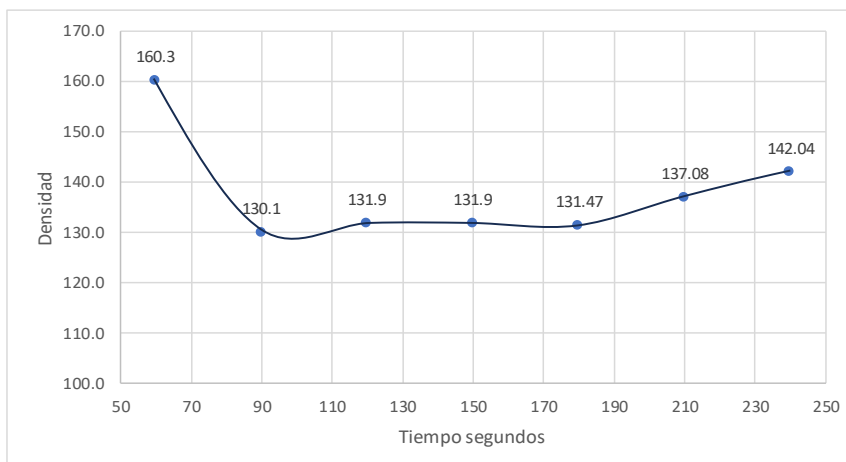
Una de las variables que queda a considerarse es el tiempo de batido, debido que un tiempo corto de batido no permite que reaccione todo el aditivo, mientras que un excesivo de batido rompe la estructura de la espuma formando residuos.

Tabla 15: Prueba de espuma con respecto al tiempo

N'	Aditivo		Agua (ml)	Mezcla				Promedio	
	Texapon	Gramos		Peso recipiente	Recipiente + espuma	Vol. recipiente	Peso espuma		Tiempo
	Glicerina	80	1400						
	g	g	litros	g	seg	rev/min	kg/m3	kg/m3	
1	2553.7	3831.1	2.82	1277.4	30	352	452.98	452.9	
	2553.9	3835.7		1281.8		352	454.54		
	2554.4	3826.8		1272.4		352	451.21		
2	2554.5	3010.6	2.82	456.1	60	352	161.74	160.3	
	2553.6	3005.2		451.6		352	160.14		
	2554.7	3002.9		448.2		352	158.94		
3	2553.5	2919.8	2.82	366.3	90	352	129.89	130.1	
	2554.8	2926.3		371.5		352	131.74		
	2553.6	2916.8		363.2		352	128.79		
4	2554.7	2927.3	2.82	372.6	120	352	132.13	131.9	
	2554.6	2923.3		368.7		352	130.74		
	2553.8	2928		374.2		352	132.70		
5	2553.7	2923.1	2.82	369.4	150	352	130.99	131.9	
	2554.6	2937.8		383.2		352	135.89		
	2553.8	2917.3		363.5		352	128.90		
6	2554.3	2928.6	2.82	374.3	180	353	132.73	131.47	
	2553.1	2916.9		363.8		354	129.01		
	2554.9	2929		374.1		355	132.66		
7	2553.4	2937.1	2.82	383.7	210	356	136.06	137.08	
	2554.6	2940.4		385.8		357	136.81		
	2554.8	2945		390.2		358	138.37		
8	2553.2	2953.9	2.82	400.7	240	359	142.09	142.04	
	2554.7	2950.5		395.8		360	140.35		
	2553.6	2958.8		405.2		361	143.69		

Fuente: Autor

Imagen 15: Curva de la densidad con respecto al tiempo



Fuente: Autor

Una vez definido la relación aditivo/agua, y el tiempo de batido que optimiza la densidad de la espuma preformada, se puede tener un mayor control al momento de mezclar con el resto de componentes.

En la imagen 12 se puede apreciar que entre los 90–180 segundos la densidad es similar, pero al pasar del rango de los 180 segundos empezó a aumentar, esto quiere decir que la espuma se empieza a deshacer y vuelve a hacerse líquida, por lo tanto, se tomara un tiempo de batido de 90 segundos, de esta forma nos aseguramos de obtener una densidad baja y tener tiempo para mezclar con el mortero antes de que la espuma se rompa.

5.1.3. Cemento

Para la elaboración del mortero se utilizó cemento Guapan tipo GU, este cemento debe de cumplir con la NTE INEN 2380 (Cemento hidráulico. Requisitos de desempeño para cementos hidráulicos). La densidad del cemento se obtiene mediante el método de Le Chatelier, para el caso

del cemento Guapan este valor es de 2,96 g/cm³, datos obtenidos de la Tesis de Campoverde & Muñoz.

Tabla 16: Composición química cemento Guapan

Compuesto	Porcentaje
Silice	28.68%
Alumina	6.07%
Hierro	3.47%
Cal	53.62%
Magnesio	1.18%
Azufre	2.15%
Perdida por calcinacion	3.93%

Fuente: Departamento de Control de Calidad Industrias Guapan

5.1.4. Agua

Para la elaboración de concreto celular se utilizó el agua potable de la ciudad de Cuenca, toda agua apta para consumo humano se puede utilizar para elaborar hormigón, como se describe en la NTE INEN 2617 (Hormigón de cemento hidráulico. Agua para mezcla. Requisitos.).

5.1.5. Diseño de mezcla

Para el diseño de la mezcla nos guiamos en la metodología de la ACI , pero no la replicamos como tal, esto es debido a los siguientes puntos.

- La ACI recomienda suponerse un valor de densidad en estado fresco y una relación agua cemento entre un rango de 0.45-0.6 para realizar los cálculos del diseño.
- El agua utilizada en la fabricación de espuma es restada del agua en la relación agua/cemento, esto hace que al momento de preparar el mortero sea muy seco y al

agregar la espuma se tenga que realizar un batido más prolongado rompiendo las celdas de la espuma.

- Como la espuma es considerada parte del agua, al momento de calcular volúmenes, para el volumen de espuma debemos de suponer un valor de rendimiento, es decir cuanto del volumen que ocuparía el aire pasaría realmente a ocupar la espuma, debido a que la espuma no tiene la misma densidad que el agua, por lo tanto, no llenaría el mismo volumen.

Para llegar a estas conclusiones se realizaron pruebas en donde se pudo verificar lo antes mencionado, para el caso de las relaciones no hay criterio de porque usar un valor u otro, lo mismo aplica para la densidad en estado fresco, por este motivo se optó por realizar un diseño creado en base a algunos lineamientos de la ACI para no utilizar valores supuestos.

Nuestro objetivo principal para el diseño es la resistencia a la compresión, partimos de la tabla 17 en donde tenemos la densidad en estado fresco, las relaciones agua/cemento, arena/cemento y la resistencia a la compresión.

Tabla 17: Composición y propiedades del concreto celular

As-cast density, lb/ft ³ (kg/m ³)	Sand-cement ratio	Water-cement ratio	Cement factor, lb/yt ³ (kg/m ³)	Estimated compressive strength, psi (MPa)
50 (800)	0.79	0.60	564 (335)	250 (1.7)
50 (800)	0.55	0.50	658 (390)	300 (2.1)
50 (800)	0.29	0.50	752 (446)	400 (2.8)
60 (960)	1.27	0.60	564 (335)	350 (2.4)
60 (960)	0.96	0.50	658 (390)	400 (2.8)
60 (960)	0.65	0.50	752 (446)	500 (3.5)
70 (1120)	1.75	0.60	564 (335)	450 (3.1)
70 (1120)	1.37	0.50	658 (390)	500 (3.5)
70 (1120)	1.06	0.45	752 (446)	600 (4.1)
80 (1280)	2.22	0.60	564 (335)	600 (4.1)
80 (1280)	1.78	0.50	658 (390)	650 (4.5)
80 (1280)	1.42	0.45	752 (446)	750 (4.8)
90 (1440)	2.85	0.45	564 (335)	1100 (7.6)
90 (1440)	2.19	0.50	658 (390)	1100 (7.6)
90 (1440)	1.78	0.45	752 (446)	1300 (9.0)
100 (1600)	3.18	0.60	564 (335)	1250 (8.6)
100 (1600)	2.65	0.45	658 (390)	1700 (11.7)
100 (1600)	2.14	0.45	752 (446)	1800 (12.4)
110 (1760)	3.66	0.60	564 (335)	2000 (13.8)
110 (1760)	3.06	0.45	658 (390)	2600 (17.9)
110 (1760)	2.44	0.50	752 (446)	2500 (17.2)
120 (1920)	3.32	0.60	658 (390)	3320 (22.9)
120 (1920)	2.80	0.50	752 (446)	3520 (24.3)

Fuente: McCormick 1967

Para nuestro caso necesitamos que nuestros bloques tengan una resistencia mínima de 2 Mpa por lo tanto en la tabla 17 en la segunda fila de datos vemos que tenemos una resistencia de 2.1 Mpa, por lo tanto, tomamos los datos de la relación agua/cemento de 0.5 y la relación arena/cemento de 0.55, a su vez tenemos el dato de la densidad en estado fresco que es de 800 kg/m³.

Como se mencionó anteriormente no vamos a seguir el método de la ACI, la forma en la que vamos a realizar nuestro concreto celular es en base a la densidad en estado fresco y la cantidad de material para hacer 1 m³ de concreto celular.

m = masa
v = volumen
d = densidad
c = cemento
s = arena
w = agua
f = espuma
w/c = relación agua cemento

s/c = relación arena cemento

Ecuación 9: Cantidades necesarias para hacer 1 m³ de concreto celular

$$mc + mw + ms + mf = 800 \text{ kg}$$

Donde:

Ecuación 10: Relaciones agua/cemento y arena/cemento

$$w/c = 0.5 \quad w = 0.5c$$

$$s/c = 0.55 \quad s = 0.55c$$

$$\gamma = 800 \text{ kg/m}^3$$

En la ecuación 10 se puede determinar que para obtener un concreto celular de una densidad de 800 kg/m³ se debe de sumar las masas de cada uno de los materiales, en la ecuación 10 se puede apreciar que al despejar el agua y la arena nos queda en función de la cantidad de cemento, de esta manera podemos remplazar en la ecuación 11, y obtener un sistema de ecuaciones con dos incógnitas que serán mc y mf .

Ecuación 11: Ecuación con 2 incógnitas

$$mc + 0.5mc + 0.55mc + (df * vf) = 800$$

$$2.05mc + 130.1vf = 800$$

Una vez conociendo la ecuación 11, hacemos una relación en donde para hacer 1m³ de concreto celular sabemos que cada material ocupa un volumen.

Ecuación 12: Volumen para hacer 1m³ de concreto celular

- $vc + vw + vs + vf = 1 \text{ m}^3$

$$\bullet \frac{mc}{dc} + \frac{mw}{dw} + \frac{ms}{ds} + \frac{mf}{df} = 1m^3$$

Mediante las relaciones de la ecuación 10 reemplazando en la ecuación 12 podemos dejar todo expresado en valores de las densidades de los materiales, masa de cemento y masa de espuma, las densidades de los materiales se conocen, para el caso del cemento es de 2960 kg/m³, para la arena es de 2381 kg/m³, el valor de agua es de 1000 kg/m³, la densidad de la espuma se obtuvo mediante ensayos, el valor de la densidad es de 130.1 kg/m³.

Ecuación 13: Ecuación con dos incógnitas

$$\frac{mc}{2960} + \frac{0.5mc}{1000} + \frac{0.55mc}{2381} + vf = 1 m^3$$

$$0.00106mc + vf = 1$$

Con la ecuación 13 y 11 tenemos dos ecuaciones con dos incógnitas, resolviendo estas ecuaciones tenemos la cantidad de cemento y espuma necesario para 1 m³ de concreto celular con una densidad de 800 kg/m³.

Ecuación 14: Dos ecuaciones con dos incógnitas

$$2.05mc + 130.1vf = 800$$

$$0.00106mc + vf = 1$$

Resolviendo estas ecuaciones tenemos que mc = 326.85 kg/m³ y vf= 0.64 m³, una vez conociendo el valor de la cantidad de cemento, es posible calcular el valor de la cantidad de agua y arena para hacer un 1 m³, en el caso de la espuma de acuerdo a los ensayos realizados, la densidad es 130.1 kg/m³ y también el volumen para hacer 1m³ de mezcla de concreto celular que es 0.64 m³, las cantidades de material para hacer 1 m³ están descritos en la tabla 18.

Tabla 18: Diseño en seco para 1m³ de concreto celular

Material	Cantidad	Volumen
	kg	m ³
Cemento	349.2	0.12
Agua	174.6	0.17
Arena	192.1	0.07
Espuma	83.5	0.64

Fuente: Autor

Una vez conocido las cantidades de material para el diseño en seco se hace el ajuste de agua por los áridos, esto es debido a que el árido en el momento de realizar la mezcla posee una humedad natural, esto quiere decir que podría tener agua en sus poros más un agua libre, así como que podría estar con los poros libres de agua y absorber el agua de hidratado, para esto la absorción juega un papel importante dato obtenido mediante la NTE INEN 856.

Ecuación 15: Humedad del árido

$$100 * \left(\frac{\text{Peso Arido estado natural} - \text{Peso Arido seco}}{\text{Peso Arido estado natural}} \right) = \% \text{ Humedad}$$

Para este caso se obtuvo una humedad de 7.15 % la absorción de nuestro árido es de 4.6% esto quiere decir que la humedad es mayor que la absorción, por la tanto el árido tiene agua libre, para este caso hay que restar el agua libre del árido al agua de hidratación como esta en la ecuación 16, y ajustar la arena porque el peso del agua libre está considerado como si fuera arena con la ecuación 17.

Ecuación 16: Corrección del agua humedad mayor que absorción

$$\text{Arena} * (\% \text{Humedad} - \% \text{Absorción}) + \text{Agua} = \text{Agua corregida}$$

Ecuación 17: Arena ajustada

$$\text{Arena ajustada} = \text{Arena} * (1 + \% \text{Humedad})$$

Para el caso cuando la humedad es menor que la absorción se utiliza la ecuación para corregir el agua y la arena se mantiene con la misma ecuación 17.

Ecuación 18: Agua Corregida cuando la humedad es menor que la absorción

$$\text{Agua ajustada} = \text{Arena} * (\% \text{Humedad} - \% \text{Absorción}) + \text{Agua}$$

Estos ajustes aseguran que los poros del árido estarán llenos de agua.

Tabla 19: Diseño en saturado superficialmente seco

Cemento	Cantidad
	kg/m ³
Cemento	349
Agua	171
Arena	205
Espuma	84

Fuente: Autor

Una vez conocida las cantidades de material para realizar 1 m³ de concreto celular se realiza una corrección por rendimiento, para esto se define hacer un volumen de concreto celular en específico, para pesarlo en un recipiente volumétrico en este caso de 2.82 litros; Se va a elaborar 3.5 litros de concreto celular para obtener la densidad, una vez que obtenemos la densidad sacamos el volumen real obtenido y lo comparamos con el volumen de diseño.

Ecuación 19: Densidad del concreto celular

$$\text{Densidad} = \frac{\text{Peso de recipiente kg}}{\text{Volumen del recipiente m}^3}$$

Ecuación 20: Volumen real de concreto celular

$$\text{Volumen real} = \frac{\text{Peso de mezcla}}{\text{Densidad del concreto celular}}$$

Al realizar los ensayos se obtuvo que el peso de concreto celular que está en el recipiente es de 1.13 kg, al dividir para el volumen del recipiente se obtiene una densidad de 401.42 kg/m³, para obtener el volumen real se divide el peso total de la mezcla para la densidad, para nuestro caso se obtuvo un volumen real de 7.04 litros esto quiere decir que estamos obteniendo más concreto del que se esperaba por este motivo se tiene que realizar una corrección, ajustando la cantidad de los materiales para obtener el volumen correcto.

La densidad obtenida fue de 401.42 kg/m³, la densidad de diseño es de 800 kg/m³, no se obtuvo la densidad esperada esto puede darse por el hecho de que no se consideró quitarle el agua de la espuma al agua de la mezcla.

Al tener densidades muy bajas de concreto celular en estado fresco, puede afectar a la homogeneidad de la mezcla, permitiendo que el agregado fino se sedimente en el recipiente, aparte las normas para concreto celular son recomendables para concretos con densidades mayores a 800 kg/m³.

Imagen 16: Sedimentación del material



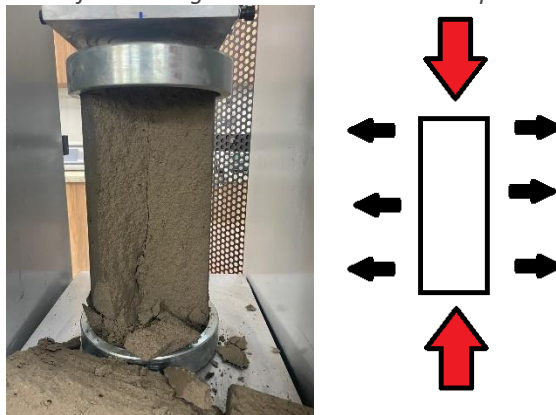
Fuente: Autor

Por este motivo siguiendo este diseño se optó por tomar valores de la tabla 17 realizando pruebas con densidades en estado fresco mayores, en la tabla 17 hay valores de resistencia a la compresión asignados a las densidades en estado fresco, por lo tanto, no podemos tomar como referencia esos valores a la hora de escoger nuestros parámetros de selección, por este motivo se realizaron pruebas experimentales de concreto en estado fresco hasta obtener valores de densidades ensayables.

5.1.5. Forma de Ensayo

Se realizaron pruebas a la hora de ensayar las probetas, como se mencionó anteriormente este tipo de concreto es muy absorbente y permeable, por lo que, al ensayar a compresión como los hormigones, pudimos apreciar que almacenan una gran cantidad de agua en su interior que generan cargas al tratar de salir, actúa como una esponja tratando de expulsar el agua interior cuando se comprime.

Imagen 17: Efecto del agua interna al realizar compresión



Fuente: Autor

Por este motivo se optó por ensayar con las probetas secas, en donde toda el agua que absorbió al momento del curado no afecte en la compresión del mismo.

Imagen 18: Cilindros aun con humedad interna



Fuente: Autor

5.2. Caracterización de las Variables dependientes

Son las variables que se miden para ver como responden a los cambios de las variables independientes.

5.2.1. Resistencia a la compresión

Es la capacidad del concreto celular de resistir cargas a compresión, se medirá la resistencia que tienen las probetas a los 7, 14 y 28 días de edad, utilizando una máquina de ensayos “Maquina Universal” , el objetivo de esta investigación es llegar a bloques de hormigón celular con una resistencia mínima de 2 Mpa que es lo requerido para este tipo de elementos.

6. Hipótesis

Cumpliendo los parámetros dados en las normas nacionales e internacionales, obtener bloques de concreto celular con una resistencia mínima de 2 Mpa.

7. Marco metodológico

7.1. Diseño experimental

Este método es considerado la forma más precisa de comprobar o refutar una hipótesis, a través de pruebas, ensayos y análisis de datos, se puede determinar la influencia de una o más variables y, de esta manera, validar o rechazar la hipótesis.

El diseño de esta investigación es experimental, esto es debido a que se manipulara las variables independientes, para observar su efecto sobre la variable dependiente que es la resistencia a la compresión. Las densidades que se estudiaran son 800, 1070 y 1390 kg/m³, obtenidos mediante el método experimental, estos datos fueron seleccionados por sus densidades bajas, y según la ACI aptas para uso como elementos no estructurales.

En esta investigación, el objetivo es determinar mediante ensayos cómo la variación de la densidad en estado fresco del concreto celular, una vez caracterizados los materiales como el cemento, agua, agregado fino y espuma preformada, afecta la resistencia a la compresión del mismo.

7.2. Análisis de datos

Para este trabajo se van a realizar bloques y cilindros de concreto celular, con tres densidades en estado fresco, el objetivo principal es analizar las resistencias a la compresión de estos, en donde se analizará los pesos de las probetas, densidades húmedas, densidades secas, relaciones de diseño, edad de las muestras y dimensiones.

Para esto se debe de tener en consideración que los ensayos realizados de los tres tipos de mezclas se realizan a los 7, 14 y 28 días, y se comparara su resistencia y como esta aumenta o disminuye con el tiempo, con el objetivo de verificar la hipótesis que este tipo de concretos sea utilizable como mampostería.

Una vez realizado los ensayos se obtendrá una gráfica entre la densidad y la resistencia a la compresión, el objetivo es llegar a un diseño que nos dé una resistencia de 2 Mpa, para obtener esta resistencia se obtendrá mediante la ecuación de la gráfica que se forme de los datos obtenidos de los ensayos.

7.3. Proceso de elaboración

- Seleccionar la densidad en estado fresco
- Seleccionar los datos de la relación agua/cemento y arena/cemento
- Calcular la cantidad de cemento y volumen de espuma mediante el sistema de ecuaciones
- Calcular el valor de la cantidad de agua y arena
- Realizar los ajustes de los árido y la corrección del agua para el diseño en saturado superficialmente seco
- Elaborar la mezcla de concreto celular
- Vertir la mezcla en un recipiente volumétrico para determinar su densidad
- Realizar las correcciones de volúmenes

7.4. Dosificaciones de concreto de celular

Para las dosificaciones se realizó mediante los parámetros antes mencionados, en total se realizaron 3 tipos de mezclas con distintas densidades en estado fresco; En las dosificaciones incluye el diseño y los ajustes para elaborar 1 m³ de concreto celular, una vez determinado estos

valores se debe de realizar correcciones en la mezcla por densidad y rendimiento, de esta manera nos aseguramos que la cantidad de concreto que estamos elaborando sea la misma que diseñamos.

7.4.1. Diseño de mezcla 1

Tabla 20: Diseño y dosificación de la Mezcla 1

Propiedades de los materiales	Densidad	Abs	Hum
	kg/m ³	%	%
Cemento	2960	-	-
Arena	2490	4.6%	9.2%
Densidad de la espuma	130.1	-	-
Agua	1000	-	-

Diseño de mezcla

Densidad en estado fresco kg/m ³	1120
Resistencia a la compresión Mpa	4.1
Relación agua/cemento	0.45
Relación arena/cemento	1.06
Relación aditivo/agua	0.114

Cantidad de material para 1 m³ diseño en seco

Material	kg	Volumen m ³	Espuma	
Material	kg		Material	kg
Cemento	420.9	0.14	Texapon	3.25
Agua	189.4	0.19	Glicerina	3.25
Arena	446.1	0.18	Agua	57.09
Espuma	63.6	0.49		63.6
	1120	1		

Corrección de humedad

Material	Humedad	Peso kg	Peso total	Volumen m ³
Cemento	-	420.88	420.88	0.14
Agua	169.1	-	169.1	0.17
Arena	487.0	-	487.0	0.20
Espuma	-	63.60	63.60	0.49
			1141	1.00

Diseño para 1 m³

Material	kg	Volumen m ³	Espuma	
Material	kg		Material	kg
Cemento	420.9	0.14	Texapon	3.25
Agua	169.1	0.17	Glicerina	3.25
Arena	487.0	0.20	Agua	57.09
Espuma	63.6	0.49		63.6
	1141	1		

Fuente: Autor

7.4.1. Diseño de mezcla 2

Tabla 21: Diseño y dosificación de la Mezcla 2

Propiedades de los materiales	Densidad	Abs	Hum
	kg/m ³	%	%
Cemento	2960	-	-
Arena	2490	4.6%	8.5%
Densidad de la espuma	130.1	-	-
Agua	1000	-	-

Diseño de mezcla

Densidad en estado fresco kg/m ³	1280
Resistencia a la compresión Mpa	4.8
Relacion agua/cemento	0.45
Relacion arena/cemento	1.42
Relacion aditivo/agua	0.114

Cantidad de material para 1 m³ diseño en seco

Material	kg	Volumen m ³	Espuma	
Material	kg		Material	kg
Cemento	427.0	0.14	Texapon	2.79
Agua	192.1	0.19	Glicerina	2.79
Arena	606.3	0.24	Agua	49.03
Espuma	54.6	0.42		54.6
	1280	1		

Corrección de humedad

Material	Humedad	Peso kg	Peso total	Volumen m ³
Cemento	-	426.96	426.96	0.14
Agua	164.5	-	164.5	0.16
Arena	657.8	-	657.8	0.26
Espuma	-	54.62	54.62	0.42
			1304	0.99

Diseño saturado superficialmente seco para 1 m³

Material	kg	Volumen m ³	Espuma	
Material	kg		Material	kg
Cemento	427.0	0.14	Texapon	2.79
Agua	164.5	0.16	Glicerina	2.79
Arena	657.8	0.26	Agua	49.03
Espuma	54.6	0.42		54.6
	1304	1		

Fuente: Autor

7.4.1. Diseño de mezcla 3

Tabla 22: Diseño y dosificación de la Mezcla 3

Propiedades de los materiales	Densidad	Abs	Hum
	kg/m ³	%	%
Cemento	2960	-	-
Arena	2490	4.6%	8.7%
Densidad de la espuma	130.1	-	-
Agua	1000	-	-

Diseño de mezcla

Densidad en estado fresco kg/m ³	1440
Resistencia a la compresión Mpa	9
Relación agua/cemento	0.45
Relación arena/cemento	1.78
Relación aditivo/agua	0.114

Cantidad de material para 1 m³ diseño en seco

Material	kg	Volumen m ³	Espuma	
Material	kg		Material	kg
Cemento	431.7	0.15	Texapon	2.34
Agua	194.3	0.19	Glicerina	2.34
Arena	768.4	0.31	Agua	41.00
Espuma	45.7	0.35		45.7
	1440	1		

Corrección de humedad

Material	Humedad	Peso kg	Peso total	Volumen m ³
Cemento	-	431.68	431.68	0.15
Agua	159.3	-	159.3	0.16
Arena	835.6	-	835.6	0.34
Espuma	-	45.67	45.67	0.35
			1472	0.99

Diseño saturado superficialmente seco para 1 m³

Material	kg	Volumen m ³	Espuma	
Material	kg		Material	kg
Cemento	431.7	0.15	Texapon	2.34
Agua	159.3	0.16	Glicerina	2.34
Arena	835.6	0.34	Agua	41.00
Espuma	45.7	0.35		45.7
	1472	1		

Fuente: Autor

7.4.1 Correcciones en las dosificaciones

La densidad del hormigón fresco es la masa del hormigón en estado no endurecido por unidad de volumen. La densidad del hormigón fresco es crucial para asegurar que la mezcla tenga las propiedades deseadas para el manejo, colocación y consolidación.

El rendimiento del hormigón se refiere a la cantidad de hormigón fresco producido a partir de una cantidad específica de materiales. Se mide en términos de volumen y es esencial para asegurar que la cantidad de hormigón producido sea suficiente para el proyecto sin desperdicio.

Factores que afectan la densidad del hormigón fresco:

- Relación Agua/Cemento: Una mayor cantidad de agua disminuye la densidad, mientras que menos agua aumenta la densidad.
- Tipo y Cantidad de Agregados: Los agregados más densos aumentan la densidad del hormigón.

Factores que afectan el rendimiento del hormigón:

- Dosificación de Materiales: Proporciones precisas de cemento, agregados y agua.

Tabla 23: Correcciones de la mezcla 1

Correccion por densidades y rendimientos

Volumen disenado	3.5 litros
	0.0035 m3

Diseno para 3.5 litros

Material		Espuma	
Material	kg	Material	kg
Cemento	1.473	Texapon	0.011
Agua	0.592	Glicerina	0.011
Arena	1.704	Agua	0.200
Espuma	0.223		0.223
3.99			

Correcciones

Peso de la mezcla en recipiente	2.255 kg
Volumen de recipiente	2.82 litros
Densidad en estado fresco	800 kg/m3
Volumen Disenado	3.5 litros
Volumen real	5.0 litros

Correccion de los materiales por rendimientos**Cantidad de material para 1 m3 disenado en seco**

Material			Espuma	
Material	kg	Volumen m3	Material	kg
Cemento	295.1	0.10	Texapon	2.28
Agua	132.8	0.13	Glicerina	2.28
Arena	312.8	0.13	Agua	40.03
Espuma	44.6	0.64		44.6
785		1		

Correccion de humedad

Material	Humedad	Peso kg	Peso total
Cemento	-	295.09	295.09
Agua	118.6	-	118.6
Arena	341.4	-	341.4
Espuma	-	44.59	44.59
800			

Diseno de mezcla para 1 m3

Material		Espuma	
Material	kg	Material	kg
Cemento	295.1	Texapon	2.28
Agua	118.6	Glicerina	2.28
Arena	341.4	Agua	40.03
Espuma	44.6		44.6
800			

Diseno para 3.5 litros

Material		Espuma	
Material	kg	Material	kg
Cemento	1.033	Texapon	0.062
Agua	0.415	Glicerina	0.062
Arena	1.195	Agua	0.031
Espuma	0.156		0.156
2.80			

Correcciones

Peso de la mezcla en recipiente	2.25 kg
Volumen de recipiente	2.82 litros
Densidad en estado fresco	796 kg/m3
Volumen Disenado	3.5 litros
Volumen real	3.5 litros

Fuente: Autor

Tabla 24: Correcciones de la mezcla 2

Correccion por densidades y rendimientos

Volumen disenado	3.5 litros
	0.0035 m3

Diseno para 3.5 litros

		Espuma	
Material	kg	Material	kg
Cemento	1.494	Texapon	0.010
Agua	0.576	Glicerina	0.010
Arena	2.302	Agua	0.172
Espuma	0.191		0.191
4.56			

Correcciones

Peso de la mezcla en recipiente	3.02	kg
Volumen de recipiente	2.82	litros
Densidad en estado fresco	1071	kg/m3
Volumen Disenado	3.5	litros
Volumen real	4.3	litros

Correccion de los materiales por rendimientos**Cantidad de material para 1 m3 disenado en seco**

			Espuma	
Material	kg	Volumen m3	Material	kg
Cemento	350.7	0.12	Texapon	2.30
Agua	157.8	0.16	Glicerina	2.30
Arena	494.9	0.20	Agua	40.27
Espuma	44.9	0.53		44.9
1048		1		

Correccion de humedad

Material	Humedad	Peso kg	Peso total
Cemento	-	350.66	350.66
Agua	135.3	-	135.3
Arena	536.9	-	536.9
Espuma	-	44.86	44.86
			1068

Diseno de mezcla para 1 m3

		Espuma	
Material	kg	Material	kg
Cemento	350.7	Texapon	2.30
Agua	135.3	Glicerina	2.30
Arena	536.9	Agua	40.27
Espuma	44.9		44.9
1068			

Diseno para 3.5 litros

		Espuma	
Material	kg	Material	kg
Cemento	1.227	Texapon	0.064
Agua	0.473	Glicerina	0.064
Arena	1.879	Agua	0.028
Espuma	0.157		0.157
3.74			

Correcciones

Peso de la mezcla en recipiente	3.02	kg
Volumen de recipiente	2.82	litros
Densidad en estado fresco	1070	kg/m3
Volumen Disenado	3.5	litros
Volumen real	3.5	litros

Fuente: Autor

Tabla 25: Correcciones de la mezcla 3

Correccion por densidades y rendimientos

Volumen disenado	3.5	litros
	0.0035	m3

Diseno para 3.5 litros

Material		Espuma	
Material	kg	Material	kg
Cemento	1.511	Texapon	0.008
Agua	0.558	Glicerina	0.008
Arena	2.925	Agua	0.143
Espuma	0.160		0.160
5.15			

Correcciones

Peso de la mezcla en recipiente	3.92	kg
Volumen de recipiente	2.82	litros
Densidad en estado fresco	1390	kg/m3
Volumen Disenado	3.5	litros
Volumen real	3.7	litros

Correccion de los materiales por rendimientos**Cantidad de material para 1 m3 disenado en seco**

Material			Espuma	
Material	kg	Volumen m3	Material	kg
Cemento	407.6	0.14	Texapon	2.21
Agua	183.4	0.18	Glicerina	2.21
Arena	722.7	0.29	Agua	38.71
Espuma	43.1	0.39		43.1
1357		1		

Correccion de humedad

Material	Humedad	Peso kg	Peso total
Cemento	-	407.59	407.59
Agua	150.5	-	150.5
Arena	785.9	-	785.9
Espuma	-	43.12	43.12
1387			

Diseno saturado superficialmente seco para 1 m3

Material		Espuma	
Material	kg	Material	kg
Cemento	407.6	Texapon	2.21
Agua	150.5	Glicerina	2.21
Arena	785.9	Agua	38.71
Espuma	43.1		43.1
1387			

Diseno para 3.5 litros

Material		Espuma	
Material	kg	Material	kg
Cemento	1.427	Texapon	0.063
Agua	0.527	Glicerina	0.063
Arena	2.751	Agua	0.025
Espuma	0.151		0.151
4.85			

Correcciones

Peso de la mezcla en recipiente	3.92	kg
Volumen de recipiente	2.82	litros
Densidad en estado fresco	1389	kg/m3
Volumen Disenado	3.5	litros
Volumen real	3.5	litros

Fuente: Autor

7.4.2 Preparado de las probetas

Para los ensayos a compresión, se prepararon muestras de cilindros y bloques, los cilindros tienen una dimensión de 15 cm de diámetro y 30 cm de altura como está estipulado en la NTE INEN 1573 , para los bloques se prepararon moldes de madera con dimensiones de bloques comerciales 40x12x20 cm.

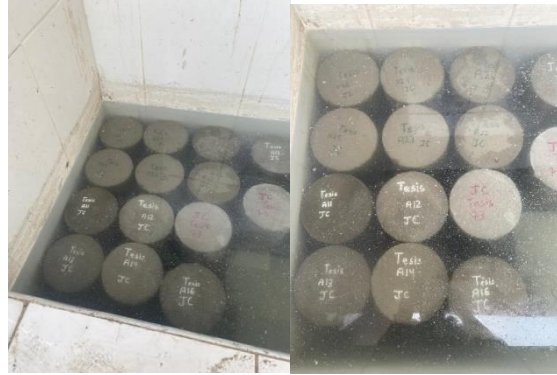
Imagen 19: Probetas de concreto celular



Fuente: Autor

Después de 24 horas se desencofran las probetas y deben de tener un proceso de curado, las probetas son curadas por inmersión en agua, hasta el día de ensayo.

Imagen 20: Curado de las probetas



Fuente: Autor

7.4.3. Ensayo a compresión

Para el ensayo a compresión como se mencionó anteriormente no podemos ensayar las probetas en húmedo esto debido a que agua interna altera los resultados del ensayo, por este son ensayados en seco, los ensayos se van llevar a cabo a los 7,14, y 28 días, en la “Maquina Universal”, con una capacidad para 30 toneladas en compresión, los ensayos van a realizarse a una velocidad de 0.05 Mpa/s que calculada en base a la resistencia esperada (2 Mpa), todo esto indicado en la norma ASTM C495 que nos especifica que la velocidad de la carga tiene que ser constante sin carga de impacto, en donde se tiene que llegar a la carga máxima entre 65 ± 15 segundos; En el caso de los bloques se tuvo que adicionar una placa metálica en la prensa acorde a la NTE INEN 3066, de esta manera nos aseguramos que la carga se distribuya de manera uniforme sobre el bloque.

Imagen 21: Ensayo a compresión de las probetas



Fuente: Autor

8. Población y Muestras

La población en este estudio se refiere a todas las posibles mezclas de hormigón celular que podrían ser formuladas y evaluadas en términos de densidad en estado fresco y resistencia a la compresión. Es decir, cualquier combinación de materiales que pueda ser utilizada para crear concreto celular.

Este tipo de muestra fue seleccionado mediante el método experimental, donde se requiere manipular las variables independientes, para observar sus efectos sobre la resistencia a la compresión del hormigón celular.

La muestra fue delimitada a tres densidades específicas 800, 1070 y 1390 kg/m³ debido a la relevancia de estas densidades en aplicaciones prácticas de hormigón celular. La selección de estas densidades permite observar cómo las variaciones en la densidad afectan las propiedades mecánicas del hormigón, específicamente a su resistencia a la compresión, lo cual es crítico para determinar su aplicabilidad en mampostería.

Tabla 26: Muestras de concreto celular

Codigo	Tipo	Fecha elaboracion	Fecha ruptura	Densidad en estado fresco	Edad
A11	Cilindro	6/25/2024	7/2/2024	800	7
A12		6/25/2024	7/2/2024		7
A13		6/25/2024	7/9/2024		14
A14		6/25/2024	7/9/2024		14
A15		6/25/2024	7/23/2024		28
A16		6/25/2024	7/23/2024		28
A21		1070	6/26/2024	7/3/2024	7
A22			6/26/2024	7/3/2024	7
A23			6/26/2024	7/10/2024	14
A24			6/26/2024	7/10/2024	14
A25			6/26/2024	7/24/2024	28
A26			6/26/2024	7/24/2024	28
A31		1390	6/27/2024	7/4/2024	7
A32			6/27/2024	7/4/2024	7
A33			6/27/2024	7/11/2024	14
A34			6/27/2024	7/11/2024	14
A35			6/27/2024	7/25/2024	28
A36			6/27/2024	7/25/2024	28
B11	Bloque	6/26/2024	7/3/2024	800	7
B12		6/26/2024	7/3/2024		7
B13		6/26/2024	7/10/2024		14
B14		6/26/2024	7/10/2024		14
B15		6/26/2024	7/24/2024		28
B16		6/26/2024	7/24/2024		28
B21		1070	6/28/2024	7/5/2024	7
B22			6/28/2024	7/5/2024	7
B23			6/28/2024	7/12/2024	14
B24			6/28/2024	7/12/2024	14
B25			6/28/2024	7/26/2024	28
B26			6/28/2024	7/26/2024	28
B31		1390	6/27/2024	7/4/2024	7
B32			6/27/2024	7/4/2024	7
B33			6/27/2024	7/11/2024	14
B34			6/27/2024	7/11/2024	14
B35			6/27/2024	7/25/2024	28
B36			6/27/2024	7/25/2024	28

Fuente: Autor

9. Descripción de los datos producidos

Para este estudio, se produjeron un total de 18 especímenes cilíndricos y 18 bloques de hormigón celular, distribuidos en tres grupos, cada uno correspondiente a una densidad en estado fresco específica: 800 kg/m³, 1070 kg/m³ y 1390 kg/m³. Cada grupo consistió en 6 especímenes.

10. Presentación de los resultados

10.1. Ensayos cilindros

Tabla 27: Resultados de la resistencia a la compresión en cilindros a los 7 días

Cod	Edad	Peso humedo	Peso Seco	Diametro	Altura	Area	Carga axial	Resistencia compresion	Promedio	Densidad
	Dias	g	g	cm	cm	cm2	N	Mpa	Mpa	kg/m3
A13	7	7239	5201	15.1	29.7	179.1	44159.1	2.47	2.38	800
A14	7	6926	4805	15.2	30.1	181.5	41591.2	2.29		
A22	7	9462	6571	15.1	30.2	179.1	60819.5	3.40	3.40	1070
A23	7	8982	6326	15.1	29.9	179.1	60110	3.36		
A31	7	9343	6488.6	15.3	30.1	183.9	47192.5	2.57	2.51	1390
A32	7	9070	6387.9	15.2	30.4	181.5	44686.5	2.46		

Fuente: Autor

Imagen 22: Grafica de la resistencia a la compresión en cilindros a los 7 día



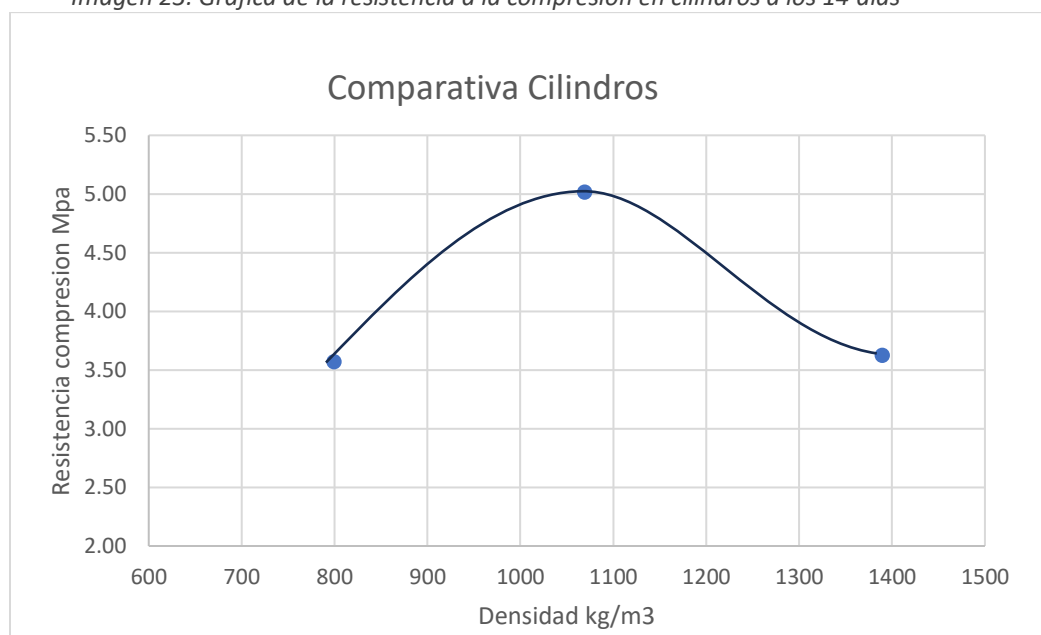
Fuente: Autor

Tabla 28: Resultados de la resistencia a la compresión en cilindros a los 14 días

Cod	Edad	Peso humedo	Peso Seco	Diametro	Altura	Area	Carga axial	Resistencia compresion	Promedio	Densidad
	Dias	g	g	cm	cm	cm2	N	Mpa	Mpa	kg/m3
A11	14	7819.1	5617.8	15.3	29.7	184	66833.8	3.64	3.57	800
A12	14	7883.4	5469.2	15	30.2	177	61870.9	3.50		
A25	14	9439.7	6555.5	15.1	29.9	179	89734.9	5.01	5.01	1070
A26	14	9370.8	6599.8	15.2	29.4	181	89327.2	4.92		
A33	14	9795.4	6802.8	15.1	30.4	179	66066.4	3.69	3.62	1390
A34	14	9437.3	6646.6	15.2	29.6	181	64546.4	3.56		

Fuente: Autor

Imagen 23: Grafica de la resistencia a la compresión en cilindros a los 14 días



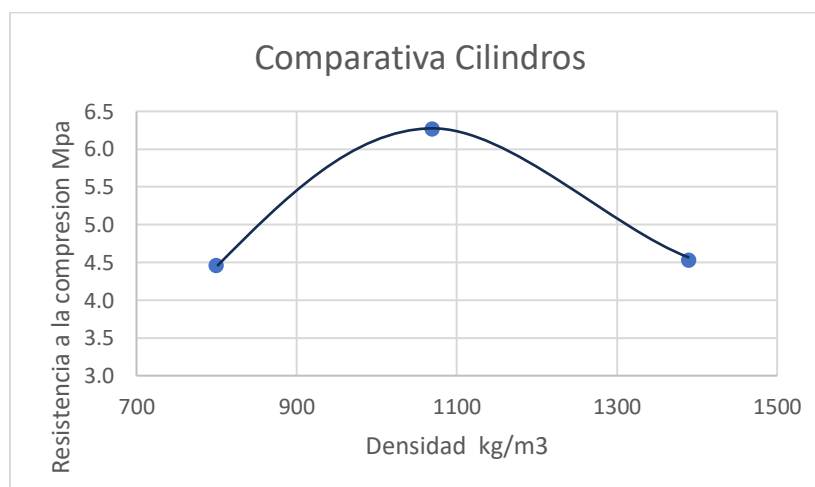
Fuente: Autor

Tabla 29: Resultados de la resistencia a la compresión en cilindros a los 28 días

Cod	Edad	Peso humedo	Peso Seco	Diametro	Altura	Area	Carga axial	Resistencia compresion	Promedio	Densidad
	Dias	g	g	cm	cm	cm2	N	Mpa		
A15	28	7681.0	5530.3	15	30	184	83542.3	4.5	4.5	800
A16	28	8061.6	5804.3	15	30	177	77338.6	4.4		
A25	28	9454.6	6807.3	15	30	179	112168.6	6.3		
A26	28	9479.9	6825.5	15	29	181	111659.0	6.2	6.3	1070
A35	28	9684.6	6972.9	15	30	179	82583.0	4.6		
A36	28	9347.5	6730.2	15	30	181	80683.0	4.4	4.5	1390

Fuente: Autor

Imagen 24: Grafica de la resistencia a la compresión en cilindros a los 14 días



Fuente: Autor

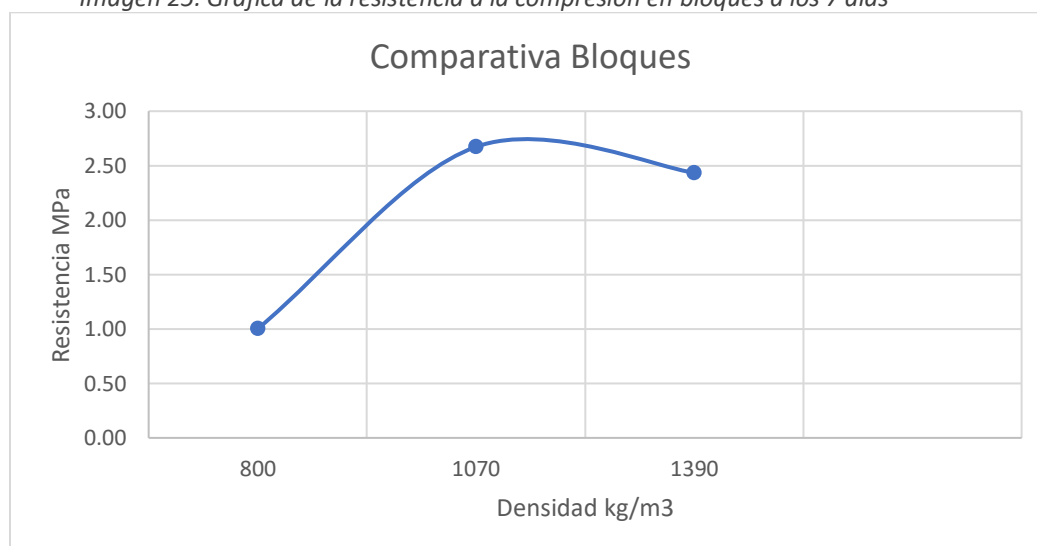
10.2. Ensayos Bloques

Tabla 30: Resultados de la resistencia a la compresión en bloques a los 7 días

Cod	Edad	Peso humedo	Peso Seco	Ancho	Largo	Area	Carga axial	Resistencia compresion	Promedio	Densidad
	Dias	g	g	cm	cm	cm2	N	Mpa		
B11	7	11640.0	8363	40.5	12.3	498.15	51687.8	1.04	1.00	800
B12	7	11290.6	7833	40.2	12.3	494.46	47826.2	0.97		
B25	7	15656.7	10873	40.1	12.5	501.25	133965	2.67	2.67	1070
B26	7	15599.9	10987	40.2	12.5	502.5	132586	2.64		
B31	7	17034.1	11830	40.3	12.3	495.69	125607	2.53	2.44	1390
B32	7	16199.3	11409	40.4	12.6	509.04	118965	2.34		

Fuente: Autor

Imagen 25: Grafica de la resistencia a la compresión en bloques a los 7 días



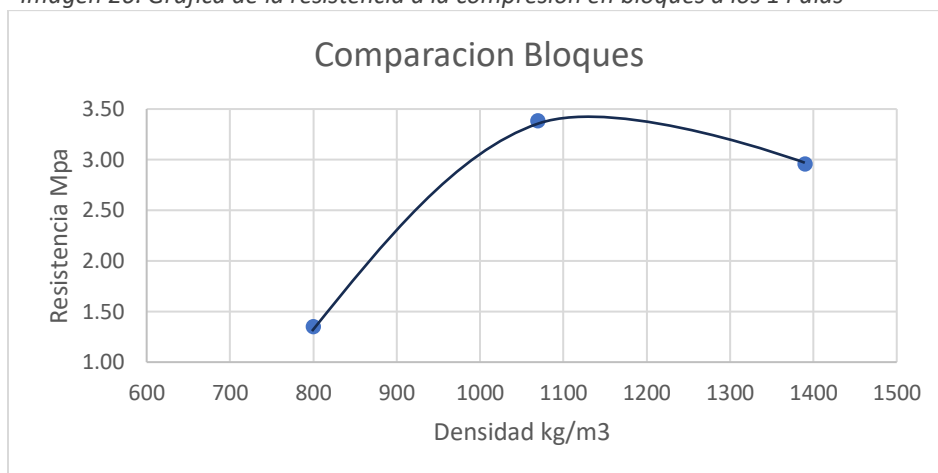
Fuente: Autor

Tabla 31: Resultados de la resistencia a la compresión en bloques a los 14 días

Cod	Edad	Peso humedo	Peso Seco	Ancho	Largo	Area	Carga axial	Resistencia compresion	Promedio	Densidad
	Dias	g	g	cm	cm	cm2	N	Mpa		
B13	14	12494.1	8976.6	40.2	12.2	490.44	63064.4	1.29	1.35	800
B14	14	11696.5	8114.6	39.9	12.1	482.79	67984.3	1.41		
B25	14	15656.7	10873	40.1	12.1	485.21	163965	3.38	3.38	1070
B26	14	15599.9	10987	40.2	12.5	502.5	165185	3.29		
B33	14	17034.1	11830	40.2	12.4	498.48	145706	2.92	2.95	1390
B34	14	16199.3	11409	40	12.3	492	146735	2.98		

Fuente: Autor

Imagen 26: Grafica de la resistencia a la compresión en bloques a los 14 días



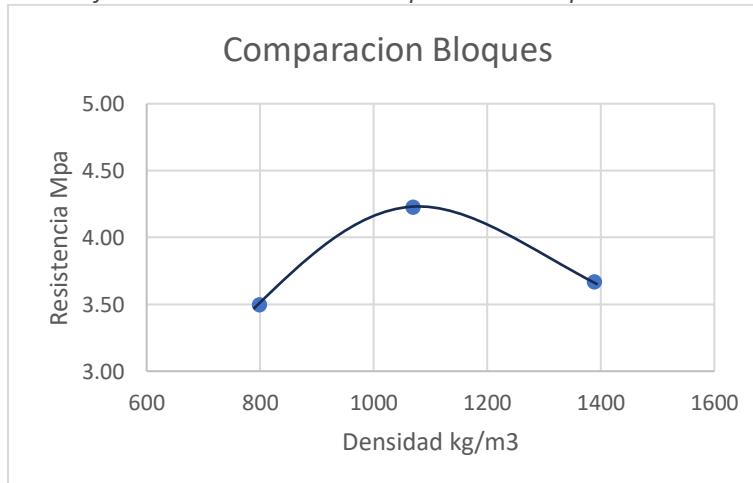
Fuente: Autor

Tabla 32: Resultados de la resistencia a la compresión en bloques a los 28 días

Cod	Edad	Peso humedo	Peso Seco	Ancho	Largo	Area	Carga axial	Resistencia compresion	Promedio	Densidad
	Dias	g	g	cm	cm	cm ²	N	Mpa	Mpa	kg/m ³
B15	28	12150.1	8556.4	40	12.2	490.4	171922	3.5	3.49	800
B16	28	12490.5	8796.1	40	12.1	482.8	168121	3.5		
B25	28	16421.0	11564.1	40	12.1	485.2	204956	4.2	4.22	1070
B26	28	15926.7	11216.0	40	12.5	502.5	206481	4.1		
B35	28	16807.4	11836.2	40	12.4	498.5	179813	3.6	3.70	1390
B36	28	15389.3	10837.5	40	12.3	492.0	187088	3.8		

Fuente: Autor

Imagen 27: Grafica de la resistencia a la compresión en bloques a los 28 días



Fuente: Autor

11. Análisis de los resultados

Una vez realizado los ensayos a compresión en cilindros y bloques, se pudo determinar que en el caso de cilindros la resistencia es mayor comparada con los bloques, La gráfica de resistencia a la compresión en cilindros muestra una tendencia clara donde la densidad en estado fresco afecta significativamente la resistencia a la compresión a los 7, 14 y 28 días. La resistencia máxima se observa en cilindros con una densidad de 1070 kg/m^3 . Sin embargo, las densidades de 800 kg/m^3 y 1390 kg/m^3 presentan resistencias más bajas, esto sugiere que hay un punto óptimo de densidad en estado fresco que optimiza la resistencia a la compresión del concreto celular.

Similar al análisis de cilindros, la gráfica de resistencia a la compresión en bloques también muestra una tendencia donde la densidad en estado fresco afecta la resistencia a la compresión. La resistencia máxima en bloques se alcanza con una densidad de 1070 kg/m^3 . Las densidades de 800 kg/m^3 y 1390 kg/m^3 presentan resistencias más bajas, esto confirma que, al igual que en los cilindros, hay una densidad óptima que optimiza la resistencia a la compresión en bloques de concreto celular.

Al comparar las resistencias a la compresión entre cilindros y bloques, se observa que los cilindros tienden a mostrar valores de resistencia ligeramente mayores que los bloques para todas las densidades estudiadas. Esta diferencia podría atribuirse a factores como la geometría del espécimen y la distribución de esfuerzos durante la prueba de compresión.

Las relaciones más significativas se encuentran en la densidad de 1070 kg/m^3 , donde ambos tipos de especímenes, cilindros y bloques muestran sus valores máximos de resistencia a la compresión. Esto sugiere que, independientemente de la forma del espécimen, la densidad de 1070

kg/m³ es la más favorable de las densidades en estado fresco ensayadas para alcanzar mayores resistencias a la compresión.

11.1. Ecuación de la curva

Como se mencionó anteriormente mediante los ensayos realizados se obtuvo una curva en donde nuestro objetivo es el diseño de bloques de concreto celular con una resistencia mínima de 2 Mpa, para este caso se realiza un ajuste de curva mediante el método de “MÍNIMOS CUADRADOS”, para esto se planteara mediante la ecuación 21, teniendo como datos de partida, las resistencias obtenidas a los 7 días y las densidades en estado fresco (800, 1), (1070, 2.67), (1390, 2.44), se obtuvo el sistema de ecuaciones de la imagen 25.

Imagen 28: Sistema lineal de ecuaciones mínimos cuadrados

$$\begin{aligned}\sum y_i &= a \sum x_i^2 + b \sum x_i + 3c \\ \sum x_i y_i &= a \sum x_i^3 + b \sum x_i^2 + c \sum x_i \\ \sum x_i^2 y_i &= a \sum x_i^4 + b \sum x_i^3 + c \sum x_i^2\end{aligned}$$

Fuente: Autor

Ecuación 21: Sistema de ecuaciones calculado

1. $3717000 a + 3260 b + 3 c = 6.11$
2. $4422662000 a + 3717000 b + 3260 c = 7048.5$
3. $5.45 \times 10^{+12} a + 4422662000 b + 371700 c = 8411207$

Una vez obtenido el sistema de ecuaciones mediante algebra lineal obtenemos las incógnitas a, b, y c, de esta manera obtenemos nuestra ecuación 22 que nos permite calcular la resistencia en base a la densidad y viceversa.

Ecuación 22: Ecuación de la curva

$$-1.1702x10^{-5} x^2 + 0.02806 x - 13.964 = y$$

Mediante la ecuación 22 para obtener una resistencia de 2 Mpa se necesita una densidad en estado fresco de 937 kg/m³, una vez conociendo estos datos y las relaciones agua/cemento, arena/cemento mediante interpolación como se muestra en la tabla 32, se realizan los cálculos de diseño para obtener bloques de concreto celular con una resistencia de 2 Mpa.

Tabla 33: Datos para concreto celular de 2 Mpa

Denidad en estado fresco kg/m ³	Arena/Cemento	Agua/Cemento
800	1.06	0.45
937	1.23	0.45
1070	1.42	0.45

Fuente: Autor

Obteniendo estos datos se procede a realizar el diseño y las correcciones respectivas para una densidad de 937 kg/m³.

Tabla 34: Diseño de mezcla de concreto celular para una densidad de 937 kg/m³

Propiedades de los materiales	Densidad	Abs	Hum
	kg/m ³	%	%
Cemento	2960	-	-
Arena	2490	4.6%	9.3%
Densidad de la espuma	130.1	-	-
Agua	1000	-	-

Diseño de mezcla

Densidad teorica en estado fresco kg/m ³	1196
Relacion agua/cemento	0.45
Relacion arena/cemento	1.23
Relacion aditivo/agua	0.114

Cantidad de material para 1 m³ diseño en seco

Cantidad de material para 1 m ³ diseño en seco			Espuma	
Material	kg	Volumen m ³	Material	kg
Cemento	424.1	0.14	Texapon	3.04
Agua	190.9	0.19	Glicerina	3.04
Arena	521.7	0.21	Agua	53.25
Espuma	59.3	0.46		59.3
	1196	1		

Correccion de humedad

Material	Humedad	Peso kg	Peso total	Volumen m ³
Cemento	-	424.13	424.13	0.14
Agua	167.1	-	167.1	0.17
Arena	570.0	-	570.0	0.23
Espuma	-	59.32	59.32	0.46
			1221	1.00

Diseño para 1 m³

Diseño para 1 m ³			Espuma	
Material	kg	Volumen m ³	Material	kg
Cemento	424.1	0.14	Texapon	3.04
Agua	167.1	0.17	Glicerina	3.04
Arena	570.0	0.23	Agua	53.25
Espuma	59.3	0.46		59.3
	1221	1		

Fuente: Autor

Tabla 35: Corrección de mezcla de concreto celular

Corrección por densidades y rendimientos

Volumen diseñado	3.5 litros
	0.0035 m ³

Diseño para 3.5 litros

		Espuma	
Material	kg	Material	kg
Cemento	1.484	Texapon	0.011
Agua	0.585	Glicerina	0.011
Arena	1.995	Agua	0.186
Espuma	0.208		0.208
4.27			

Correcciones

Peso de la mezcla en recipiente	2.642 kg
Volumen de recipiente	2.82 litros
Densidad en estado fresco	937 kg/m ³
Volumen Diseñado	3.5 litros
Volumen real	4.6 litros

Corrección de los materiales por rendimientos**Cantidad de material para 1 m³ diseño en seco**

			Espuma	
Material	kg	Volumen m ³	Material	kg
Cemento	325.6	0.11	Texapon	2.33
Agua	146.5	0.15	Glicerina	2.33
Arena	400.9	0.16	Agua	40.88
Espuma	45.5	0.58		45.5
918		1		

Corrección de humedad

Material	Humedad	Peso kg	Peso total
Cemento	-	325.55	325.55
Agua	128.3	-	128.3
Arena	438.0	-	438.0
Espuma	-	45.54	45.54
937			

Diseño para 1 m³

		Espuma	
Material	kg	Material	kg
Cemento	325.6	Texapon	2.33
Agua	128.3	Glicerina	2.33
Arena	438.0	Agua	40.88
Espuma	45.5		45.5
937			

Diseño para 3.5 litros

		Espuma	
Material	kg	Material	kg
Cemento	1.139	Texapon	0.065
Agua	0.449	Glicerina	0.065
Arena	1.533	Agua	0.030
Espuma	0.159		0.159
3.28			

Correcciones

Peso de la mezcla en recipiente	2.64 kg
Volumen de recipiente	2.82 litros
Densidad en estado fresco	937 kg/m ³
Volumen Diseñado	3.5 litros
Volumen real	3.5 litros

Fuente: Autor

11.2. Validación de la curva

Tabla 36: Resultados de la resistencia a la compresión de la mezcla optimizada

Cod	Edad	Peso humedo	Peso Seco	Ancho	Largo	Area	Carga axial	Resistencia compresion	Promedio	Densidad
	Dias	g	g	cm	cm	cm2	N	Mpa	Mpa	kg/m3
D11	7	15821.6	11141.6	40	12.5	506.1	107749	2.1	2.1	937

Fuente: Autor

11.3. Costo de elaboración

Una vez validada la curva y demostrado mediante los ensayos a compresión se obtuvo que un concreto celular con una densidad en estado fresco de 937 kg/m³ a los 7 días tiene una resistencia de 2.1 Mpa que vendría siendo la resistencia al momento de entrega, cumpliendo con normativa.

Tabla 37: Valor de los materiales

Material	Unidad	Cantidad	Precio
Cemento	kg	50	\$ 7.92
	Saco	1	
Arena	m ³	1	\$ 19.58
Agua	m ³	21	\$ 4.00
Texapon	kg	1	\$ 2.55
Glicerina	litro	1	\$ 2.55

Fuente: Autor

Tabla 38: Valor de los materiales para 1 m³ de concreto celular

Material	Unidad	Cantidad	Precio
Cemento	kg	325.6	\$ 51.58
	Sacos	6.5	
Arena	m ³	0.18	\$ 3.44
Agua	m ³	0.169	\$ 0.03
Texapon	kg	2.37	\$ 6.04
Glicerina	litro	2.37	\$ 6.04
Total			\$ 67.13

Fuente: Autor

Tabla 39: Valor de los materiales para producir 1 Bloque de Concreto celular con una densidad de 937 kg/m³

Material	Unidad	Cantidad	Precio
Cemento	kg	3.13	\$ 0.50
	Sacos	0.1	
Arena	m ³	0.002	\$ 0.004
Agua	m ³	0.002	\$ 0.004
Texapon	kg	0.022	\$ 0.06
Glicerina	litro	0.022	\$ 0.06
Total			\$ 0.62

Fuente: Autor

11.4. Comparativa costos de bloques

Tabla 40: Comparativa de precios de bloques de construcción

Tipo de bloque	Edad	Precio	Peso	Resistencia
	Dias		kg	Mpa
Celular (Densidad en estado fresco 800 kg/m ³)	28	\$ 0.57	8.67	3.49
Celular (Densidad en estado fresco 937 kg/m ³)	28	\$ 0.62	11.14	3.99
Alivianado	28	\$ 0.55	8.97	2.38
Hormigon	28	\$ 0.92	14.18	4.39

Fuente: Autor

En la comparativa no se puede hacer un análisis comparativo de costos debido a que la mano de obra en bloques comerciales esta optimizada, mientras que los bloques de concreto celular fueron realizados en laboratorio con fines de académicos.

12. Interpretación de resultados

Los resultados obtenidos indican que la densidad en estado fresco del concreto celular juega un papel crucial en determinar su resistencia a la compresión. La densidad óptima de 1070

kg/m³, que produce las mayores resistencias a la compresión tanto en cilindros como en bloques, puede ser atribuida a una mejor distribución de los componentes del concreto celular.

La disminución de la resistencia a la compresión observada en las densidades más bajas 800 kg/m³ y más altas 1390 kg/m³ podría explicarse por una reducción en la cantidad de material sólido, y una mayor porosidad o mala distribución de la espuma.

Una vez conocidos estos resultados se optimizó la mezcla de concreto celular para obtener una resistencia de 2 Mpa. Estos hallazgos fueron obtenidos mediante el método experimental que sugieren que existe un rango de densidad para optimizar las propiedades mecánicas del concreto celular.

La elección del tipo de bloque dependerá de las prioridades del proyecto. Si el presupuesto es un factor importante, el bloque alivianado puede ser la mejor opción. Si se busca una combinación de ligereza y resistencia, los bloques de concreto celular son apropiados. El bloque de hormigón es la mejor opción para aplicaciones donde la resistencia y durabilidad son primordiales, a pesar de su mayor costo y peso.

La utilización de concreto celular con densidades adecuadas puede ser favorable en aplicaciones estructurales específicas, como mampostería y elementos de relleno, siempre y cuando se cumplan con los requisitos necesarios de resistencia a la compresión.

13. Conclusiones

En base a los resultados obtenidos y el análisis realizado, se pueden derivar las siguientes conclusiones del estudio sobre la resistencia a la compresión del concreto celular variando sus densidades en estado fresco.

La investigación demostró que la densidad en estado fresco de 1070 kg/m³ es la más favorable para maximizar la resistencia a la compresión del concreto celular. Tanto en cilindros como en bloques, esta densidad mostró los valores más altos de resistencia a la compresión, lo que sugiere que hay un punto óptimo de densidad que proporciona una mejor distribución de los componentes del concreto celular.

Las densidades de 800 kg/m³ y 1390 kg/m³ presentan resistencias a la compresión significativamente más bajas, lo que indica que teniendo una densidad demasiado baja como una demasiado alta pueden afectar negativamente las propiedades mecánicas del concreto celular.

La investigación demostró que es posible desarrollar una mezcla de concreto celular que cumple con la resistencia mínima de 2 Mpa, cumpliendo los requerimientos de las normas nacionales e internacionales. Esto indica que estas mezclas son adecuadas para la fabricación de bloques destinados a mampostería.

Los bloques de concreto celular destacan por su ligereza, resistencia adecuada, costo, efectividad y versatilidad. Son ideales para proyectos que requieren un material de construcción fácil de manejar y transportar, con una buena relación entre costo/resistencia. Además, la disponibilidad en diferentes densidades permite a los constructores seleccionar el bloque más adecuado para sus necesidades específicas, optimizando así el rendimiento del proyecto y manteniendo un control efectivo del presupuesto.

Futuros estudios podrían investigar un rango más amplio de densidades en estado fresco para identificar si existen otros puntos óptimos o si la tendencia observada se mantiene. Esto incluiría densidades intermedias y mayores no estudiadas en esta investigación.

Además de la resistencia a la compresión, sería beneficioso estudiar cómo la densidad en estado fresco afecta otras propiedades mecánicas del concreto celular, como la resistencia a la tracción, la flexión y la durabilidad a largo plazo.

14. Bibliografía

1. American Concrete Institute. *Guide for Cellular Concretes above 50 lb/ft³ (800 kg/m³)*.
2. American Concrete Institute. *Guide for Precast Cellular Concrete Floor, Roof, and Wall Units*.
3. American Society for Testing and Materials. (n.d.). *Standard Test Method for Compressive Strength of Lightweight Insulating Concrete*. ASTM International.
4. American Society for Testing and Materials. (2005). *Standard test for compressive strength of cylindrical concrete specimens*.
5. American Society for Testing and Materials. (2008a). *Determinación de la resistencia a la compresión de mortero de cemento hidráulico usando especímenes cúbicos de 50 mm (2 pulg) de lado*.
6. American Society for Testing and Materials. (2008b). *Método de Ensayo Estándar para REVENIMIENTO DEL CONCRETO DE CEMENTO*.
7. American Society for Testing and Materials. (2014, September). *Standard Test Method for Obtaining and Testing Specimens of Hardened Lightweight Insulating Concrete for Compressive Strength*. ASTM International.
8. American Society for testing and materials. *Standard Specification for Foaming Agents Used in Making Preformed Foam for Cellular Concrete*. ASTM International.
9. American Society for testing and materials. (2014). *Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method*.
10. Amran, M., Onaizi, A. M., Fediuk, R., Danish, A., Vatin, N. I., Murali, G., Abdelgader, H. S., Mosaberpanah, M. A., Cecchin, D., & Azevedo, A. (2022). An ultra-lightweight cellular concrete for geotechnical applications – A review. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e01096. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01096>
11. Arbito, G. (2016, October). *CONCRETO CELULAR PARA USO ESTRUCTURAL*. Universidad de Cuenca.

12. Bhosale, A., Zade, N. P., Sarkar, P., & Davis, R. (2020). Mechanical and physical properties of cellular lightweight concrete block masonry. *Construction and Building Materials*, 248, 118621.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118621>
13. Building Research Institute. (1961). *Structural Foams*. 892, Washington DC.
14. Campoverde, S., & Munoz, D. (2015). *ESTUDIO EXPERIMENTAL DEL USO DE DIFERENTES ADITIVOS COMO PLASTIFICANTES REDUCTORES DE AGUA EN LA ELABORACIÓN DE HORMIGÓN Y SU INFLUENCIA EN LA PROPIEDAD DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN*. UNIVERSIDAD DE CUENCA.
15. Canales, M., & Hernández, E. F. (2023). Concreto celular con espuma preformada y agregados ligeros. *Nexo Revista Científica*.
16. Chica, L., & Alzate, A. (2019). Cellular concrete review: New trends for application in construction. *Construction and Building Materials*, 200, 637–647. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.136>
17. *CÓDIGO ECUATORIANO DE LA CONSTRUCCIÓN. REQUISITOS DE DISEÑO DEL HORMIGÓN ARMADO*. (1993, Quito). Instituto Ecuatoriano de normalizacion.
18. Dagnino, J. (2014). ANÁLISIS DE VARIANZA. *Rev Chil Anest*, 43, 306–310.
19. Fang, X., Wang, C., Li, H., Wang, X., Zhang, S., Luo, X., & Jia, H. (2022). Influence of mesoscopic pore characteristics on the splitting-tensile strength of cellular concrete through deep-learning based image segmentation. *Construction and Building Materials*, 315, 125335.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125335>
20. Inti, S., Evans, T. W., Flores, M., Solanki, J. S., & Chandramouli, C. V. (2021). Permeable low-density cellular concrete (PLDCC) as a replacement for aggregate layers in permeable parking lots. *Developments in the Built Environment*, 8, 100060. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2021.100060>
21. JIMENEZ, E. (2014, España). *Concreto aireado en autoclave: Estado actual de la técnica y perspectivas de futuro*. Universidad Politécnica de Cataluña. <http://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/23710>
22. Jimenez, R. (2014). *CONCRETO AIREADO EN AUTOCLAVE, ESTADO ACTUAL DE LA TÉCNICA Y PERSPECTIVAS DE FUTURO*. UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA.
23. Laukaitis, A., & Fitks, B. (2005). *Acoustical properties of aerated autoclaved concrete* (Vol. 67).

24. Legatski, L. A. (1978). *Cellular Concrete—Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials*. ASTM International.
25. Liu, X., Qian, X., Pu, S., Sheng, K., Sun, D., & Hong, B. (2022). Methods for testing the quality of lightweight cellular concrete during pouring. *Construction and Building Materials*, 315, 125755. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125755>
26. MC Cormick, F. (1967, February). *Rational Proportioning of Preformed Foam Cellular Concrete*. ACI JOURNAL.
27. Mercado guzman, M. (2015, Agosto). *Elaboracion de productos quimicos agricolas, de aseo y cosmeticos*. Centro para la industria petroquimica.
28. NTE INEN 696. *ÁRIDOS. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO EN LOS ÁRIDOS, FINO Y GRUESO*. SERVICIO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN.
29. NTE INEN 697. *ÁRIDOS. DETERMINACIÓN DEL MATERIAL MÁS FINOS QUE PASA EL TAMIZ CON ABERTURAS DE 75 µm (No. 200), MEDIANTE LAVADO*. SERVICIO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN.
30. NTE INEN 698. *ÁRIDOS PARA HORMIGÓN. DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE TERRONES DE ARCILLA Y PARTÍCULAS DESMENUZABLES*. SERVICIO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN.
31. NTE INEN 855. *ÁRIDOS. DETERMINACIÓN DE LAS IMPUREZAS ORGÁNICAS EN EL ÁRIDO FINO PARA HORMIGÓN*. SERVICIO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN.
32. NTE INEN 856. *ÁRIDOS. DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD, DENSIDAD RELATIVA (GRAVEDAD ESPECÍFICA) Y ABSORCIÓN DEL ÁRIDO FINO*. SERVICIO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN.
33. NTE INEN 1573. *HORMIGÓN DE CEMENTO HIDRÁULICO. DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE ESPECÍMENES CILÍNDRICOS DE HORMIGÓN DE CEMENTO HIDRÁULICO*. SERVICIO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN.
34. NTE INEN 2380. *CEMENTO HIDRÁULICO. REQUISITOS DE DESEMPEÑO PARA CEMENTOS HIDRÁULICOS*. SERVICIO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN.

35. NTE INEN 2536. *ÁRIDOS PARA USO EN MORTEROS PARA MAMPOSTERÍA. REQUISITOS.* SERVICIO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN.
36. NTE INEN 2617. *HORMIGÓN DE CEMENTO HIDRÁULICO. AGUA PARA MEZCLA. REQUISITOS.* SERVICIO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN.
37. NTE INEN 3066. *BLOQUES DE HORMIGÓN. REQUISITOS Y MÉTODOS DE ENSAYO.* SERVICIO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN.
38. NTE INEN 3124. *HORMIGÓN. ELABORACIÓN Y CURADO DE ESPECÍMENES DE ENSAYO EN EL LABORATORIO.* SERVICIO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN.
39. Panesar, D. K. (2013). Cellular concrete properties and the effect of synthetic and protein foaming agents. *Construction and Building Materials*, 44, 575–584. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.024>
40. Priyatham, B. P. R. V. S., Lakshmayya, M. T. S., & Chaitanya, D. V. S. R. K. (2023). Review on performance and sustainability of foam concrete. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.080>
41. Ramamurthy, K., Kunhanandan Nambiar, E. K., & Indu Siva Ranjani, G. (2009). A classification of studies on properties of foam concrete. *Cement and Concrete Composites*, 31(6), 388–396. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.04.006>
42. Sanchez de Guzman, D. (2001). *Tecnología del concreto y del mortero* (5th ed.).
43. Tiong-Huan Wee, D. S. B., T. Tamilselvan, and Hwee-Sin Lim. (2006). Air-Void System of Foamed Concrete and its Effect on Mechanical Properties. *ACI Materials Journal*, 103(1). <https://doi.org/10.14359/15126>
44. Wu, H., Liu, J., & Zhang, X. (2020). Feasibility study on use of cellular concrete for air convection embankment on permafrost foundations in Fairbanks, Alaska. *Transportation Geotechnics*, 22, 100317. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100317>
45. Wu, H., Zhang, X., & Liu, J. (2023). Thermal performance analysis of hollow cellular concrete block air convection embankment for cold regions. *Cold Regions Science and Technology*, 206, 103733. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2022.103733>

46. Yoc, J. (2018, Abril). *FABRICACIÓN Y EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE UNIDADES DE MAMPOSTERÍA DE CONCRETO CELULAR DE ESPUMA PREFORMADA*. Universidad de San Carlos de Guatemala.