



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**

**“DISEÑO DE HORMIGÓN CELULAR CON CEMENTO HÍBRIDO
ALCALINO A BASE DE ZEOLITA DE LA CANTERA ISIDRO
AYORA Y ESPUMANTE RV-2020 CON DENSIDADES DE 600 Y
800 KG/M³”**

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

AUTORES:

**JORGE DAVIE GONZÁLEZ RAMÍREZ
LUCIA BELÉN VILLÓN SALINAS**

TUTOR:

ING. ALEJANDRO VELIZ AGUAYO PhD.

La Libertad, Ecuador

2023

UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**“DISEÑO DE HORMIGÓN CELULAR CON CEMENTO HÍBRIDO
ALCALINO A BASE DE ZEOLITA DE LA CANTERA ISIDRO
AYORA Y ESPUMANTE RV-2020 CON DENSIDADES DE 600 Y
800 KG/M³”**

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

AUTORES:

JORGE DAVIE GONZÁLEZ RAMÍREZ

LUCIA BELÉN VILLÓN SALINAS

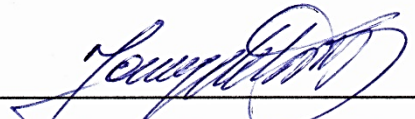
TUTOR:


ING. ALEJANDRO VELIZ AGUAYO PhD.

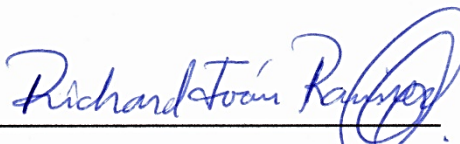
La Libertad, Ecuador

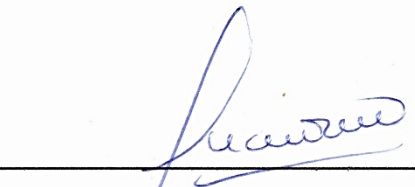
2023

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

f. 
Ing. Jonny Villao Borbor, Mg.
DIRECTOR DE CARRERA

f. 
Ing. Alejandro Veliz Aguayo, PhD.
DOCENTE TUTOR

f. 
Ing. Richard Ramírez Palma, Mg.
DOCENTE ESPECIALISTA

f. 
Ing. Lucrecia Moreno Alcívar, PhD.
DOCENTE UIC

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Nosotros, **JORGE DAVIE GONZÁLEZ RAMÍREZ** y **LUCIA BELÉN VILLÓN SALINAS**, declaramos bajo juramento que el presente trabajo de titulación denominado “**DISEÑO DE HORMIGÓN CELULAR CON CEMENTO HÍBRIDO ALCALINO A BASE DE ZEOLITA DE LA CANTERA ISIDRO AYORA Y ESPUMANTE RV-2020 CON DENSIDADES DE 600 Y 800 KG/M³**”, no tiene antecedentes de haber sido elaborado en la Facultad de **CIENCIAS DE LA INGENIERÍA**, Carrera de **INGENIERÍA CIVIL**, lo cual es un trabajo exclusivamente inédito de nuestra autoría.

Por medio de la presente declaración cedemos los derechos de autoría y propiedad intelectual, correspondientes a este trabajo, a la Universidad Estatal Península de Santa Elena, según lo establecido por la ley de propiedad intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente.

Atentamente,

AUTORES

f.  _____

Jorge Davie González Ramírez

C.I. 2450204215

f.  _____

Lucia Belén Villón Salinas

C.I. 0955399027

CERTIFICACIÓN DEL TUTOR

Ing. Alejandro Crisóstomo Veliz Aguayo, PhD.

TUTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Universidad Estatal Península de Santa Elena

En mi calidad de Tutor del presente trabajo “**DISEÑO DE HORMIGÓN CELULAR CON CEMENTO HÍBRIDO ALCALINO A BASE DE ZEOLITA DE LA CANTERA ISIDRO AYORA Y ESPUMANTE RV-2020 CON DENSIDADES DE 600 Y 800 KG/M³**” previo a la obtención del Título de **INGENIERO CIVIL** elaborado por el Sr. **JORGE DAVIE GONZÁLEZ RAMÍREZ** y la Srta. **LUCIA BELEN VILLÓN SALINAS**, egresados de la **CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**, Facultad **CIENCIAS DE LA INGENIERÍA** de la Universidad Estatal Península de Santa Elena, me permito declarar que luego de haber orientado, estudiado y revisado, la apruebo en todas sus partes.

Atentamente,

f.  _____

Ing. Alejandro Crisóstomo Veliz Aguayo, PhD.

C.I. 0908182280

DOCENTE TUTOR

CERTIFICACIÓN DE GRAMATOLOGÍA

Certificación de Gramatólogo

Lic. MARIANA NOEMI MEDINA
SUAREZ

*Magister En Diseño Y Evaluación
De Modelos Educativos*

La Libertad, julio 8 del 2023.

Certifica:

Que después de revisar el contenido del trabajo de titulación en opción al título de **INGENIERO CIVIL** de: **GONZÁLEZ RAMÍREZ JORGE DAVIE & VILLÓN SALINAS LUCIA BELEN**, cuyo tema es: **“DISEÑO DE HORMIGÓN CELULAR CON CEMENTO HÍBRIDO ALCALINO A BASE DE ZEOLITA DE LA CANTERA ISIDRO AYORA Y ESPUMANTE RV-2020 CON DENSIDADES DE 600 Y 800 KG/M3”**, me permito declarar que el trabajo investigativo se encuentra idóneo y puede ser expuesto ante el jurado respectivo para la defensa del tema en mención.

Es todo cuanto puedo manifestar en honor a la verdad.


Lic. Mariana Medina Suarez, MSc.
Docente de Español A: Literatura
Cel: 0986380800
e-mail: marianoeml@hotmail.com

CERTIFICACIÓN DE ANTIPLAGIO

Ing. Alejandro Crisóstomo Veliz Aguayo, PhD.

TUTOR DE TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Universidad Estatal Península de Santa Elena

En mi calidad de Tutor del presente trabajo **“DISEÑO DE HORMIGÓN CELULAR CON CEMENTO HÍBRIDO ALCALINO A BASE DE ZEOLITA DE LA CANTERA ISIDRO AYORA Y ESPUMANTE RV-2020 CON DENSIDADES DE 600 Y 800 KG/M³”** previo a la obtención del Título de **INGENIERO CIVIL** elaborado por el Sr. **JORGE DAVIE GONZÁLEZ RAMÍREZ** y la Srta. **LUCIA BELÉN VILLÓN SALINAS**, egresados de la **CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL**, Facultad **CIENCIAS DE LA INGENIERÍA** de la Universidad Estatal Península de Santa Elena, me permito declarar que una vez analizado en el sistema antiplagio **COMPILATIO**, luego de haber cumplido los requerimientos exigidos de valoración, en el presente proyecto ejecutado, se encuentra con **7%** de la valoración permitida, por consiguiente se procede a emitir el siguiente informe.

Atentamente,

f.  _____

Ing. Alejandro Crisóstomo Veliz Aguayo, PhD.

C.I. 0908182280

DOCENTE TUTOR



"DISEÑO DE HORMIGÓN CELULAR CON CEMENTO HÍBRIDO ALCALINO A BASE DE ZEOLITA DE LA CANTERA ISIDRO AYORA Y ESPUMANTE RV-2020 CON DENSIDADES DE 600 Y 800 KG/M3

7% Similitudes
 < 1% Texto entre comillas
 0% similitudes entre comillas
 2% Idioma no reconocido

Nombre del documento: Plagio prueba 8.docx
 ID del documento: 314f4fa5b4845d98808f884e537947bfe7662642
 Tamaño del documento original: 62.19 KB
 Autores: Lucía Villón Salinas, Jorge González Ramírez

Depositante: Lucía Villón Salinas
 Fecha de depósito: 14/7/2023
 Tipo de carga: url_submission
 fecha de fin de análisis: 14/7/2023

Número de palabras: 9256
 Número de caracteres: 58.756

Ubicación de las similitudes en el documento:



Fuentes principales detectadas

N°	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
1	Estudio del hormigón celular /var/ftp/.../5000/6841/3/CD-5165.pdf.doc 2 fuentes similares	1%		Palabras idénticas : 1% (100 palabras)
2	Documento de otro usuario #053881 El documento proviene de otro grupo 2 fuentes similares	< 1%		Palabras idénticas : < 1% (74 palabras)
3	repositorio.upse.edu.ec https://repositorio.upse.edu.ec/bitstream/46000/9219/4/UPSE-TIC-2023-0012.pdf	< 1%		Palabras idénticas : < 1% (78 palabras)
4	localhost Diseño de empresa manufacturera de productos prefabricados con mate... http://localhost:8080/xmiu/bitstream/redu/g/61717/3/ICT-032-2021-T12-MEMORIA DIGITAL FINAL- QUI...	< 1%		Palabras idénticas : < 1% (69 palabras)
5	www.paviconj-es.es ¿Qué es el hormigón celular? Ventajas y Usos https://www.paviconj-es.es/hormigon-precios/hormigon-celular/#:~:text=El hormigón celular, tiene resL...	< 1%		Palabras idénticas : < 1% (80 palabras)

Fuentes con similitudes fortuitas

N°	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
1	administracionytecnologiaparaeldiseno.azc.uam.mx https://administracionytecnologiaparaeldiseno.azc.uam.mx/publicaciones/memorias_cong2008/10.pdf	< 1%		Palabras idénticas : < 1% (33 palabras)
2	hdl.handle.net Estudio sobre cinco tipos de hormigones con propiedades especiales http://hdl.handle.net/10902/14519	< 1%		Palabras idénticas : < 1% (17 palabras)
3	dspace.ucuena.edu.ec Concreto celular para uso estructural http://dspace.ucuena.edu.ec/bitstream/123456789/25669/3/tesis.pdf.txt	< 1%		Palabras idénticas : < 1% (13 palabras)
4	www.redalyc.org LA INVESTIGACIÓN APLICADA: UNA FORMA DE CONOCER LAS REA... https://www.redalyc.org/pdf/440/44015082010.pdf	< 1%		Palabras idénticas : < 1% (13 palabras)
5	www.dspace.espol.edu.ec http://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/57072/1/T-113002 FRANCO MARÍA-MACÍAS GE...	< 1%		Palabras idénticas : < 1% (12 palabras)

Fuentes ignoradas Estas fuentes han sido retiradas del cálculo del porcentaje de similitud por el propietario del documento.

N°	Descripciones	Similitudes	Ubicaciones	Datos adicionales
1	Documento de otro usuario #522931 El documento proviene de otro grupo	16%		Palabras idénticas : 16% (1415 palabras)
2	Documento de otro usuario #55239F El documento proviene de otro grupo	4%		Palabras idénticas : 4% (336 palabras)

DEDICATORIA

El presente trabajo de titulación va dedicado exclusivamente a mis padres, quienes con diligencia inmensurable me facilitaron el camino para centrarme en mi formación profesional. Todos mis logros académicos también son de ellos.

Jorge Davie.

Le dedico el resultado de este trabajo de titulación a mi familia. A mis padres y hermanos por su apoyo emocional y económico. A mí novio Andrés G. por apoyarme siempre y motivarme a culminar esta etapa de mi vida. A mi tía Aida Navas por tenerme presente en sus oraciones. Gracias por creer en mí, por eso este logro es de ustedes.

Lucia Belén.

AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecerle a todo el cuerpo docente de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería que participaron activamente en mi proceso de formación profesional, por sus conocimientos y experiencias compartida. También un especial agradecimiento a mi tutor de tesis, Ing. Alejandro Veliz PhD, por su riguroso asesoramiento para darle forma al presente trabajo.

Jorge Davie.

En primer lugar, agradezco a Dios, por darme salud, sabiduría e inteligencia, y por haber sido mi guía a lo largo de mi carrera universitaria.

A la Universidad Estatal Península de Santa Elena que me dio la oportunidad de ser parte de ella, y me ha permitido obtener mi tan ansiado título.

A los docentes de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería, por haber compartido sus conocimientos y experiencias. En especial al Ing. Alejandro Veliz por su dedicación, paciencia y por brindarnos su apoyo durante este largo proceso y al Ing. Richard Ramírez quien compartió conmigo sus conocimientos y siempre estuvo pendiente de nuestros avances.

Agradezco a todos mis compañeros, los cuales muchos de ellos se han convertido en mis amigos. En especial al Ing. Michael Alomoto, quien me brindo su apoyo y conocimientos en los ensayos de este trabajo de titulación.

Lucia Belén.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN	ii
DECLARACIÓN DE AUTORÍA	iii
CERTIFICACIÓN DEL TUTOR	iv
CERTIFICACIÓN DE GRAMATOLOGÍA	v
CERTIFICACIÓN DE ANTIPLAGIO	vi
DEDICATORIA.....	viii
AGRADECIMIENTOS.....	x
TABLA DE CONTENIDO.....	xii
LISTA DE FIGURAS	xvi
LISTA DE TABLAS	xix
RESUMEN	xxii
ABSTRACT.....	xxiii
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	1
1.1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	2
1.2. ANTECEDENTES.....	3
1.3. HIPÓTESIS	6
1.3.1. Hipótesis general.	6
1.3.2. Hipótesis específicas.....	7
1.4. OBJETIVOS.....	7
1.4.1. Objetivo general.	7
1.4.2. Objetivos específicos.	7
1.5. ALCANCE	8
1.6. VARIABLES.....	9
1.6.1. Variables independientes.	9

1.6.2.	Variables dependientes.	9
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....		10
2.1.	DEFINICIÓN DEL HORMIGÓN	10
2.2.	HORMIGÓN LIGERO	11
2.3.	HORMIGÓN CELULAR.....	12
2.3.1.	Composición y características del hormigón celular.	13
2.3.2.	Aplicación del hormigón celular en base a la densidad.	15
2.3.3.	Ventajas del hormigón celular.....	16
2.3.4.	Desventajas del hormigón celular.....	17
2.4.	MÉTODOS PARA LA ELABORACIÓN DEL HORMIGÓN CELULAR	18
2.4.1.	Hormigón celular con inclusión de aire.	18
2.4.2.	Hormigón celular con áridos livianos.	19
2.5.	AGENTE ESPUMANTE	19
2.5.1.	Equipo para generar espuma.	20
2.6.	DEFINICIÓN DEL CEMENTO.....	21
2.6.1.	Cemento Portland.	21
2.6.2.	Cemento hidráulico.....	22
2.7.	CEMENTO ALCALINO	23
2.8.	CEMENTO HIBRIDO	23
2.8.1.	Componentes.....	24
2.9.	ZEOLITA	24
2.9.1.	Zeolita en la construcción.	24
2.9.2.	Propiedades de la zeolita.....	25
2.10.	ACTIVADORES ALCALINOS.....	26
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA.....		27
3.1.	TIPO Y NIVEL DE INVESTIGACIÓN.....	27
3.1.1.	Tipo de investigación.....	27
3.1.2.	Nivel de investigación.....	27

3.2.	MÉTODO, ENFOQUE Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN.	27
3.2.1.	Método de investigación.	27
3.2.2.	Enfoque de la investigación.	28
3.2.3.	Diseño de la investigación.	28
3.3.	METODOLOGÍA DEL OE.1: CARACTERIZAR LOS MATERIALES COMPONENTES PRESELECCIONADOS PARA LA OBTENCIÓN DE HORMIGONES CELULARES.	28
3.3.1.	Agregado fino.	28
3.3.2.	Zeolita.	34
3.3.3.	Activador alcalino.	38
3.4.	METODOLOGÍA DEL OE.2: ELABORAR DOSIFICACIONES DE HORMIGONES CELULAR PATRÓN Y CON SUSTITUCIÓN DE CEMENTO POR ZEOLITA ACTIVADA CON SOLUCIÓN ALCALINA.	40
3.4.1.	Elaboración del método de dosificación.	40
3.4.2.	Pruebas preliminares en base a los materiales.	45
3.4.3.	Elaboración de las probetas.	48
3.4.4.	Hormigón celular patrón.	49
3.4.5.	Hormigón celular patrón con zeolita sin activar.	50
3.4.6.	Hormigón celular con zeolita activada.	51
3.5.	METODOLOGÍA DEL OE.3: EVALUAR PROPIEDADES FÍSICAS - MECÁNICAS CARACTERÍSTICAS DE LAS DISTINTAS DOSIFICACIONES OBTENIDAS DE HORMIGONES CELULARES.	60
3.5.1.	Propiedades en estado fresco y endurecido del hormigón.	60
3.5.2.	Ensayo de resistencia a la compresión.	64
3.6.	METODOLOGÍA DEL OE.4: DETERMINAR LOS COSTOS DE ELABORACIÓN DE HORMIGONES CELULARES CON CEMENTO HIDRÁULICO HE Y CEMENTO HÍBRIDO DE ZEOLITA ACTIVADA.	65
	CAPÍTULO IV: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	67
4.1.	ANÁLISIS DE RESULTADOS OE. 1: CARACTERIZAR LOS MATERIALES COMPONENTES PRESELECCIONADOS PARA LA OBTENCIÓN DE HORMIGONES CELULARES.	67

4.1.1.	Agregado fino.....	67
4.1.2.	Zeolita.....	69
4.1.3.	Activador alcalino.....	71
4.2.	ANÁLISIS DE RESULTADOS OE. 2: ELABORAR DOSIFICACIONES DE HORMIGONES CELULAR PATRÓN Y CON SUSTITUCIÓN DE CEMENTO POR ZEOLITA ACTIVADA CON SOLUCIÓN ALCALINA	73
4.3.	ANÁLISIS DE RESULTADOS OE. 3: EVALUAR PROPIEDADES FÍSICA - MECÁNICAS CARACTERÍSTICAS DE LAS DISTINTAS DOSIFICACIONES OBTENIDAS DE HORMIGONES CELULARES	80
4.3.1.	Propiedades en estado fresco y endurecido.....	80
4.3.2.	Resistencia a la compresión.....	82
4.4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS OE. 4: DETERMINAR LOS COSTOS DE ELABORACIÓN DE HORMIGONES CELULARES CON CEMENTO HIDRÁULICO HE Y CEMENTO HÍBRIDO DE ZEOLITA ACTIVADA	103
4.4.1.	Precios referenciales de los materiales.....	103
4.4.2.	Precios unitarios de hormigones celulares por m3.....	106
4.5.	SOLUCIÓN AL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	109
	CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	110
5.1.	CONCLUSIONES	110
5.2.	RECOMENDACIONES	111
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	113
	ANEXOS	122

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 Hormigón con árido ligero, hormigón sin finos y hormigón celular.....	11
Figura 2 Bomba neumática de diafragma.	21
Figura 3 Diagrama de flujo de pruebas preliminares en base a la preselección de la materia prima.	47
Figura 4 Relación de espuma vs cemento para 1 m ³ de hormigón celular de Mezcla P.....	49
Figura 5 Relación de espuma vs cemento para 1 m ³ de hormigón celular de Mezcla P.1.....	50
Figura 6 Relación de espuma vs cemento para 1 m ³ de hormigón celular de Mezcla 1.....	51
Figura 7 Relación de espuma vs cemento para 1 m ³ de hormigón celular de Mezcla 2.....	52
Figura 8 Relación de espuma vs cemento para 1 m ³ de hormigón celular de Mezcla 3.....	53
Figura 9 Relación de espuma vs cemento para 1 m ³ de hormigón celular de Mezcla 4.....	54
Figura 10 Relación de espuma vs cemento para 1 m ³ de hormigón celular de Mezcla 5.....	55
Figura 11 Relación de espuma vs cemento para 1 m ³ de hormigón celular de Mezcla 6.....	56
Figura 12 Relación de espuma vs cemento para 1 m ³ de hormigón celular de Mezcla 7.....	57
Figura 13 Relación de espuma vs cemento para 1 m ³ de hormigón celular de Mezcla 8.....	58
Figura 14 Relación de espuma vs cemento para 1 m ³ de hormigón celular de Mezcla 9.....	59
Figura 15 Relación Modulo Elástico con contenido de aire.	61
Figura 16 Curva granulométrica de la arena gruesa.	67

Figura 17 Curva granulométrica de la zeolita por método de hidrómetro.....	70
Figura 18 Distribución volumétrica porcentual de hormigones celulares D600.	75
Figura 19 Distribución volumétrica porcentual de hormigones celulares D600.	76
Figura 20 Distribución volumétrica porcentual de hormigones celulares D800.	78
Figura 21 Distribución volumétrica porcentual de hormigones celulares D800.	79
Figura 22 Variación de la resistencia a la compresión a distintas edades de hormigones celulares D600.....	85
Figura 23 Variación de la resistencia a la compresión a distintas edades de hormigones celulares D600 con una relación activador/zeolita del 0,40.....	86
Figura 24 Variación de la resistencia a la compresión a distintas edades de hormigones celulares D600 con una relación activador/zeolita del 0,45.....	86
Figura 25 Variación de la resistencia a la compresión a distintas edades de hormigones celulares D600 con una relación activador/zeolita del 0,50.....	87
Figura 26 Variación de la resistencia a la compresión a distintas edades de hormigones celulares D600 con material cementante 50 % P. + 50 % Z.	87
Figura 27 Variación de la resistencia a la compresión a distintas edades de hormigones celulares D600 con material cementante 60 % P. + 40 % Z.	88
Figura 28 Variación de la resistencia a la compresión a distintas edades de hormigones celulares D600 con material cementante 70 % P. + 30 % Z.	88
Figura 29 Resistencia a la compresión bajo la variable % Cemento + % Zeolita en muestras D600.....	89
Figura 30 Resistencia a la compresión bajo la variable Activador/Zeolita en muestras D600.....	90
Figura 31 Variación de la resistencia a la compresión a distintas edades de hormigones celulares D800.....	94
Figura 32 Variación de la resistencia a la compresión a distintas edades de hormigones celulares D800 con una relación activador/zeolita del 0,40.....	95
Figura 33 Variación de la resistencia a la compresión a distintas edades de hormigones celulares D800 con una relación activador/zeolita del 0,45.....	95
Figura 34 Variación de la resistencia a la compresión a distintas edades de hormigones celulares D800 con una relación activador/zeolita del 0,50.....	96
Figura 35 Variación de la resistencia a la compresión a distintas edades de hormigones celulares D800 con material cementante 50 % P. + 50 % Z.	96

Figura 36 Variación de la resistencia a la compresión a distintas edades de hormigones celulares D800 con material cementante 60 % P. + 40 % Z.....	97
Figura 37 Variación de la resistencia a la compresión a distintas edades de hormigones celulares D800 con material cementante 70 % P. + 30 % Z.....	97
Figura 38 Resistencia mecánica bajo la variable % Cemento + % Zeolita en muestras D800.....	98
Figura 39 Resistencia mecánica bajo la variable Activador/Zeolita en muestras D800.....	99
Figura 40 Comportamiento mecánico de muestras D600 y D800 a edades tardías.	102

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Clasificación de hormigones según su peso unitario.	10
Tabla 2 Aproximación general de propiedades mecánicas de hormigones celulares con un hormigón convencional HM.....	12
Tabla 3 Propiedades mecánicas referentes de hormigón celular como geo relleno para reducción de cargas.	13
Tabla 4 Datos técnicos del agente espumante RV-2020.....	20
Tabla 5 Especificaciones granulometría árido fino NTE INEN 872.	29
Tabla 6 Composición de la zeolita.	35
Tabla 7 Propiedades físicas del hidróxido de sodio al 50%.....	38
Tabla 8 Propiedades físicas del silicato de sodio líquido 3.2.....	39
Tabla 9 Variables del método empleado	41
Tabla 10 Densidades preliminares de los materiales usados.....	44
Tabla 11 Listado de mezclas de hormigones celulares por diseñar.	45
Tabla 12 Cálculos varios, obtención Mezcla P de densidades de 0,6 a 0,9 g/cm ³	49
Tabla 13 Cálculos varios, obtención Mezcla P.1 de densidades de 0,6 a 0,9 g/cm ³	50
Tabla 14 Cálculos varios, obtención Mezcla 1 de densidades de 0,6 a 0,9 g/cm ³	51
Tabla 15 Cálculos varios, obtención Mezcla 2 de densidades de 0,6 a 0,9 g/cm ³	52
Tabla 16 Cálculos varios, obtención Mezcla 3 de densidades de 0,6 a 0,9 g/cm ³	53
Tabla 17 Cálculos varios, obtención Mezcla 4 de densidades de 0,6 a 0,9 g/cm ³	54
Tabla 18 Cálculos varios, obtención Mezcla 5 de densidades de 0,6 a 0,9 g/cm ³	55
Tabla 19 Cálculos varios, obtención Mezcla 6 de densidades de 0,6 a 0,9 g/cm ³	56
Tabla 20 Cálculos varios, obtención Mezcla 7 de densidades de 0,6 a 0,9 g/cm ³	57

Tabla 21 Cálculos varios, obtención Mezcla 8 de densidades de 0,6 a 0,9 g/cm ³	58
Tabla 22 Cálculos varios, obtención Mezcla 9 de densidades de 0,6 a 0,9 g/cm ³	59
Tabla 23 Ecuaciones de predicción del módulo de elasticidad para el mortero celular.....	62
Tabla 24 Modulo de finura del agregado fino – arena gruesa.....	68
Tabla 25 Peso volumétrico del agregado fino.	68
Tabla 26 Contenido de humedad del agregado fino.....	69
Tabla 27 Densidad Saturada Superficialmente Seca y absorción del agregado fino.	69
Tabla 28 Peso volumétrico de la zeolita para elaboración de hormigón celular. .	70
Tabla 29 Contenido de humedad de la zeolita para elaboración de hormigón celular.	71
Tabla 30 Densidad Saturada Superficialmente Seca y absorción de la zeolita. ...	71
Tabla 31 Cantidades necesarias en el proceso de disolución de NaOH con 50 % de pureza.	72
Tabla 32 Cantidades necesarias para la creación de la solución activadora alcalina.	72
Tabla 33 Propiedades físicas de la solución activadora.	73
Tabla 34 Dosificaciones de hormigones celulares D600.	74
Tabla 35 Dosificaciones de hormigones celulares D800.	77
Tabla 36 Datos de asentamiento de la mezcla D600 y D800.....	80
Tabla 37 Porcentaje de Fluidez obtenido del ensayo mesa de flujo.....	81
Tabla 38 Densidad a distintas edades de hormigones celulares D600.....	82
Tabla 39 Resistencia a la compresión a distintas edades de hormigones celulares D600.....	84
Tabla 40 Porcentajes de pérdida o ganancia de resistencia a la compresión de muestras D600 con respecto a la mezcla patrón.	91
Tabla 41 Variación de densidad a distintas edades de hormigones celulares D800.	92
Tabla 42 Variación de resistencia a la compresión a distintas edades de hormigones celulares D800.....	93

Tabla 43 Porcentajes de pérdida o ganancia de resistencia a la compresión de muestras D800 con respecto a la mezcla patrón.	100
Tabla 44 Porcentajes de pérdida o ganancia de resistencia a la compresión de muestras D800 con respecto a la mezcla patrón de zeolita sin activar.	100
Tabla 45 Precios referenciales de la materia prima de la solución activadora alcalina.	104
Tabla 46. Precio referencial de la solución activado alcalina.	104
Tabla 47 Precios referenciales de la materia prima del espumante RV-2020....	104
Tabla 48 Precio referencial de la solución concentrada RV-2020.....	105
Tabla 49 Precio referencial del espumante RV-2020.....	105
Tabla 50 Precios referenciales de los materiales empleado en las dosificaciones.	105
Tabla 51 Precios unitarios por m ³ de hormigones celulares D600 sin considerar mano de obra y equipos.....	106
Tabla 52 APU de mezclas de interés D600.....	106
Tabla 53 Precios unitarios por m ³ de hormigones celulares D800 sin considerar mano de obra y equipos.....	107
Tabla 54 APU de mezclas de interés D800.....	107
Tabla 55 Emisiones de CO ₂ referentes de materiales usados.....	109
Tabla 56 Emisiones de CO ₂ de cemento híbrido alcalino.	109

“DISEÑO DE HORMIGÓN CELULAR CON CEMENTO HÍBRIDO ALCALINO A BASE DE ZEOLITA DE LA CANTERA ISIDRO AYORA Y ESPUMANTE RV-2020 CON DENSIDADES DE 600 Y 800 KG/M³”

Autores: Jorge Davie González Ramírez y Lucia Belén Villón Salinas

Tutor: Ing. Alejandro Crisóstomo Veliz Aguayo, PhD.

RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo analizar el desempeño de un cemento híbrido conformado por cemento hidráulico tipo HE y cemento alcalino, usado para la creación de un hormigón celular con densidades de 600 y 800 Kg/m³, esto se llevó a cabo con el uso parcial de zeolita como componente cementante activada por una solución alcalina de hidróxido de sodio, en concentración de 12 M, y silicato de sodio en proporción 1 (NaOH): 2 (Na₂SiO₃), con una relación de 0,40, 0,45 y 0,50 del peso de zeolita, y el volumen de espuma preformada RV. necesario para alcanzar las densidades deseadas sin comprometer en gran medida las propiedades mecánicas de un hormigón. Se cuantificó la influencia positiva porcentual de la zeolita bajo los mejores escenarios en un notable mejoramiento de la resistencia a la compresión de hormigones celulares. El estudio concluye como mejor escenario al diseño de material cementante de 70% Cemento HE + 30% Zeolita + 0,45 activador/zeolita en ambas densidades.

Palabras Clave: Cemento Híbrido, Cemento Alcalino, Zeolita, Hidróxido de Sodio, Hormigón Celular.

“DESIGN OF CELLULAR CONCRETE WITH ZEOLITE-BASED ALKALINE HYBRID CEMENT FROM THE ISIDRO AYORA QUARRY AND RV-2020 FOAMING WITH DENSITIES OF 600 AND 800 KG/M³”

Authors: Jorge Davie González Ramírez y Lucia Belén Villón Salinas

Tutor: Ing. Alejandro Crisóstomo Veliz Aguayo, PhD.

ABSTRACT

The objective of the present research was to analyze the performance of a hybrid cement made up with type HE hydraulic cement and alkaline cement, used for the creation of a cellular concrete with densities of 600 and 800 Kg/m³, this was carried out with the partial use of zeolite as a cementing component activated by an alkaline solution of sodium hydroxide, at a concentration of 12 M, and sodium silicate in proportion 1 (NAOH): 2 (NA₂SiO₃), with a ratio of 0,40, 0,45 and 0,50 of the weight of zeolite, river sand as a fine aggregate and the volume of RV-2020 preformed foam necessary to reach the desired densities without greatly damaging the mechanical properties of a concrete. The percentage positive influence of the zeolite was quantified under the best scenarios in a notable improvement of the compressive strength of cellular concretes. The study concludes as the best scenario the design of cementing material of 70% HE Cement + 30% Zeolite + 0,45 activator/zeolite in both densities.

Key words: *Hybrid Cement, Alkaline Cement, Zeolite, Sodium Hydroxide, Cellular Concrete.*

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

La constante evolución de la industria cementera ha beneficiado de una vasta variedad de aglomerantes al sector de la construcción civil, predominando por excelencia el cemento Portland. El alto grado de aceptación del cemento Portland ordinario se le atribuye por sus buenas prestaciones, relación calidad/precio y el fácil acceso a las materias primas a partir de las cuales se fabrica. Sin embargo, su masiva demanda acarrea problemáticas globales, principalmente ambientales como la sobreexplotación de canteras para la extracción de materia prima, alta contaminación por medio de emisión de gases en su proceso de manufacturación (5 – 7% de CO₂), el consumo de energía primaria (3 %), entre otros. (Torres-Carrasco y Puertas, 2017)

La línea de investigación, creación, estudio y perfeccionamiento de materiales con propiedades cementosas se ve en la necesidad de buscar nuevas alternativas más sustentables con el medio ambiente. Así se da lugar a los denominados cementos alcalinos y cementos híbridos que dan un nuevo aire a la industria cementera y a su vez a la constructiva, ofreciendo propiedades físicas/mecánicas similares al cemento convencional, o incluso mejores.

Los mencionados cementos alcalinos son productos resultantes de una activación alcalina de aluminosilicatos. Mientras que los cementos híbridos son el resultado de la combinación de los conocimientos del cemento Portland + cementos alcalinos (Rendón Belmonte, y otros, 2015). Con esto se pretende reducir el contenido de Clinker y elevadas adiciones de minerales en la dosificación, sin comprometer las propiedades físicas, químicas y mecánicas de la mezcla en general.

La presente investigación refiere al estudio del desempeño/utilidad de un cemento híbrido propiamente elaborado, para su implementación en dosificaciones de un hormigón celular a base de espuma preformada, con bajas densidades, en donde muestra especial interés en el comportamiento de propiedades como resistencia a la compresión, y costos de elaboración.

1.1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

El hormigón hoy en día es el material más usado en la industria de la construcción a nivel mundial, la alta densidad de los hormigones convencionales, es de alrededor de 2350 kg/m^3 , esto ha sido un inconveniente donde la carga muerta es un factor importante. Es un hormigón muy pesado para ser un material práctico, sobre todo el uso de mampostería como bloques alivianados de entrepiso, bloques, mampostería y azoteas, ya que estos elementos no estructurales están diseñados para soportar las cargas vivas (personas y mobiliario) y después dichas cargas se transmiten a las vigas, estas a las columnas, estas a la cimentación y por último al terreno (CONTRERAS, 2016). En consecuencia, tenemos construcciones pesadas, con vigas de gran peralte, además de columnas robustas y cimentaciones amplias o complejas, así, todo esto nos lleva a tener estructuras con un peso y costo muy elevado.

De acuerdo con (Seguí Seguí, 2019) desde el punto de vista ambiental, sabemos que cada año se fabrica más de 4 000 millones de toneladas de cemento, esto representa alrededor del 8 % de las emisiones mundiales de CO_2 , en promedio se produce 0,4 Ton de CO_2 por 1 Ton de cemento, así mismo, dicha cantidad de cemento demanda el uso de 1,7 Ton de agua y 4,798 MJ en recursos energéticos. Esto se ha convertido en un problema al generar un gran impacto para el medio ambiente, por ello nace la necesidad de implementar hormigones que, conservando buenas prestaciones mecánicas, sean más amigables con el planeta.

Para tratar de mejorar estas cualidades negativas del hormigón, se ha desarrollado a través de los años, diversas investigaciones con sorprendentes resultados como los hormigones celulares o aireados, con los que se logran densidades que fluctúan entre los 200 y 1920 Kg/m^3 . (Pizarro Retamal, 2020)

Los cementos activados alcalinamente o geo-polímeros pueden obtenerse combinando una disolución fuertemente alcalina (activador) y un material rico en aluminio y sílice, de fuentes naturales como arcillas o zeolitas. En ciertos casos estos cementos no solo igualan las propiedades del cemento convencional, sino que

las superan. Además, por su fuente de aluminio y sílice requiere de muy poca energía.

Ante lo expuesto, los cementos alternativos alcalinos surgen como una opción viable por si solos en un hormigón normal, pero; ¿qué beneficios consecuentes podría tener el uso de un cemento híbrido (cemento convencional + cemento alcalino) en la elaboración de un hormigón celular?

1.2. ANTECEDENTES

En el ámbito internacional, el estudio de cementos alternativos, específicamente los cementos alcalinos e híbridos es muy ambiguo aún, puesto que esta práctica es relativamente nueva, y los mismos buscan explorar por medio de correlaciones las condiciones influyentes en el resultado final, que, debido a la variación de las materias primas, es difícil obtener conclusiones consistentes, por lo que su elaboración requiere mucho cuidado y una composición correcta de los materiales. Y a pesar de que la mayoría de los investigadores han observado propiedades complejas y algunos conflictos en sus hallazgos, están en la misma plataforma para establecer un estándar fijo (Li, Zhang, Shi, y Zhang, 2018); (Hassan, Arif, y Shariq, 2019); (Tayeh, Hamada, Almeshal, y Bakar, 2022). Aun así, su aceptación en la industria cementera es cada vez más atractiva, que podría llegar a ser una “línea de investigación prioritaria”, por su reducido impacto medioambiental en comparación al cemento Portland convencional (Torres-Carrasco y Puertas, 2017).

El tipo y proporción del activador en la elaboración de cementos híbridos alcalinos actúa directamente en el material precursor puzolánico y por ende en las propiedades físico-mecánicas del cemento resultante. Payá Bernabeu, Monzó, Borrachero, Soriano, y Tashima (2022) en su estudio “ALTERNATIVE ACTIVATORS IN ALKALI ACTIVATED CEMENTS” (Activadores alternativos en cementos activados con álcali) concluye que los activadores de base sílice no pueden ser usados de forma independiente, debido a su elevada acidez (sílice fundamentalmente), mientras que los de base alcalina sí pueden ser usados de forma independiente. La combinación de ambos tipos de residuos puede mejorar el comportamiento mecánico. Por otra parte, Millán Corrales (2019) argumenta que,

mediante un estudio técnico comparativo de activadores de alta y baja alcalinidad, los sistemas cementantes híbridos activados con alta alcalinidad reflejan peores resultados mecánicos que los de baja alcalinidad. De hecho, a través del estudio experimental de varias soluciones activadoras disponibles, Ibrahim y Maslehuddin (2021) en “AN OVERVIEW OF FACTORS INFLUENCING THE PROPERTIES OF ALKALI-ACTIVATED BINDERS” (Una descripción general de los factores que influyen en las propiedades de los aglutinantes activados por álcali) destaca que la combinación de silicato de sodio (Na_2SiO_3) e hidróxido de sodio (NaOH) son la más adecuada para lograr características físico-mecánicas superiores, además Sánchez Herrero (2017) revela que el Na_2SiO_3 interactúa de buena manera con la composición del cemento Portland. Así, otros estudios técnicos como los de Rabie, Irshidat, y Al-Nuaimi (2022); Tekle, Hertwig, & Holschemacher (2021); Shi, y otros (2021); e Ibrahim, Megat Johari, Rahman, y Maslehuddin (2017) plantean esta combinación en diferentes concentraciones y relaciones que dan un indicio del comportamiento tentativo influyente esperado.

Así mismo, el tipo y tiempo de curado de hormigones de cementos híbridos alcalinos tiene especial consecuencia en el tiempo de desarrollo de sus prestaciones físico-mecánicas. Athira, Bahurudeen, Saljas, y Jayachandran (2021) en su estudio “INFLUENCE OF DIFFERENT CURING METHODS ON MECHANICAL AND DURABILITY PROPERTIES OF ALKALI ACTIVATED BINDERS” (Influencia de diferentes métodos de curado en las propiedades mecánicas y de durabilidad de los aglutinantes activados por álcali) concluye que el curado con agua no es un método muy apreciado debido a la lixiviación del activador, el curado térmico refleja mejores propiedades mecánicas tempranas, y que el curado a temperatura ambiente arroja mejores propiedades mecánicas tardías.

En cuanto al hormigón celular, también es una técnica innovadora relativamente nueva, y existen escasos estudios de la inclusión de cementos híbridos en su elaboración, dado que el mayor factor influyente en este tipo de hormigón es el comportamiento del aditivo o agente espumante, mas no en el aglutinante. Sin embargo, esto no quiere decir que su preparación sea sencilla. Por ejemplo, Kadela, Kukielka, y Małek (2020); Yoc Chamalé (2018); y Lazo Arraya (2017) enfatizan la influencia de la estabilidad de la burbuja en la disminución del peso unitario en el

proceso de mezclado, así los factores claves en la producción de hormigón celular incluyen la presurización del agente espumante a presión estable, velocidad de rotación de mezclado constante y tiempo específico máximo de mezclado, de lo contrario puede resultar la desaparición de burbujas, y un evidente aumento en el peso unitario de la mezcla. Por otra parte, Yu, Liang, Ni, Oyeyi, y Tighe (2020) asegura que propiedades mecánicas del hormigón celular tienen fuertes correlaciones con la relación del área de poro, el grosor promedio de la pared de la burbuja y los directores de forma (circularidad y solidez). Además, al tratarse de una práctica poco explorada, aún no se crean métodos normativos de dosificación e investigaciones técnicas experimentales como las de Huaman Quispe y Villanueva Ore (2020) e Izquierdo Cárdenas y Ortega Rivera (2017) analizan el método gravimétrico de un hormigón convencional como ajustable aproximado para un hormigón celular.

En el ámbito nacional, la zeolita ha sido ampliamente investigada como potencial material precursor puzolánico. Maldonado Maldonado y Medina Robalino (2021) afirma que la zeolita natural de mejor calidad se encuentra en una mayor elevación sobre nivel del mar. De manera complementaria, Fernández Álvarez y Ureña Aguirre (2021) considera la influencia de los ambientes geológicos en la variación de densidad de un mismo tipo de zeolita, además de que varios tipos de zeolita pueden coexistir. Así mismo, recalca la importancia de la morfología y relación de Si/Al en las zeolitas estudiadas para cementos híbridos, y señala que entre más alto y/o aproximado sea esta al cemento comercial, mejor interactúa como aglutinante. Salcedo Rivera y Coello Fiallos (2021) enfatiza la alta capacidad puzolánica de las mismas zeolitas estudiadas, por los trabajos antes mencionados basándose en las especificaciones de la norma ASTM C-618, donde el 70 % de la composición química debe ser de óxido de silicio (SiO_2), óxido de aluminio (Al_2O_3) y óxido de hierro (Fe_2O), que dichas zeolitas superan valores alrededor del 90 %.

En lo que respecta al tipo de activador predominantes están; el hidróxido de sodio (NaOH), el silicato de sodio (Na_2SiO_3). Y como tipo de curado se destacan el curado térmico y el curado a temperatura ambiente. Oñate Miranda, Paredes Fierro, y Andrade Valle (2022); y Freré Cárdenas, Torres Monroy, y Chavez Moncayo (2018) usan esta combinación, en proporciones similares, sin embargo, difieren en

el método de curado, mostrando una mejora significativa con el método térmico sobre el de temperatura ambiente. Ulloa, Allauca, y Reinoso (2021) afirma que la temperatura de curado de 60 ° por 24 h es la óptima.

Existen escasos trabajos de hormigón celular en el país, por la complejidad de este. Conza Luzón (2021) y Caicedo Barona, Tipán Quinatoa, y Morales Gubio (2019) analizan dosificaciones de hormigón celular por el método gravimétrico, que mediante pequeños ajustes de cantidades obtienen las densidades promedias de 1800 kg/m³, y destacan la importancia de un estricto control de calidad, puesto que la variación de resultados es significativa por los mencionados ajustes.

En el ámbito local, no hay precedentes de cementos híbridos activados alcalinamente, sin embargo, sí se han implementado puzolanas en la creación de morteros y hormigones. Trabajos como los de Castillo Jumbo, Reyes Villamar, y Garcés Vargas (2019); Garcés Vargas, Flores De la Rosa, y Huamán Marcillo (2016); y Orrala Yagual, Gómez Suárez, y Ramírez Palma (2015) analizan los beneficios de puzolanas artificiales como arcillas calcinadas, polvo de vidrio y ceniza de cultivos de maíz. Por otra parte, Chipantiza Punina, Figueroa Franco, y Ramírez Palma (2021) plantea el potencial uso de una zeolita de procedencia local como agregado fino.

La línea de investigación de hormigones celulares apenas está comenzando en la provincia de Santa Elena. Gómez Del Pezo, Mora Figueroa, y Ramírez Palma (2022) analiza dosificaciones de hormigón celular, con espumante RV-2020, de 1200 y 1400 kg/m³ mediante el método ACI 523.3R-14. Alomoto Limones, Mejillones Suárez, y Veliz Aguayo (2023) estudian el desempeño de varios tipos de espumantes en hormigones celulares de 800 kg/m³, entre ellos el RV-2020.

1.3. HIPÓTESIS

1.3.1. Hipótesis general.

La obtención de un hormigón celular de baja densidad utilizando un cemento híbrido alcalino de zeolita activada permitirá evaluar y justificar los

beneficios mecánico-económicos del mismo en contraste al uso de cemento convencional.

1.3.2. Hipótesis específicas.

H.E.1.: La caracterización de los materiales componentes preseleccionados para la obtención de hormigones celulares permitirá definir sus propiedades física-mecánicas previas al diseño de dosificaciones.

H.E.2.: La elaboración dosificaciones de hormigones celulares patrón y de zeolita activada permitirá obtener hormigones celulares de densidades 600 y 800 kg/m³.

H.E.3.: La evaluación de propiedades física-mecánicas características de las distintas dosificaciones obtenidas de hormigones celulares con cemento híbrido alcalino permitirá analizar la tendencia del comportamiento mecánico consecuente.

H.E.4.: La determinación de los costos de elaboración de hormigones celulares con cemento hidráulico HE y cemento híbrido de zeolita activada permitirá realizar su respectivo análisis comparativo.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo general.

Obtener un hormigón celular de baja densidad utilizando un cemento híbrido alcalino de zeolita activada en una determinada dosificación idónea para un consecuente beneficio mecánico-económico en contraste al uso de cemento convencional.

1.4.2. Objetivos específicos.

O.E.1.: Caracterizar los materiales componentes preseleccionados para la obtención de hormigones celulares, mediante ensayos de laboratorio normativos,

para definir previas propiedades física-mecánicas influyentes en la elaboración de dosificaciones.

O.E.2.: Elaborar dosificaciones de hormigones celulares patrón y con sustitución de cemento por zeolita activada con solución alcalina, usando un método experimental con volúmenes aparentes que se ajuste para llegar a densidades requeridas de 600 y 800 kg/m³.

O.E.3.: Evaluar las propiedades física-mecánicas características de las distintas dosificaciones obtenidas de hormigones celulares con cemento híbrido alcalino, mediante ensayos de laboratorio sobre morteros para analizar la tendencia del comportamiento mecánico consecuente por dosificación.

O.E.4.: Determinar los costos de elaboración de hormigones celulares con cemento hidráulico HE y cemento híbrido de zeolita activada, mediante un análisis de precios unitarios de 1 m³ de mezcla, para su respectivo análisis comparativo.

1.5. ALCANCE

El presente trabajo de investigación esta direccionado al estudio y el análisis de las cantidades de los materiales a emplear en la elaboración del hormigón celular con cemento híbrido activado alcalinamente con el mejor desempeño con densidades de 600 kg/m³ y 800 kg/m³ para así contribuir al desarrollo de hormigones livianos en Ecuador, innovando nuevas técnicas en el sector de la construcción.

Se hará énfasis en dos variables importantes, para el desarrollo de esta investigación: el porcentaje parcial de zeolita que se va a utilizar como material cementante y la proporción de la solución activadora que interactúa con ella.

Luego se explicará detalladamente en la metodología para la realización de los ensayos de laboratorio en las mezclas de hormigón celular y se evaluarán los resultados obtenidos de forma cuantitativa. Se comparará las dosificaciones realizadas para determinar el comportamiento mecánico más relevante del

hormigón, como la resistencia a la compresión a los 28 días, en cuanto al porcentaje de zeolita y el porcentaje de solución activadora.

Además, se evaluará los costos mediante el análisis de precios unitarios, que pretende ser un aporte base para una línea de investigación de diseño de hormigones celulares con cementos alternativos, incentivando prácticas de construcción sustentables con el medio ambiente en la provincia de Santa Elena.

1.6. VARIABLES

1.6.1. Variables independientes.

- Diseño de un hormigón celular con densidades de 600 y 800 Kg/m³.
- Porcentaje de zeolita como material cementante de sustitución.
- Porcentaje de solución activadora por cantidad de zeolita.

1.6.2. Variables dependientes.

- Resistencia a la compresión de hormigones celulares de densidad 600 kg/m³ y 800 kg/m³.
- Costo de elaboración de hormigones celulares con cemento híbrido alcalino.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. DEFINICIÓN DEL HORMIGÓN

El Comité ACI 318 (2019) refiere al hormigón o hormigón como una mezcla de cemento, agregado fino, agregado grueso y agua, con o sin aditivos. Dependiendo de las dosificaciones de cada uno de los componentes del hormigón, existe una tipología de hormigones. Li Z. (2011) clasifica al hormigón en cuatro categorías por su peso unitario de la siguiente manera:

Tabla 1

Clasificación de hormigones según su peso unitario.

Clasificación	Peso unitario (kg/m³)
Hormigón ultraligero	< 1200
Hormigón ligero	1200 – 1800
Hormigón normal	~ 2400
Hormigón pesado	> 3200

Nota: Extraído de Li Z. (2011)

Se recomienda que el hormigón ultraligero se utilice para construir miembros no estructurales. El hormigón ligero se puede utilizar para construir elementos estructurales y no estructurales, según su composición específica. Los hormigones de peso normal son hormigones de uso común en la construcción de infraestructuras y edificios. El hormigón pesado se utiliza para construir algunas estructuras especiales, como laboratorios, salas de examen de hospitales y plantas nucleares, donde se necesita protección radioactiva para minimizar su influencia en la salud de las personas. (Li Z. , 2011)

2.2. HORMIGÓN LIGERO

González Lara (2018) clasifica al hormigón ligero como aquel que se identifica por tener una densidad aparente inferior a la del hormigón convencional, con densidades que están por debajo de los 2000 kg/m³. Sin embargo, se puede clasificar distintos tipos de hormigones ligeros esto en función de cómo logran la reducción de la densidad o su uso y, por ello, existen también diferentes definiciones:

- Utilización de áridos de menor densidad que los convencionales, que pueden ser tanto naturales como artificiales.
- Eliminación de la dosificación de un hormigón convencional las fracciones más finas, generalmente la arena, empleando solo árido grueso de densidad normal o ligero. Esto produce un hormigón con grandes huecos intersticiales.
- Incorporando en un hormigón fino, sin gruesos, burbujas de gas, lo que se denomina hormigón celular. Dentro de este tipo se puede diferenciar los hormigones aireados, con burbujas de aire creadas por la reacción química de un gas, y los hormigones espumados, donde se introduce en la mezcla un agente espumante para crear los huecos y bajar la densidad del hormigón.

Figura 1

Hormigón con árido ligero, hormigón sin finos y hormigón celular.



Nota: Detalle macro de hormigones ligeros. Extraído de González Lara (2018)

2.3. HORMIGÓN CELULAR

Según el comité del ACI el hormigón celular es un tipo de hormigón hecho con cemento, agua y espuma preformada para formar un material endurecido de bajas densidades. Estas mezclas pueden incluir agregados y otros componentes de materiales que incluyen, entre otros, cenizas volantes y mezclas químicas.” (Comité ACI 523, 2006)

El problema de estos hormigones estriba en la dificultad de conseguir el volumen y las densidades adecuadas, ya que se debe provocar la reacción del espumante con un chorro de agua a alta presión durante un tiempo determinado, lo cual puede crear cierta variabilidad en el resultado final. (González Lara, 2018)

Tabla 2

Aproximación general de propiedades mecánicas de hormigones celulares con un hormigón convencional HM.

Densidad (kg/m³)	Resistencia (MPa)	Conductividad térmica (W/m^oK)
2400	25	1,63
800	5,6	0,22
600	4,8	0,16
500	3,5	0,13
400	2,2	0,11

Nota: Extraído de González Lara (2018)

De acuerdo, con la empresa alemana Geofill (2016) se puede emplear el hormigón celular como un geo relleno para aplicaciones geotécnicas y subterráneas y así obtener rellenos de reducción de cargas.

En la Tabla 3 se detallan las propiedades mecánicas del hormigón celular de geo relleno para densidades de 250 kg/m³ de acuerdo a las necesidades de los proyectos.

Tabla 3

Propiedades mecánicas referentes de hormigón celular como geo relleno para reducción de cargas.

Densidad (kg/m³)	Resistencia (MPa)	Conductividad térmica (W/m°K)
256,30 - 320,37	0,14	0,50
304,35 -400,46	0,28	0,60
400,46 - 480,55	0,55	0,67
480,55 - 576,66	0,83	0,76
560,65 - 608,70	1,10	0,9
656,76 y más	2,07	1

Nota: Extraído de Geofill (2016).

2.3.1. Composición y características del hormigón celular.

El hormigón celular se obtiene al incorporar en una mezcla de cemento y arena una gran cantidad de microburbujas (las cuales se logran al mezclar un agente espumante con agua utilizando aire comprimido).

2.3.1.1. Propiedades del hormigón celular.

En su proyecto investigativo Cervantes Abarca (2008) identifica las siguientes propiedades para el hormigón celular:

- a) **Absorción.** Varias pruebas realizadas a lo largo del tiempo han demostrado que el agente espumante químico produce hormigón celular con muy baja absorción de agua. Esto significa que cuanto mayor sea el contenido de aire, menor será la capacidad de absorción de agua.
- b) **Durabilidad.** Es un material duradero que no se ve afectado por el tiempo. No se rompe y cuenta con gran resistente. Su alta resistencia a la compresión permite utilizar menos peso/volumen en la construcción.

- c) **Resistencia al fuego.** El hormigón celular es resistente al fuego, por lo que es adecuado para su uso en edificios con riesgo de incendio. Los ensayos han demostrado que, además de la resistencia al fuego, la aplicación de altas temperaturas no provoca fisuras ni explosiones, a diferencia de la operación del hormigón de densidad convencional.
- d) **Calor.** Debido a la alta variabilidad térmica, las estructuras de hormigón celular son capaces de acumular calor, lo que reduce los costos de calefacción entre un 20 y un 30 %.
- e) **Microclima.** Es resistente a la pérdida de calor en invierno; también a la humedad, evitando temperaturas muy altas en verano y controlando la humedad del aire absorbiéndola y contribuyendo a un microclima (como en una casa de madera).
- f) **Montaje rápido.** Debido a la ligereza del hormigón celular, combinado con el gran tamaño de los bloques en comparación con el ladrillo, puede aumentar significativamente la velocidad de instalación. El hormigón aireado es fácil de mecanizar y cortar ranuras y pasajes para cables y tuberías eléctricas.
- g) **Insonorización.** Tiene una alta capacidad de absorción de sonido. Una construcción de hormigón celular cumple con los estándares de aislamiento acústico.
- h) **Compatibilidad ambiental.** Su respeto por el medio ambiente solo es superado por la madera. El factor de respeto al medio ambiente del hormigón aireado es 2, madera 1, ladrillo 10 y barro cocido 20.
- i) **Versatilidad.** Gracias a la facilidad de manejo, es posible crear varias formas de esquinas, arcos y pirámides, lo que aumenta el valor estético de los edificios.

- j) Economía.** La precisión geométrica de las dimensiones de los bloques de hormigón celular permite un alisado interno y externo más delgado. El hormigón aireado es entre un 10 % y un 87 % más ligero que el hormigón convencional. Esta importante reducción de peso significa un ahorro significativo en los costos de construcción y cimentación.
- k) Protección.** El hormigón celular protege contra la propagación del fuego y corresponde al primer grado de resistencia. Como resultado, el acero de encofrado está protegido contra el calor durante más tiempo.
- l) Transporte.** La favorable combinación peso/volumen facilita el transporte de este material a la obra, tanto como materiales de acabado como componentes prefabricados.

2.3.2. Aplicación del hormigón celular en base a la densidad.

Dependiendo del uso o aplicación, el hormigón celular puede elegirse por sus propiedades aislantes, térmicas y acústicas, capacidad de bombeo y fluidez, facilidad de manejo debido a su peso ligero o como una alternativa económica a los materiales de relleno. Estrella, G. (2011) citado por Rengifo Cuenca & Yupangui Cushicondor (2013) en su proyecto clasifica al hormigón celular en función de su densidad de la siguiente manera:

- 250 a 550 kg/m³ es usado para la protección contra incendios y para aislamiento térmico.
- 600 a 800 kg/m³ se utiliza en rellenos, en coberturas ambientales para prevención de derrumbes, cubiertas, impermeabilización, reacondicionamientos de sistemas de alcantarillados, mampostería.
- 800 a 900 kg/m³ en bloques, rellenos y otros elementos no portantes, molduras.

- 1100 a 1400 kg/m³ en paredes prefabricadas u hormigonados en sitio, portantes o no portantes, nivelado de pisos.
- 1600 a 1800 kg/m³ en paneles de losas, relleno de placas colaborantes, tabiquería interior.

2.3.3. Ventajas del hormigón celular.

PaviConj (2020) describe las siguientes ventajas del hormigón celular:

- Puede llegar a tener una alta resistencia a la compresión, que puede variar de acuerdo con la densidad del material. Es decir que la compresión es mayor en cuanto la densidad sea más alta.
- Por su baja densidad, su material es de poco peso, pesando un 50% menos que otros elementos, por lo que es más fácil de transportar y su trabajabilidad es mejor.
- Debido al ahorro en su materia prima para la elaboración, es un material amigable con el ambiente.
- El hormigón celular, es resistente al agua y a agentes químicos, esto se debe a su estructura de poros cerrados y que tiene una mínima capilaridad, la cual hace que absorba el agua y así sea un gran inhibidor de la humedad.
- Tiene una gran resistencia al fuego. Y debido a su bajo grado de conductividad térmica, el paso de calor por el hormigón aireado es mínimo.
- Posee una gran absorción acústica, lo que hace que el sonido tenga un efecto de resorte hacia su punto de origen.
- El hormigón aireado, es un excelente aislante térmico.

2.3.4. Desventajas del hormigón celular.

Rengifo Cuenca y Yupangui Cushicondor (2013) en su trabajo expone algunas de las desventajas del hormigón celular:

- Debido a la materia prima del hormigón celular, se necesita tener cuidado con el encofrado al momento del vaciado de la mezcla.
- Al tener una mayor porosidad en el hormigón celular este es más vulnerable a los ataques químicos (agua freática, corrosiva, ambientes contaminados y escurrimiento de líquidos reactivos).
- La presencia de vacíos en el hormigón produce disminución en la resistencia a la compresión y se debe determinar el rango de utilidad del producto.
- Se debe realizar el curado del hormigón celular en cámaras herméticas muy resistentes por lo que demanda un elevado precio, especialmente si se trata de fabricar elementos de grandes dimensiones.
- Se debe establecer un sistema de producción (dosificación, mezclado y curado) más regularizado, para no perjudicar las propiedades físicas y mecánicas del producto final.
- Se debe manejar un buen curado para evitar que haya retracción en el hormigón, se reduce este proceso a través de un curado a vapor de presión en autoclave.
- Los hormigones livianos producen mayores deformaciones que el hormigón convencionales, esto se debe a que presentan bajos módulos de elasticidad.

2.4. MÉTODOS PARA LA ELABORACIÓN DEL HORMIGÓN CELULAR

Se ha determinado diferentes tipos de métodos para la elaboración del hormigón celular.

2.4.1. Hormigón celular con inclusión de aire.

Según el procedimiento que se utiliza para la elaboración del hormigón celular, este se clasifica en dos grupos dependiendo de la forma en que se originan las células de aire en la mezcla. (Arbitó Contreras, 2016)

2.4.1.1. *Hormigón celular por desprendimiento gaseoso.*

De acuerdo con Arbitó Contreras (2016) las células o burbujas se obtienen mediante una reacción química que se produce por el desprendimiento de gas en la mezcla. Hay 3 métodos para la elaboración de burbujas:

- a) **Método 1.** La introducción de dos productos químicos capaces de reaccionar entre sí y producir gas en presencia de agua miscible, que pueden ser:
- Ácido clorhídrico y bicarbonato de sodio, con desprendimiento de gas carbónico.
 - Cloruro de cal y agua oxigenada, con desprendimiento de oxígeno.
 - Carburo de calcio y agua, con desprendimiento de acetileno.
- b) **Método 2.** Adicionando a la mezcla un producto químico susceptible capaz de interactuar con el cemento en presencia del agua el cual provoque el desprendimiento de gas.
- Polvos metálicos (aluminio, zinc, magnesio, calcio, bario, litio).
 - Sales (carbonatos, bicarbonatos).

c) **Método 3.** Adicionando a la mezcla un producto susceptible capaz de inducir un desprendimiento de gas por fermentación bajo el efecto del calor de hidratación del cemento como:

- Levaduras orgánicas.
- Fermentaciones lácticas.

2.4.1.2. *Hormigón celular con base de espuma.*

La formación de alvéolos en la masa de hormigón se produce al adicionar de un agente espumante en la mezcla, que cuando ocurra el proceso de mezclado formará burbujas con burbujas de aire, y después de que la mezcla se endurezca, por medio de la estabilidad captura las burbujas de aire, creando células microscópicas que no se encuentran en contacto entre sí. Pero se debe tener cuidado al momento del mezclado debido a que esto hace que decrezca la tensión superficial y se rompa las burbujas. (Arbitro Contreras, 2016)

2.4.2. Hormigón celular con áridos livianos.

Para elaborar un hormigón celular con peso liviano se puede reemplazar el árido en parte o en su totalidad por áridos livianos. La mezcla del hormigón se elabora con agregado de peso ligero, el cual puede ser esquisto expandido, arcilla o pizarra calcinados, escoria de altos hornos, piedra volcánica, pómez, poliestireno expandido. (Arbitro Contreras, 2016)

2.5. AGENTE ESPUMANTE

Los agentes espumantes que se emplean en la elaboración del hormigón celular pueden ser productos de naturaleza orgánica o inorgánica, generalmente adicionados al hormigón durante el mezclado en pequeños porcentajes según el producto seleccionado y el efecto que se desee obtener sobre el hormigón. (Arbitro Contreras, 2016)

El agente espumante debe mantener la espuma estable para que no se rompa en el proceso de formación de la espuma, mientras se realiza el mezclado, al verter el material en el molde y antes del fraguado.

Químicamente la espuma está basada en proteínas estabilizadoras, y agentes tensioactivos además de agua. También posee propiedades biodegradables, y gracias a la naturaleza hueca provocado por la espuma logra atrapar el aire. Además, por su constitución química no da lugar a reacciones perjudiciales sobre materiales comúnmente usados en estos hormigones, cumpliendo su principal función de obtener un hormigón de baja densidad. (Rengifo Cuenca y Yupangui Cushicondor, 2013)

Un claro ejemplo de agente espumante es el diseñado por Gómez Del Pezo, Mora Figueroa, y Ramírez Palma (2022), elaborado a partir de componentes como el CMC (Carboximetilcelulosa), la goma de Xantana y Texapon, en proporciones que cumplan con los requisitos normativos. Sus datos técnicos se encuentran en la Tabla 4.

Tabla 4

Datos técnicos del agente espumante RV-2020.

Características	
Apariencia	Líquido viscoso
Color	Blanco
PH (25° C)	7±1
Solubilidad	Agua
Densidad	1,20 ± 0,03 gr/cm ³
Rendimiento	0.09

Nota: Tomado de Gómez Del Pezo, Mora Figueroa, & Ramírez Palma (2022).

2.5.1. Equipo para generar espuma.

Existen varias formas para generar espuma, convencionalmente se usa el agente espumante como un aditivo y que esta se forme en el proceso de mezclado, pero también se puede conseguir espuma preformada mediante un sistema

generador de espuma. Un ejemplo claro de este tipo de sistema es el usado por Alomoto Limones, Mejillones Suárez, y Veliz Aguayo (2023); y Gómez Del Pezo, Mora Figueroa, y Ramírez Palma (2022) que consiste en suministrarle presión constante por medio de un compresor de aire a una bomba neumática de diafragma quien contiene el agente espumante en estado líquido. Este sistema en conjunto proporciona la espuma necesaria para producir el hormigón celular, como se muestra en la Figura 2.

Figura 2

Bomba neumática de diafragma.



Nota: Propiedad del laboratorio de Ingeniería Civil - UPSE.

2.6. DEFINICIÓN DEL CEMENTO

2.6.1. Cemento Portland.

Es un cemento hidráulico que se produce por la pulverización del Clinker Pórtland, en combinación con el sulfato de calcio.

2.6.1.1. Composición del cemento.

EL cemento está compuesto químicamente por: óxido de calcio, óxido de silicio, óxido de aluminio, óxido de hierro y óxido de manganeso. Usualmente los minerales ya tienen la composición requerida, pero en algunos casos es necesario

adicionar arcilla, o carbonato de calcio u otros residuos minerales de fundición. (Quiroz Crespo y Salamanca Osuna, 2006)

2.6.1.2. Propiedades físicas y mecánicas del cemento.

- a) **Fraguado y endurecido.** Se diferencian dos etapas, fraguado y endurecimiento de la pasta de cemento. Durante el fraguado la pasta pierde su plasticidad ganando algo de resistencia, mientras que en el endurecimiento la pasta gana progresivamente resistencia. El tiempo de fraguado depende de varios factores, como lo son la temperatura, la relación a/c y las características del cemento. (Fréré Cárdenas, Torres Monroy, y Chavez Moncayo, 2018)

- b) **Resistencia.** Cuando se habla de resistencia mecánica, se hace referencia a la resistencia a la compresión, debido a que es la propiedad mecánica más sencilla de determinar y por otro lado es la condición de carga que el hormigón exhibe mayor capacidad de soportar sus esfuerzos, de este modo la mayoría de los diseños de los elementos estructurales sacan un máximo provecho de esta propiedad. (Fréré Cárdenas, Torres Monroy, y Chavez Moncayo, 2018)

- c) **Durabilidad.** La durabilidad del cemento es la capacidad de resistir acciones físicas, químicas, biológicas y climáticas.

2.6.2. Cemento hidráulico.

Es un cemento que fragua y se endurece debido a su interacción química con el agua, tanto al aire como bajo agua, a causa de las reacciones de hidratación de sus componentes, dando como resultado productos hidratados estables y mecánicamente estables. (NTE INEN 2380, 2011)

Generalmente los cementos hidráulicos son clasificados de acuerdo a específicas aplicaciones requeridas desde obras civiles básicas hasta construcciones en ambientes agresivos.

2.6.2.1. Tipos de cementos hidráulicos.

La norma ASTM C 1157 (2020) clasifica a los cementos hidráulicos dependiendo del desempeño del hormigón.

- Tipo GU para construcción en general.
- Tipo HE para altas resistencias iniciales.
- Tipo MS para moderada resistencia a los sulfatos.
- Tipo HS para alta resistencia a los sulfatos.
- Tipo MH para moderado calor de hidratación.
- Tipo LH para bajo calor de hidratación.

2.7. CEMENTO ALCALINO

Los cementos alcalinos, son productos resultantes de una activación alcalina de aluminosilicatos. (Rendón Belmonte, y otros, 2015). La reacción química mencionada se da de la siguiente manera, los aluminosilicatos son minerales que contienen óxido de aluminio (Al_2O_3) –o alúmina– y óxido de silicio (SiO_2) –o sílice– que, al entrar en contacto con un elemento activador, generalmente una disolución de hidróxido alcalino, que forma un material mecánicamente resistente. (Davidovits, 1991); (Sofi, Van Deventer, Mendis, y Lukey, 2007); (Palomo, Fernández-Jiménez, Kovalchuk, Ordoñez, y Naranjo, 2007) definen a este material resultante como “geo polímeros”, “aluminosilicatos vítreos sinterizados a bajas temperaturas”, “cementos activados alcalinamente”, “geo cementos”, “polímeros inorgánicos” y demás.

2.8. CEMENTO HIBRIDO

Los cementos híbridos son el resultado de la combinación del cemento Portland + cementos alcalinos (Rendón Belmonte, y otros, 2015). El fin de esta mecánica es reducir el contenido de Clinker y elevadas adiciones de minerales en la dosificación, sin comprometer las propiedades físicas, químicas y mecánicas de la mezcla en general, ya sea por motivos económicos, ambientales, u otros. Este tipo de cemento

es relativamente nuevo, y se presenta como una alternativa al uso de los tradicionales morteros y hormigones de cemento Portland ordinario (CPO).

2.8.1. Componentes.

La composición de los materiales para la elaboración de cemento híbrido depende de lo siguiente: tipo y concentración del activador alcalino, relación solución alcalina/material cementante, tiempo y temperatura de curado.

2.9. ZEOLITA

Son minerales aluminosilicatos micro porosos. Tienen la capacidad de hidratarse y deshidratarse de un modo reversible (Zeonatec, 2020). Se pueden utilizar para la eliminación de residuos radiactivos, tratamiento de efluentes residuales urbanos y agrícolas, depuración de gases, limpieza de los derrames de aceites, producción de oxígeno, usos de energía solar, producción de petróleo, fertilización y remediación de suelos, retención de metales pesados, nutrición animal, usos en acuicultura, guías de exploración, aplicaciones metalúrgicas, productos de papel y usos en la construcción. (Freré Cárdenas, Torres Monroy, y Chavez Moncayo, 2018)

2.9.1. Zeolita en la construcción.

La zeolita tiene diversas aplicaciones en el mundo de la construcción. En China, 60 % de la producción mundial de zeolita se utiliza para producir hormigón ligero de alta calidad. (Freré Cárdenas, Torres Monroy, y Chavez Moncayo, 2018)

Como bien sabemos las zeolitas son aluminosilicatos porosos, por consiguiente, se considera que son puzolanas naturales y estas pueden ser usadas para sustituir hasta un 40% del cemento convencional obteniendo así, un hormigón ligero y de propiedades específicas. (Freré Cárdenas, Torres Monroy, y Chavez Moncayo, 2018)

La zeolita, al ser un material poroso que retiene agua, puede aumentar el tiempo de fraguado y la resistencia a la compresión durante el fraguado. La zeolita

puede evitar la reacción álcali-sílica. (Freré Cárdenas, Torres Monroy, y Chavez Moncayo, 2018)

2.9.2. Propiedades de la zeolita.

Las propiedades más importantes de las zeolitas según Curi, Vásquez Granda, Lima, y Sousa (2006) son:

2.9.2.1. Porosidad.

Las zeolitas forman canales y cavidades regulares y uniformes con un tamaño molecular (de 3 a 13 nm) cercano al diámetro cinético de un gran número de moléculas. Este tipo de estructura micro porosa hace que el área de la superficie interna de las zeolitas sea infinitamente grande en comparación con su superficie externa.

2.9.2.2. Adsorción.

La superficie de los sólidos es una región particular que satisface o al menos determina muchas de sus propiedades. Los átomos que contiene no tienen una fuerza cohesiva compensatoria, como es el caso de los átomos dentro del sólido, lo que en última instancia determina las propiedades de adsorción del sólido. La alta eficiencia de adsorción de las zeolitas está relacionada con su gran superficie interna. A medida que disminuye el tamaño de los poros, aumenta significativamente el potencial de adsorción debido a la posible superposición de las paredes de los poros.

2.9.2.3. Intercambio iónico.

Se considera una propiedad inherente a estos minerales ya que es el producto de la sustitución isomórfica de los átomos de silicio en su estructura cristalina por otros átomos. En el caso de las zeolitas, esta sustitución se produce con los átomos de aluminio tetravalentes,

creando una carga global negativa en la estructura, que es compensada por cationes externos.

2.10. ACTIVADORES ALCALINOS

Para la elaboración de los cementos alcalinos uno de los componentes esenciales es el activador alcalino. Estos activadores se suelen introducir en la mezcla en solución, aunque también pueden introducirse en estado sólido, bien mezclado o integrado con escorias y/o cenizas. En general, los activadores más utilizados son los hidróxidos y silicatos de metales alcalinos.

La activación alcalina es crucial en el resultado final de cementos alcalinos, y cementos híbridos alcalinos. Generalmente se trata de una disolución, aunque también se los puede incluir en la mezcla en estado sólido. Y los más usados suelen ser hidróxidos y silicatos alcalinos. Torres-Carrasco & Puertas (2017) menciona que el papel más crítico del activador alcalino en un material activado alcalinamente es el de disolver aluminosilicatos y acelerar su reacción, mediante la generación de un pH elevado.

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA

3.1. TIPO Y NIVEL DE INVESTIGACIÓN

3.1.1. Tipo de investigación.

Esta investigación es de tipo aplicada, porque se busca la aplicación de los conocimientos adquiridos, a la vez que se adquieren otros, después de implementar la práctica en la investigación y experimentar prueba y error para diseños de hormigones celulares con densidades de 600 kg/m^3 y 800 kg/m^3 y así obtener resultados acerca de las propiedades físicas y mecánicas del hormigón celular con cemento híbrido alcalino.

3.1.2. Nivel de investigación.

El estudio corresponde a un nivel de investigación explicativa o causal, este estudio se centraliza en explicar el por qué ocurre un fenómeno, en qué condiciones se manifiesta o por qué dos o más variables están relacionadas.

3.2. MÉTODO, ENFOQUE Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

3.2.1. Método de investigación.

Para la investigación se aplicó el método hipotético deductivo a partir de las hipótesis se generan nuevas deducciones y de esta manera se comprueba la veracidad de las hipótesis, con lo cual se generará las conclusiones.

3.2.2. Enfoque de la investigación.

En este estudio se aplicó un diseño cuantitativo, porque se desarrollaron ensayos de caracterización de material, así como la valoración de las propiedades físicas y mecánicas del hormigón celular.

3.2.3. Diseño de la investigación.

Para la investigación se aplicó un diseño experimental según determinadas condiciones. En este tipo de diseño se maniobra una o más variables deliberadamente, con la intención de evaluar los efectos derivados del producto de tal modificación, que en este caso será el porcentaje de zeolita que sustituirá el cemento hidráulico HE y el porcentaje de solución activadora que se empleará en las dosificaciones requeridas.

3.3. METODOLOGÍA DEL OE.1: CARACTERIZAR LOS MATERIALES COMPONENTES PRESELECCIONADOS PARA LA OBTENCIÓN DE HORMIGONES CELULARES

3.3.1. Agregado fino.

Para la elaboración del hormigón celular empleamos arena gruesa pasante de la malla No 8, con un diámetro de abertura de 2.36 mm.

3.3.1.1. *Características físicas y mecánicas del agregado fino.*

- a) **Granulometría del agregado fino.** De acuerdo con el Comité ACI 523 (2006) el agregado fino para elaborar hormigón celular debe cumplir con las normas ASTM C33. Una buena granulometría proporciona a la mezcla una mejor cohesión y trabajabilidad, ver Tabla 5.

Tabla 5

Especificaciones granulometría árido fino NTE INEN 872.

Tamiz (NTE INEN 154)	Porcentaje que pasa
9,5 mm	100
4,75 mm	95 a 100
2,36 mm	80 a 100
1,18 mm	50 a 85
600 µm	25 a 60
300 µm	10 a 30
150 µm	2 a 10

Nota. Tomado de NTE INEN 872 - ASTM C33.

- Análisis granulométrico del agregado fino norma NTE INEN 872 / ASTM C33. El ensayo de análisis granulométrico se realiza para obtener la distribución del tamaño de partículas en una masa de suelo con el fin de poder clasificarlo y saber qué porcentaje de fino o grueso debe agregarse a la muestra de suelo para que este cumpla los estándares requeridos.
- Módulo de finura norma NTE INEN 872 / ASTM C33. El módulo de finura es una medida del grosor o tamaño que debe tener la muestra para poder ser utilizada en la elaboración de hormigón.

Materiales y equipos.

- Muestra de suelo de 1137,63 gramos.
- Balanza eléctrica.
- Serie de tamices: 3/8", No 4, No 8, No 16, No 30, No 50, No 100 y Fondo.
- Brocha y cepillo.
- Agitador mecánico.
- Recipientes.
- Horno de temperatura constante.

Procedimiento.

1. Se seca en horno la muestra de agregado fino a temperatura de 110°C.
2. Una vez seca la muestra, se debe enfriar y obtener el peso de la muestra en seco.
3. Se selecciona los tamices antes mencionados para el ensayo.
4. Se ordena los tamices de acuerdo con el tamaño de abertura.
5. Se coloca la muestra seleccionada en el tamiz superior.
6. Se debe colocar los tamices en el agitador mecánico por un periodo breve.
7. Una vez se detenga el agitador, se coloca las partículas retenidas en cada tamiz, en diferentes recipientes con su respectivo peso.

Cálculos.

Granulometría.

$$R = \frac{P_P}{P_T} \times 100 \quad (1)$$

Donde:

R: Porcentaje retenido.

P_P : Peso parcial retenido en el tamiz No.

P_T : Peso total de la muestra.

Módulo de Finura.

$$MF = \frac{\sum R}{100} \quad (2)$$

Donde:

$\sum R$: Suma de los porcentajes acumulados en los tamices: 6", 3", 1 ½", ¾", 3/8", No. 4, No. 8, No. 16, No. 30, No. 50 y No. 100.

Resultados.

Los resultados se muestran en el capítulo IV, en la Tabla 24.

- b) **Determinación del peso volumétrico norma NTE INEN 858 / ASTM C29.** Este ensayo permite obtener la masa unitaria del agregado en estado suelto y así poder calcular los vacíos que tendrán las partículas del agregado fino, grueso o la combinación de ellos.

Materiales y equipos.

- Muestra de agregado fino.
- Balanza eléctrica
- Recipiente cilíndrico de metal que cumpla con las especificaciones
- Cucharón o pala.

Procedimiento.

1. Se determina el peso y volumen del cilindro que se va a utilizar.
2. Se coloca el molde en una superficie plana.
3. Se debe vaciar el agregado dentro del molde sin producir vibraciones y prevenir la segregación de partículas.
4. Se nivela la superficie del agregado con una varilla y limpiar con una brocha el material que esta fuera del molde.
5. Se obtiene el peso del molde con el agregado fino.

Cálculos.

$$M = \frac{G - T}{V} \quad (3)$$

Donde:

M: Masa Unitaria.

G: Masa del agregado más el recipiente, kg.

T: Masa del recipiente, kg.

V: Volumen del cilindro, m³.

Resultados.

Los resultados se muestran en el capítulo IV, en la Tabla 25.

- c) **Determinación del contenido total de humedad norma NTE INEN 862 – ASTM C566.** Con este ensayo se obtiene el porcentaje de humedad que tienen los agregados y así se pueda corregir la cantidad de agua que se requerirá en la mezcla, evitando problemas de trabajabilidad en el hormigón celular.

Materiales y equipos.

- Muestra de agregado fino.
- Balanza eléctrica.
- Horno de temperatura constante.
- Recipiente.

Procedimiento.

1. Se coloca una muestra del agregado en un recipiente y obtener el peso del recipiente más el agregado húmedo.
2. Se deja secando la muestra en horno a una temperatura de 110°C.
3. Se debe dejar enfriar la muestra y se obtiene el peso del recipiente más el agregado en seco.

Cálculos.

$$H = \frac{A - B}{A} \times 100 \quad (4)$$

Donde:

H: Porcentaje de humedad.

A: Muestra humedad.

B: Muestra seca.

Resultados.

Los resultados se muestran en el capítulo IV, en la Tabla 26.

- d) Densidad saturada superficialmente seca y absorción del agregado fino norma NTE INEN 856 – ASTM C128.** La cantidad de volumen necesario a emplear para el agregado fino se obtiene a través de la DSSS. Y el porcentaje de absorción es reflejado una vez se sumerja en agua el agregado seco bajo un normado periodo de tiempo.

Materiales y equipos.

- Muestra de agregado fino de 500 gramos.
- Balanza eléctrica
- Picnómetro
- Recipiente
- Matraz
- Molde en forma de cono truncado con sus respectivas dimensiones
- Compactador metálico
- Horno de temperatura constante

Procedimiento.

1. Se pesa la cantidad de muestra en un recipiente y dejar secando en horno.
2. Se debe sacar la muestra del horno y dejar enfriar hasta que esta se pueda manipular.
3. Se coloca agua superficialmente y dejar por un tiempo determinado.
4. Extender la muestra en una superficie plana de madera para el secado uniforme.
5. Proceder a llenar el cono truncado, aplicando 25 golpes a la superficie de este, si se observa que el material no se derrumba se debe repetir el proceso las veces necesarias hasta que este colapse, esto nos indica que el material esta superficialmente seco.
6. Con el material obtenido se procede a rellenar el picnómetro y se debe agregar agua hasta llegar a la marca de calibración. Eliminar la cantidad de aire.
7. Retirar con cuidado el material del picnómetro para reservarlo en un recipiente y dejar secando en el horno durante 24 horas.
8. Sacar del horno y dejar enfriar, posterior a esto obtener peso del agregado fino.

Cálculos.

$$\text{DSSS} = \frac{\text{S}}{\text{B} + \text{S} - \text{C}} \quad (5)$$

Donde:

DSSS: densidad saturada superficialmente seca

S: Masa de la muestra de agregado fino superficialmente seca

B: Masa del picnómetro lleno de agua hasta la marca de calibración

C: Masa del picnómetro lleno la muestra y el agua hasta la marca de calibración.

$$\text{Absorción} = \left(\frac{\text{S} - \text{A}}{\text{A}} \right) \times 100 \quad (6)$$

Donde:

A: Masa de la muestra seca al horno.

S: Masa de la muestra de agregado fino superficialmente seca.

Resultados.

Los resultados se muestran en el capítulo IV, en la Tabla 27.

3.3.2. Zeolita.

La zeolita, procedente de la cantera Isidro Ayora, para poder ser usado como material cementicio debe cumplir con las especificaciones de la norma INEN 490 la cual indica las especificaciones técnicas del cemento como es la finura que debe ser de 45 μm . Por ello antes de emplear la zeolita en la mezcla de hormigón celular se debe caracterizar.

La zeolita al ser una puzolana natural se puede utilizar para sustituir al cemento convencional hasta en un 40% de su contenido en la mezcla. La composición química de la zeolita se detalla en la Tabla 6.

Tabla 6*Composición de la zeolita.*

Elemento	Porcentaje
Zeolita Natural	100
Oxido de Silicio	61.88
Oxido de Aluminio	10.85
Óxido de Hierro	3.53
Oxido de Magnesio	0.77

Nota. Tomado de (Zeonatec, 2020).

3.3.2.1. Características físicas y mecánicas de la zeolita.

a) **Finura de la zeolita norma NTE INEN 489 / ASTM C430-17.** El cemento hidráulico debe tener una finura de 45 μm . Como se emplea la zeolita, en el hormigón celular sustituyendo parte del cemento esta debe cumplir con la finura del tamiz N°325.

b) Análisis granulométrico de la zeolita.

- Análisis granulométrico por tamizado norma NTE INEN 872 / ASTM C33.
- Análisis granulométrico por hidrómetro de la zeolita ASTM D7928. El ensayo se lo realiza para determinar las partículas pasantes del tamiz N°200, es decir las partículas finas del “suelo”. Este ensayo lo realizamos con la finalidad de verificar que la zeolita que utilizamos en el diseño de nuestro hormigón celular cumpla con la finura del cemento y así pueda sustituir cierto porcentaje en su diseño.

Materiales y equipos.

- Muestra de suelo de 50 gramos.

- 5 gramos de hexametáfosfato.
- Balanza eléctrica.
- Tamiz N°200.
- Equipo de agitación
- Hidrómetro
- Cilindro de sedimentación.

Procedimiento.

1. Se selecciona una muestra del material y se pasa por el tamiz N°200, luego de esto se pesa 50 gramos de suelo seco.
2. Se debe agregar 5 gramos de hexametáfosfato de sodio o disolver este químico en 100 ml de agua destilada al suelo a mezclar.
3. Se procede a mezclarlo dentro de un equipo de agitación con agua destilada para posteriormente ser transferido a un cilindro de sedimentación de 1000 centímetros cúbicos, donde se agita la muestra durante 1 minuto para evitar que partículas del suelo se adhieran a las paredes de la probeta de sedimentación.
4. En el cilindro de sedimentación se debe colocar el hidrómetro, el cual medirá la gravedad específica de las partículas en suspensión. Las lecturas del hidrómetro deben realizarse aproximadamente en tiempos de 1, 2, 4, 15, 30, 60, 240 y 1440 minutos, por lo cual es recomendable el uso de un cronómetro para controlar las lecturas, o registrar la hora del día con una aproximación de segundos. Se pueden realizar más mediciones si es necesario.

Cálculos.

Lectura de Hidrómetro corregida:

$$R = R' + Cm \tag{7}$$

Donde:

R: Lectura de hidrómetro corregida.

R': Lectura de hidrómetro no corregida.

Cm Corrección por menisco.

Cálculo del diámetro de partículas **D**:

$$D = k \sqrt{\frac{l}{T}} \quad (8)$$

Donde:

D: Diámetro máximo.

l: Profundidad efectiva en mm.

T: Tiempo transcurrido en minutos.

k: Constante depende de la gravedad específica del suelo y la

temperatura $k = \sqrt{\frac{30h}{981(Gs-1)gw}}$

Cálculo del porcentaje más fino al tamaño **D** o porcentaje en el suelo de suspensión:

$$\% \text{ mas fino} = \frac{R_{\text{corregida}} * a}{w_o} * 100 \quad (9)$$

Donde:

w_o: Masa de la muestra secada al horno.

a: Factor de corrección por gravedad específica $a = \frac{2.65-1}{2.65} * \frac{Gs}{Gs-1}$

G_s: Gravedad específica.

Resultados.

Los resultados se muestran en el capítulo IV. Revisar anexo 3.

c) Determinación del peso volumétrico norma NTE INEN 858 / ASTM C29.

Se detalla procedimiento de ensayo en la parte 3.3.1.1, literal d.

Resultados.

Los resultados se muestran en el capítulo IV, en la Tabla 28.

d) Determinación del contenido total de humedad norma NTE INEN 862 – ASTM C566.

Procedimiento.

Se detalla en el punto 3.3.1.1, literal e.

Resultados.

Los resultados se muestran en el capítulo IV, en la Tabla 29.

e) Densidad saturada superficialmente seca y absorción del agregado fino norma NTE INEN 856 – ASTM C128.

Procedimiento.

Se detalla en el punto 3.3.1.1, literal f.

Resultados.

Los resultados se muestran en el capítulo IV, en la Tabla 30.

3.3.3. Activador alcalino.

La solución activadora alcalina usada para reaccionar con la zeolita está compuesta por dos químicos, el hidróxido de sodio y silicato de sodio. En la Tabla 7 se muestran las propiedades físicas del hidróxido de sodio.

Tabla 7

Propiedades físicas del hidróxido de sodio al 50%.

Apariencia:	Líquido, corrosivo, viscoso, incoloro
T.^a de ebullición (1 bar) :	145°C
T.^a de congelamiento (1 bar):	14°C
Gravedad específica 20°C:	1,5
Peso molecular:	39.997 g/mol
Solubilidad en agua:	Soluble en todas proporciones
Densidad:	1.347 g/cm ³

Nota. Tomado de PROQUIMSA (2009).

En la Tabla 8 se muestran las propiedades físicas del silicato de sodio.

Tabla 8

Propiedades físicas del silicato de sodio líquido 3.2.

% Na₂O	9,59 %
Densidad:	41,70 °Bé
% SiO₂:	27,97 %
Relación:	2,92
% sólidos totales (por peso):	37,56 %

Nota. Tomado de ARIS (2022).

Para llegar al concentrado molar de 12 deseado para el NaOH, se disuelve con agua destilada la soda cáustica, tomando las precauciones necesarias puesto que dicho químico al entrar en contacto con el agua genera calor aumenta considerablemente su temperatura.

En lo que respecta al silicato de sodio, de preferencia se prioriza que tenga una relación generosa de $\text{SiO}_2/\text{NaO}_2 \geq 3$, para pasar a ser mezclado con el hidróxido de sodio en una proporción 1 (NaOH): 2 (Na_2SiO_3) en volumen.

Así, las cantidades necesarias para crear una solución activadora alcalina buscada se detallan en el capítulo IV, usando como referencia inicial, para el proceso de disolución y mezclado, un litro de hidróxido de sodio líquido al 50 % de pureza. Además de sus características fisicoquímicas.

3.4. METODOLOGÍA DEL OE.2: ELABORAR DOSIFICACIONES DE HORMIGONES CELULAR PATRÓN Y CON SUSTITUCIÓN DE CEMENTO POR ZEOLITA ACTIVADA CON SOLUCIÓN ALCALINA

3.4.1. Elaboración del método de dosificación.

El método utilizado para la elaboración de las mezclas de hormigones celular será por medio de una adaptación del método de volúmenes aparentes, basado en el principio de dosificación del ACI para hormigones normales.

Consiste en establecer altas cantidades de material cementante para 1 m³ (1 000 L) de hormigón. Preselecciona una relación de arena/cemento y agua/cemento para que de esta manera dichas variables estén en función de la cantidad de cemento. Al mismo tiempo, por principio de conservación de masa, se puede estimar una densidad referente esperada de la mezcla de hormigón. (Arbito Contreras, 2016)

Para hormigones celulares con espuma preformada, la cantidad de espuma es incluida en la suma de los volúmenes de los materiales para 1000 litros, y con ello se puede establecer una relación del volumen de la espuma en función a la cantidad de cemento.

$$vc + vs + vw + ve = 1000 \text{ L} \quad (10)$$

$$ve = 1000 - vc + vs + vw \quad (11)$$

Donde:

vc = Volumen de cemento

vs = Volumen de arena

vw = Volumen de agua

ve = Volumen de espuma

Además de la preselección de una relación arena/cemento y una de agua/cemento, existirán dos extras, que involucran a la zeolita activada, que son zeolita/cemento hidráulico y solución activadora/zeolita, para mantener la misma función lineal en base a la cantidad de cemento escogida.

Las variables para el diseño de dosificaciones de hormigones celulares se expresan en la Tabla 9:

Tabla 9

Variables del método empleado

Variable	Definición	Variable	Definición
HC	Hormigón celular	z	Zeolita
v	Volumen	s	Arena
m	Masa	a	Solución activadora
d	Densidad	w	Agua
c	Cemento	e	Espuma
ch	Cemento hidráulico		

Donde:

$$vc + va + vs + vw + ve = 1000 \text{ L} \quad (12)$$

y

$$v = m/d \quad (13)$$

Que al reemplazar (13) en (12) queda expresado de la siguiente manera:

$$\frac{mc}{dc} + \frac{ma}{da} + \frac{ms}{ds} + \frac{mw}{dw} + \frac{me}{de} = 1000 \text{ L} \quad (14)$$

La cantidad de arena viene dada por la relación de arena/cemento:

$$\frac{ms}{mc} = s/c \quad (15)$$

Despejando la masa de la arena de (15) se formula como:

$$ms = (s/c) \cdot mc \quad (16)$$

Así mismo, cantidad de agua por la relación agua/cemento es dada por:

$$\frac{mw}{mc} = w/c \quad (17)$$

Por ende, la masa de agua puede ser formulada como:

$$mw = (w/c) \cdot mc \quad (18)$$

Como se trata de hormigón celular con zeolita activada los materiales cementante son cemento hidráulico y zeolita.

$$c = ch + z \quad (19)$$

Que expresado en masa es:

$$mc = mch + mz \quad (20)$$

Por otra parte, la cantidad de zeolita es en función de la cantidad de cemento hidráulico:

$$\frac{mz}{mch} = z/ch \quad (21)$$

Despejando la masa de zeolita de (21) queda expresado como:

$$mz = (z/ch) \cdot mch \quad (22)$$

La cantidad de solución activadora es en función a la cantidad de zeolita:

$$\frac{ma}{mz} = a/z \quad (23)$$

Que despejando en masa de zeolita es:

$$ma = (a/z) \cdot mz \quad (24)$$

Y a su vez puede expresarse en función de la cantidad del cemento hidráulico, reemplazando (22) en (24):

$$ma = (a/z) \cdot (z/ch) \cdot mch \quad (25)$$

Se debe destacar que las cantidades de arena y agua, por sus relaciones, quedan en función del material cementante, es decir del cemento hidráulico y la

zeolita, aun así, pueden ser expresadas en función de la cantidad de cemento hidráulico.

Para la arena, se reemplaza (20) en (16), y a su vez se sustituye (22) en (26) y se simplifica:

$$m_s = (s/c) \cdot (m_{ch} + m_z) \quad (26)$$

$$m_s = (s/c) \cdot (m_{ch} + ((z/ch) \cdot m_{ch})) \quad (27)$$

$$m_s = (s/c) \cdot m_{ch} \cdot (1 + (z/ch)) \quad (28)$$

Así mismo para el agua, se reemplaza (20) en (18), y se sustituye (22) en (29) y se simplifica:

$$m_w = (w/c) \cdot (m_{ch} + m_z) \quad (29)$$

$$m_w = (w/c) \cdot (m_{ch} + ((z/ch) \cdot m_{ch})) \quad (30)$$

$$m_w = (w/c) \cdot m_{ch} \cdot (1 + (z/ch)) \quad (31)$$

Entonces, sustituyendo (22), (25), (28), (31) en (14), se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{m_{ch}}{dch} + \frac{(z/ch) \cdot m_{ch}}{dz} + \frac{(a/z) \cdot (z/p) \cdot m_{ch}}{da} + \frac{(s/c) \cdot m_{ch} \cdot (1 + (z/ch))}{ds} + \frac{(w/c) \cdot m_{ch} \cdot (1 + (z/ch))}{dw} + ve = 1000 \text{ L} \quad (32)$$

Para dar lugar al volumen de espuma en función de la cantidad de cemento:

$$ve = 1000 - m_{ch} \cdot \left[\frac{1}{dch} + (z/ch) \left(\frac{1}{dz} + \frac{(a/z)}{da} \right) + (1 + (z/ch)) \left(\frac{(s/c)}{ds} + \frac{(w/c)}{dw} \right) \right] \quad (33)$$

Una vez definido el volumen de la espuma, se suman todas las masas aparentes conformantes (incluyendo la espuma), y se los divide para los 1000 litros reflejando una densidad teórica de la mezcla.

$$me = ve \cdot de \quad (34)$$

$$v_{HC} = \frac{m_{HC}}{d_{HC}} = 1000 \text{ L} \quad (35)$$

$$d_{HC} = \frac{m_{HC}}{1000 \text{ L}} \quad (36)$$

$$d_{HC} = \frac{m_{ch} \cdot [1 + (z/ch) \cdot (1 + (a/z)) + (1 + (z/ch)) \cdot ((s/c) + (w/c))] + m_e}{1000 \text{ L}} \quad (37)$$

Se debe tomar en cuenta que el principio de dosificación del ACI para el diseño de hormigón considera a los áridos en su condición ideal, es decir saturado superficialmente seco (SSS), por lo cual se trabajará con esos valores, sin embargo, estos áridos pueden estar en condiciones de humedad, alterando la cantidad de agua final en la mezcla, por lo que se deben hacer correcciones por humedad y absorción de ser necesarios. Revisar anexos 13 y 14.

En la Tabla 10 se expresan las densidades de los materiales componentes para el diseño de hormigones celulares con cemento híbrido alcalino de zeolita activada.

Tabla 10

Densidades preliminares de los materiales usados.

Material		Densidad (g/cm ³)
Cemento hidráulico	dch	3,15
Zeolita	dz	2,35
Arena	ds	2,46
Solución activadora	da	1,46
Agua	dw	1,00
Espumante	de	0,06

En la Tabla 11 se detallan la nomenclatura de las dosificaciones por diseñar.

Tabla 11

Listado de mezclas de hormigones celulares por diseñar.

Mezcla	a/z	Zeolita	C. Hidráulico	z/ch	Nomenclatura
Mezcla P	0	0	100	0	MP-600 MP-800
Mezcla P.1	0	50	50	1	MP.1-600 MP.1-800
Mezcla 1	0,40	50	50	1	M1-600 M1-800
Mezcla 2	0,40	40	60	0,67	M2-600 M2-800
Mezcla 3	0,40	30	70	0,43	M3-600 M3-800
Mezcla 4	0,45	50	50	1	M4-600 M4-800
Mezcla 5	0,45	40	60	0,67	M5-600 M5-800
Mezcla 6	0,45	30	70	0,43	M6-600 M6-800
Mezcla 7	0,50	50	50	1	M7-600 M7-800
Mezcla 8	0,50	40	60	0,67	M8-600 M8-800
Mezcla 9	0,50	30	70	0,43	M9-600 M9-800

3.4.2. Pruebas preliminares en base a los materiales.

Como material cementante empleado, la preselección idónea de un tipo de cemento hidráulico para esta investigación es el cemento de alta resistencia temprana, por sus siglas HE (high early-strength), que gracias a su fraguado rápido previene problemas de revenimiento y altos tiempos para el desencofrado de las muestras. Además, para el cemento alcalino casero suplementario al cemento hidráulico se procura que la zeolita cumpla esta función, por ende, se usa un tamaño de partícula igual a 45 μ m por encima de otros. Por otra parte, su correspondiente activador es compuesto por dos sustancias químicas debidamente seleccionadas en base a sus propiedades aptas para buscar una mejor reacción con la zeolita.

Se prescinde de usar arena para estos diseños ya que genera una pérdida de resistencia a la compresión considerable, debido a que no toda la zeolita logra ser activada de manera inmediata, al ser un proceso lento, trabajando inicialmente como agregado fino, generando un exceso de agregado fino junto con la arena.

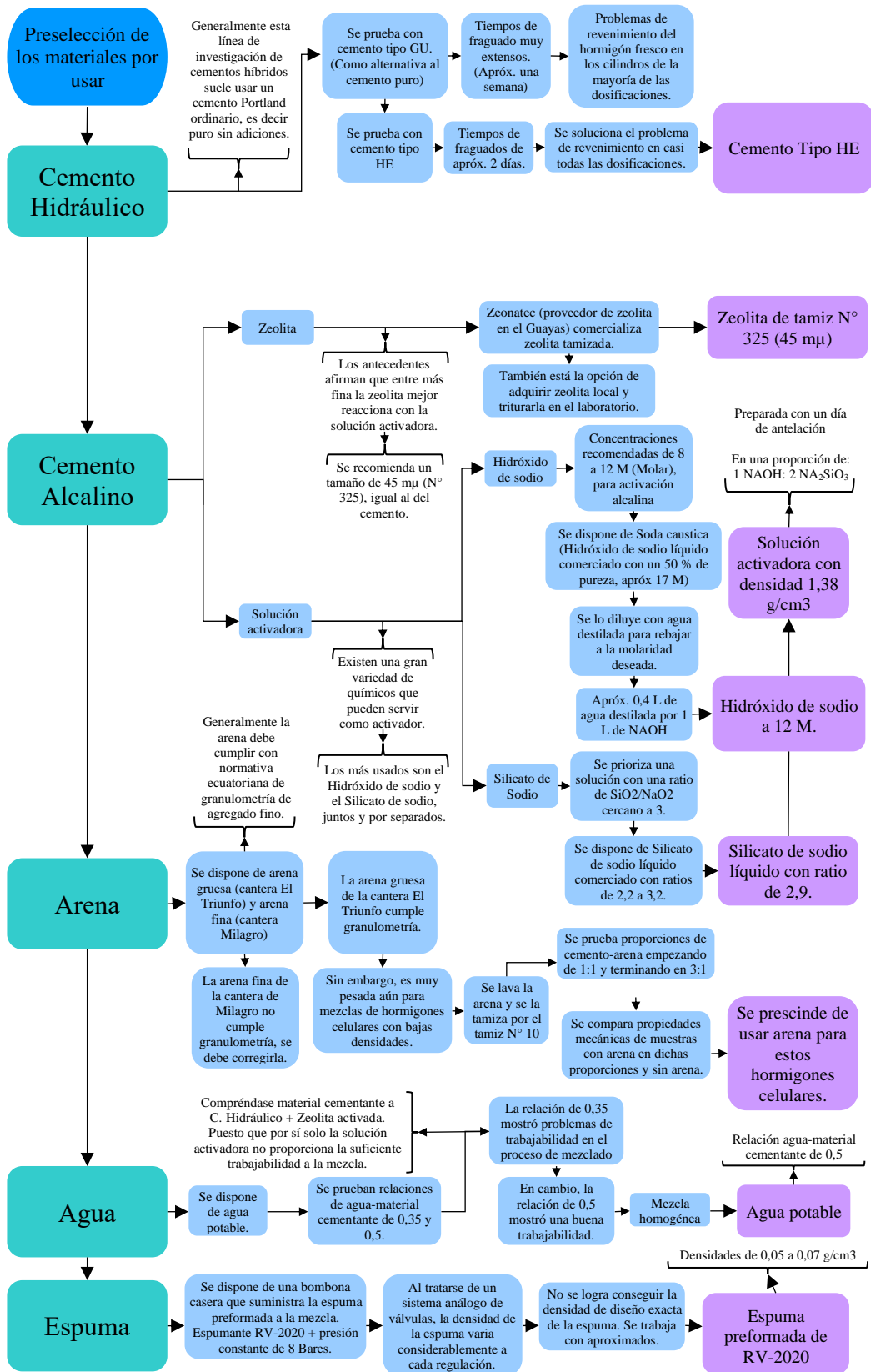
Es fundamental que la relación de agua - material cementante sea generosa para conseguir una mezcla homogénea que no de problemas de trabajabilidad, puesto que la solución activadora alcalina no es suficiente por si sola para cumplir con dicha función. Se trabaja con una relación agua/material cementante del 0,50.

En cuanto a la espuma preformada, que es generada por la bombona casera y un compresor de presión constante de 8 bares, presenta una variación de densidad a cada uso, por consiguiente, no se logra trabajar con una densidad exacta de diseño, pero sí con aproximados, no obstante, se debe de tomar en cuenta este detalle al momento de analizar las densidades en estado fresco y endurecido de las muestras. Al mismo tiempo, se adaptó la fórmula de la proporción original del espumante RV, añadiendo al peso del espumante 12 veces más agua.

Finalmente, se diseña todas las mezclas con un 105 % de la densidad buscada, para que, a lo largo del proceso de fraguado y curado que pierden peso, estas tengan aproximadamente el 100 % de la densidad de diseño. Es decir, las de 600 kg/m^3 diseñadas como 630 kg/m^3 , y las de 800 kg/m^3 como 840 kg/m^3 .

Figura 3

Diagrama de flujo de pruebas preliminares en base a la preselección de la materia prima.



3.4.3. Elaboración de las probetas.

Antes de iniciar el proceso de fundición de hormigones celulares es fundamental disponer de los siguientes puntos:

- Preparar los moldes engrasándolos para evitar que la mezcla se quede adherida a estos.
- Calibrar la generadora de espuma para obtener una densidad de espuma de 60gr/l a 65 gr/l. Se destaca que acuerdo con el Comité ACI 523 (2006) el rango permitido de la densidad de la espuma para hormigones celulares es de 30-80 gr/l.
- Realizar ensayo de fluidez de la mezcla.
- Elaboración de hormigón celular.

Procedimiento:

- a) Se humedece el valde con agua que tenga la capacidad suficiente para la mezcla requerida de hormigón celular.
- b) Se coloca la cantidad necesaria de agua, calculada anteriormente con la relación agua cemento.
- c) Se coloca el cemento en el valde con agua y se realiza el mezclado, con la batidora manual por un periodo aproximado de 1-2 minutos, luego de esto se agrega la zeolita y la solución activadora y se bate por 1-2 minutos, hasta percibir que no queden brumos en el fondo del balde.
- d) Se introduce la arena calculada en la mezcla de agua-cemento y se procede a batir por un periodo de min a baja velocidad.
- e) Se agrega la espuma calculada en la mezcla, y se bate por no más de 2 minutos.
- f) Se coloca la mezcla en los moldes normalizados según los ensayos a realizarse.
- g) Estudiar la mezcla del hormigón celular, en la mesa de flujo.
- h) En caso de usar espumantes especializados en hormigón celular, usar las instrucciones proporcionadas por los fabricantes.

3.4.4. Hormigón celular patrón.

3.4.4.1. Mezcla P.

En la Tabla 12, se detalla las cantidades que debe tener el hormigón celular patrón en cuanto a masa de cemento y el volumen del espumante para alcanzar densidades entre 600 – 900 kg/m³.

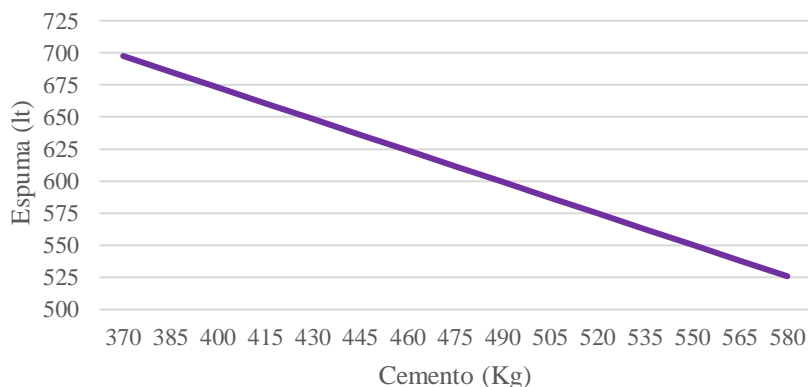
Tabla 12

Cálculos varios, obtención Mezcla P de densidades de 0,6 a 0,9 g/cm³

Masa de cemento mch (kg)	Volumen del espumante ve (L)	Densidad del hormigón celular dHC (g/cm ³)
370	697,540	0,597
400	673,016	0,640
430	648,492	0,684
460	623,968	0,727
490	599,444	0,771
520	574,921	0,814
550	550,397	0,858
580	525,873	0,902

Figura 4

Relación de espuma vs cemento para 1 m³ de hormigón celular de Mezcla P.



Los resultados de la dosificación se muestran en el capítulo IV.

3.4.5. Hormigón celular patrón con zeolita sin activar.

3.4.5.1. Mezcla P.1.

En la Tabla 13, se detalla las cantidades que debe tener el hormigón celular patrón de 50% cemento, 50% zeolita sin activar, en cuanto a masa de cemento y el volumen del espumante para alcanzar densidades entre 600 – 900 kg/m³.

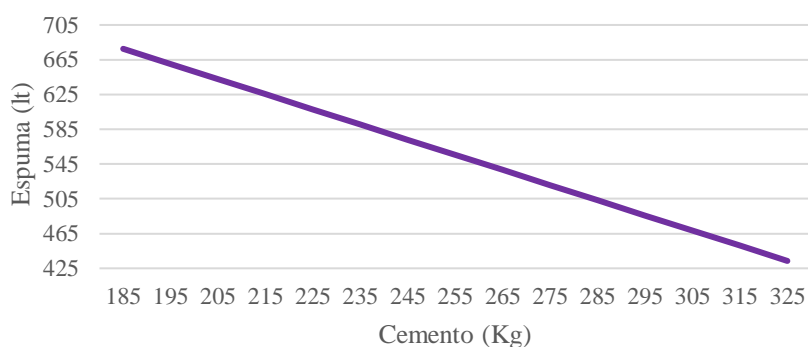
Tabla 13

Cálculos varios, obtención Mezcla P.1 de densidades de 0,6 a 0,9 g/cm³.

Masa de cemento mch (kg)	Volumen del espumante ve (L)	Densidad del hormigón celular dHC (g/cm ³)
185	677,546	0,596
205	642,687	0,654
225	607,827	0,711
245	572,967	0,769
265	538,107	0,827
285	503,247	0,885
305	468,387	0,943
325	433,528	1,001

Figura 5

Relación de espuma vs cemento para 1 m³ de hormigón celular de Mezcla P.1.



Los resultados de la dosificación se muestran en el capítulo IV.

3.4.6. Hormigón celular con zeolita activada.

3.4.6.1. Mezcla 1.

En la Tabla 14, se detalla las cantidades que debe tener el hormigón celular con cemento alcalino con 50% cemento, 50% zeolita y 0.40 de solución activadora, en cuanto a masa de cemento y el volumen del espumante para alcanzar densidades entre 600 – 900 kg/m³.

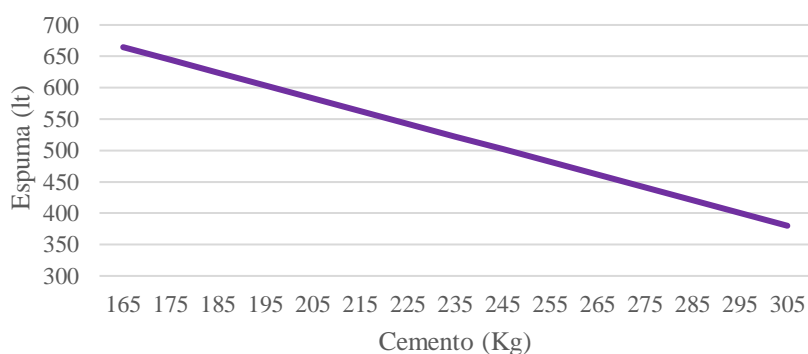
Tabla 14

Cálculos varios, obtención Mezcla 1 de densidades de 0,6 a 0,9 g/cm³

Masa de cemento mch (kg)	Volumen del espumante ve (L)	Densidad del hormigón celular dHC (g/cm ³)
165	664,580	0,601
185	623,923	0,666
205	583,266	0,732
225	542,609	0,798
245	501,952	0,863
265	461,295	0,929
285	420,639	0,994
305	379,982	1,060

Figura 6

Relación de espuma vs cemento para 1 m³ de hormigón celular de Mezcla 1.



Los resultados de la dosificación se muestran en el capítulo IV.

3.4.6.2. Mezcla 2.

En la Tabla 15, se detalla las cantidades que debe tener el hormigón celular con cemento alcalino, con 60% cemento, 40% zeolita y 0.40 de solución activadora, en cuanto a masa de cemento y el volumen del espumante para alcanzar densidades entre 600 – 900 kg/m³.

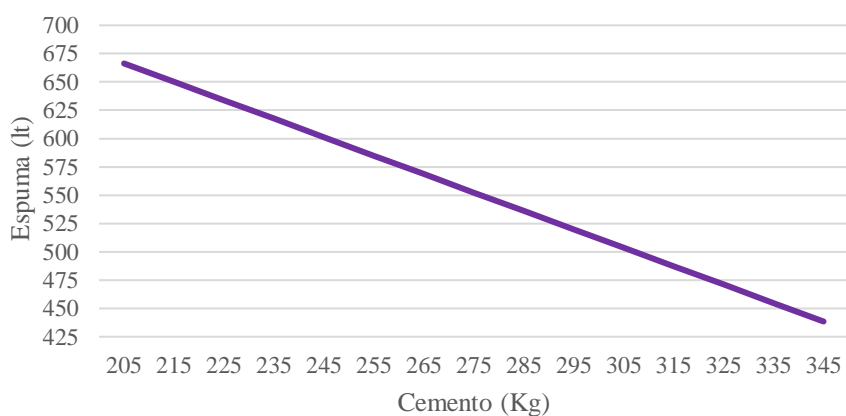
Tabla 15

Cálculos varios, obtención Mezcla 2 de densidades de 0,6 a 0,9 g/cm³

Masa de cemento mch (kg)	Volumen del espumante ve (L)	Densidad del hormigón celular dHC (g/cm ³)
205	666,318	0,607
225	633,763	0,661
245	601,209	0,714
265	568,655	0,767
285	536,100	0,821
305	503,546	0,874
325	470,992	0,927
345	438,437	0,981

Figura 7

Relación de espuma vs cemento para 1 m³ de hormigón celular de Mezcla 2.



Los resultados de la dosificación se muestran en el capítulo IV.

3.4.6.3. Mezcla 3.

En la Tabla 16, se detalla las cantidades que debe tener el hormigón celular con cemento alcalino, con 70% cemento, 30% zeolita y 0.40 de solución activadora, en cuanto a masa de cemento y el volumen del espumante para alcanzar densidades entre 600 – 900 kg/m³.

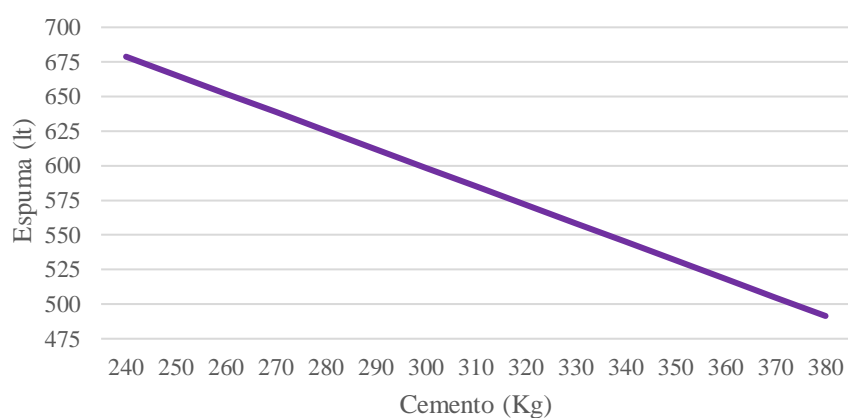
Tabla 16

Cálculos varios, obtención Mezcla 3 de densidades de 0,6 a 0,9 g/cm³

Masa de cemento mch (kg)	Volumen del espumante ve (L)	Densidad del hormigón celular dHC (g/cm ³)
240	678,798	0,596
260	652,031	0,641
280	625,265	0,686
300	598,498	0,730
320	571,731	0,775
340	544,964	0,820
360	518,197	0,864
380	491,431	0,909

Figura 8

Relación de espuma vs cemento para 1 m³ de hormigón celular de Mezcla 3.



Los resultados de la dosificación se muestran en el capítulo IV.

3.4.6.4. Mezcla 4.

En la Tabla 17, se detalla las cantidades que debe tener el hormigón celular con cemento alcalino, con 50% cemento, 50% zeolita y 0.45 de solución activadora, en cuanto a masa de cemento y el volumen del espumante para alcanzar densidades entre 600 – 900 kg/m³.

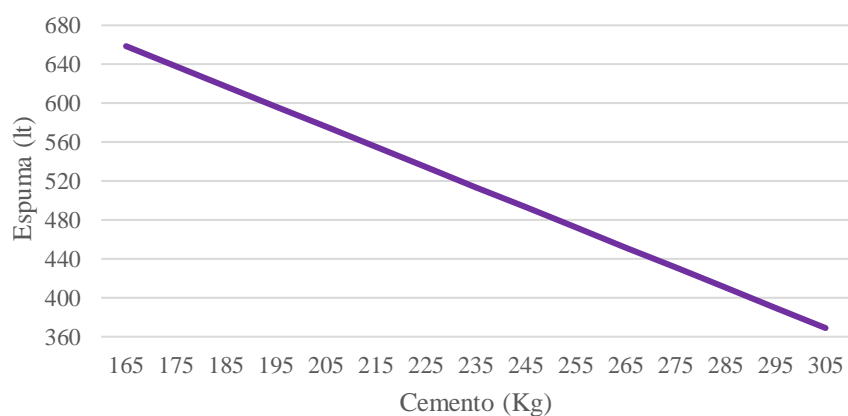
Tabla 17

Cálculos varios, obtención Mezcla 4 de densidades de 0,6 a 0,9 g/cm³.

Masa de cemento mch (kg)	Volumen del espumante ve (L)	Densidad del hormigón celular dHC (g/cm ³)
165	658,602	0,609
185	617,220	0,675
205	575,839	0,742
225	534,457	0,808
245	493,076	0,875
265	451,694	0,941
285	410,312	1,008
305	368,931	1,074

Figura 9

Relación de espuma vs cemento para 1 m³ de hormigón celular de Mezcla 4.



Los resultados de la dosificación se muestran en el capítulo IV.

3.4.6.5. Mezcla 5.

En la Tabla 18, se detalla las cantidades que debe tener el hormigón celular con cemento alcalino, con 60% cemento, 40% zeolita y 0.45 de solución activadora, en cuanto a masa de cemento y el volumen del espumante para alcanzar densidades entre 600 – 900 kg/m³.

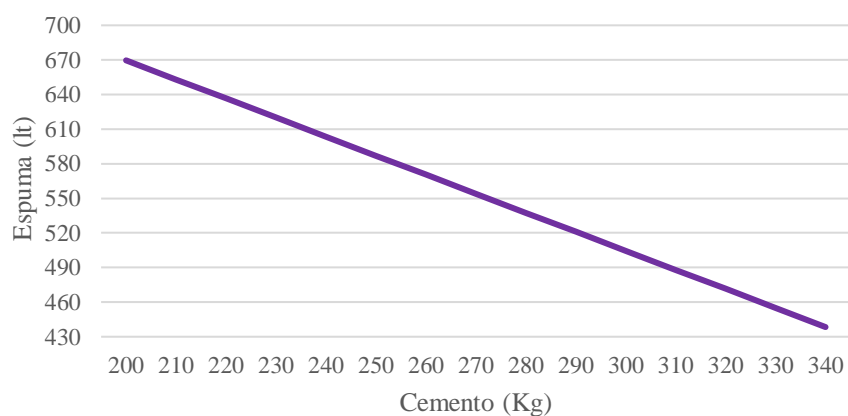
Tabla 18

Cálculos varios, obtención Mezcla 5 de densidades de 0,6 a 0,9 g/cm³.

Masa de cemento mch (kg)	Volumen del espumante ve (L)	Densidad del hormigón celular dHC (g/cm ³)
200	669,625	0,600
220	636,588	0,654
240	603,551	0,708
260	570,513	0,762
280	537,476	0,816
300	504,438	0,870
320	471,401	0,924
340	438,363	0,978

Figura 10

Relación de espuma vs cemento para 1 m³ de hormigón celular de Mezcla 5.



Los resultados de la dosificación se muestran en el capítulo IV.

3.4.6.6. Mezcla 6.

En la Tabla 19, se detalla las cantidades que debe tener el hormigón celular con cemento alcalino, con 70% cemento, 30% zeolita y 0.45 de solución activadora, en cuanto a masa de cemento y el volumen del espumante para alcanzar densidades entre 600 – 900 kg/m³.

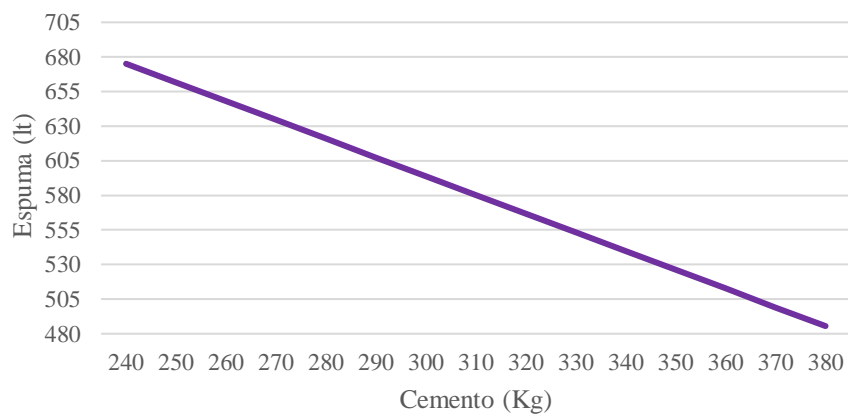
Tabla 19

Cálculos varios, obtención Mezcla 6 de densidades de 0,6 a 0,9 g/cm³.

Masa de cemento mch (kg)	Volumen del espumante ve (L)	Densidad del hormigón celular dHC (g/cm ³)
240	675,072	0,601
260	647,994	0,646
280	620,917	0,691
300	593,839	0,736
320	566,762	0,781
340	539,685	0,827
360	512,607	0,872
380	485,530	0,917

Figura 11

Relación de espuma vs cemento para 1 m³ de hormigón celular de Mezcla 6.



Los resultados de la dosificación se muestran en el capítulo IV.

3.4.6.7. Mezcla 7.

En la Tabla 20, se detalla las cantidades que debe tener el hormigón celular con cemento alcalino, con 50% cemento, 50% zeolita y 0.50 de solución activadora, en cuanto a masa de cemento y el volumen del espumante para alcanzar densidades entre 600 – 900 kg/m³.

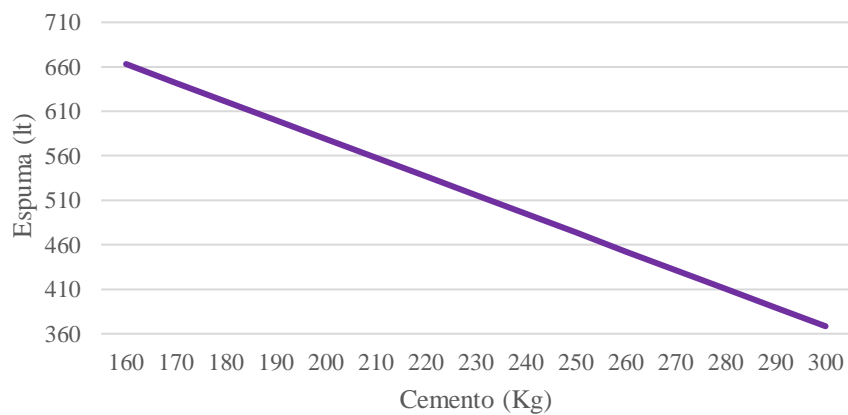
Tabla 20

Cálculos varios, obtención Mezcla 7 de densidades de 0,6 a 0,9 g/cm³.

Masa de cemento mch (kg)	Volumen del espumante ve (L)	Densidad del hormigón celular dHC (g/cm ³)
160	663,150	0,600
180	621,044	0,667
200	578,938	0,735
220	536,832	0,802
240	494,725	0,870
260	452,619	0,937
280	410,513	1,005
300	368,407	1,072

Figura 12

Relación de espuma vs cemento para 1 m³ de hormigón celular de Mezcla 7.



Los resultados de la dosificación se muestran en el capítulo IV.

3.4.6.8. Mezcla 8.

En la Tabla 21, se detalla las cantidades que debe tener el hormigón celular con cemento alcalino, con 60% cemento, 40% zeolita y 0.50 de solución activadora, en cuanto a masa de cemento y el volumen del espumante para alcanzar densidades entre 600 – 900 kg/m³.

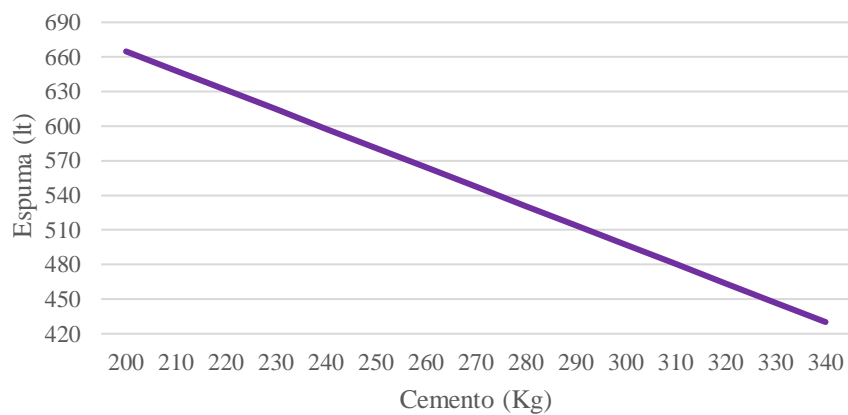
Tabla 21

Cálculos varios, obtención Mezcla 8 de densidades de 0,6 a 0,9 g/cm³.

Masa de cemento mch (kg)	Volumen del espumante ve (L)	Densidad del hormigón celular dHC (g/cm ³)
200	664,795	0,607
220	631,274	0,661
240	597,753	0,716
260	564,233	0,771
280	530,712	0,825
300	497,192	0,880
320	463,671	0,934
340	430,151	0,989

Figura 13

Relación de espuma vs cemento para 1 m³ de hormigón celular de Mezcla 8.



Los resultados de la dosificación se muestran en el capítulo IV.

3.4.6.9. Mezcla 9.

En la Tabla 22, se detalla las cantidades que debe tener el hormigón celular con cemento alcalino, con 70% cemento, 30% zeolita y 0.50 de solución activadora, en cuanto a masa de cemento y el volumen del espumante para alcanzar densidades entre 600 – 900 kg/m³.

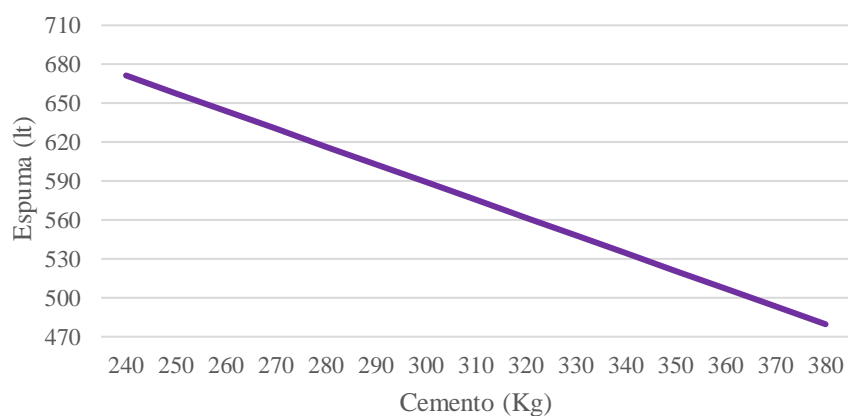
Tabla 22

Cálculos varios, obtención Mezcla 9 de densidades de 0,6 a 0,9 g/cm³.

Masa de cemento mch (kg)	Volumen del espumante ve (L)	Densidad del hormigón celular dHC (g/cm ³)
240	671,345	0,606
260	643,957	0,651
280	616,569	0,697
300	589,181	0,742
320	561,793	0,788
340	534,405	0,833
360	507,017	0,879
380	479,629	0,924

Figura 14

Relación de espuma vs cemento para 1 m³ de hormigón celular de Mezcla 9.



Los resultados de la dosificación se muestran en el capítulo IV.

3.5. METODOLOGÍA DEL OE.3: EVALUAR PROPIEDADES FÍSICAS - MECÁNICAS CARACTERÍSTICAS DE LAS DISTINTAS DOSIFICACIONES OBTENIDAS DE HORMIGONES CELULARES

3.5.1. Propiedades en estado fresco y endurecido del hormigón.

3.5.1.1. Cálculo de asentamiento (Cono de Abraham).

La norma NTE INEN 1578 (2010). establece los parámetros a seguir para la correcta realización del ensayo de asentamiento al hormigón en estado fresco.

Equipos y materiales para realizar el ensayo de Cono de Abraham

- Material para elaboración de hormigón celular.
- Molde.
- Varilla de compactación.
- Cucharón.
- Flexómetro.

Procedimiento:

1. Se humedece el molde, colocándolo en una superficie plana no absorbente. Se debe sostener firmemente el molde durante el llenado, esto se realiza parándose sobre los dos estribos.
2. Se procede al llenado del molde usando del cucharón, el molde se llena realizando 3 capas, cada una de aproximadamente un tercio del volumen del molde.
3. Se debe compactar cada capa con 25 golpes usando la varilla de compactación, tratando de que la mezcla quede distribuida de manera uniforme, las siguientes dos capas también se deben compactar tratando de que la varilla no penetre las capas compactadas anteriormente.

4. Después de llenar la última capa, se mantiene un excedente de hormigón, una vez compactado la capa superior.
5. Se procede a enrasar la superficie del hormigón rodando la varilla de compactación sobre el borde superior.
6. Finalmente se retira el molde en dirección vertical, y se mide el asentamiento, siendo este la diferencia vertical entre la parte superior del molde y la superficie superior del hormigón. Se debe tener presente que este ensayo debe realizarse en aproximadamente 3 min, desde que se inicia con el llenado hasta el retiro del molde.

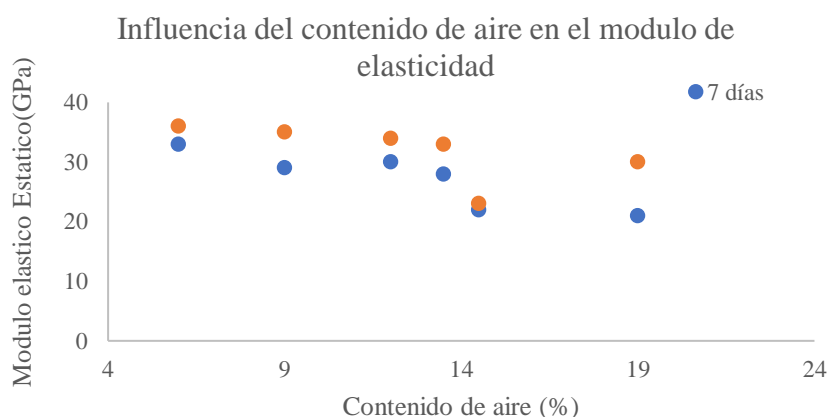
3.5.1.2. *Modulo elástico teórico.*

Una característica mecánica importante en el diseño de hormigones es el módulo de elasticidad, específicamente en el diseño por tensiones y desplazamientos. Generalmente es deducido a raíz de ensayos de probetas a compresión uniaxial. (Galobardes, Cavalaro, Aguado, Garcia, y Materials, 2014)

La literatura de morteros celulares expresa valores de módulo de elasticidad significativamente bajos en contraste a morteros normales. Dichos valores son correlacionados con la densidad. Por ejemplo, para 500 kg/m^3 un módulo de elasticidad estático de 1 KN/mm^2 , y para 1500 kg/m^3 un módulo de 8 KN/mm^2 . (Turro, Ramamurthy, Ramamurthy, y Scaiano, 2009)

Figura 15

Relación Modulo Elástico con contenido de aire.



El módulo también puede ser correlacionado con el porcentaje de aire en mezcla. (Panesar y materials, 2013) expresa que el módulo de elasticidad es inversamente proporcional al contenido de aire. Contrario a la resistencia a la compresión donde es directamente proporcional. Esto se aprecia en la Figura 15, que mediante una línea de tendencia se denota que el módulo de elasticidad es aproximadamente la raíz cuadrada de la resistencia a compresión.

En la Tabla 23 se muestra un resumen de fórmulas teóricas para calcular el módulo de elasticidad en función de la resistencia a compresión del mortero celular.

Tabla 23

Ecuaciones de predicción del módulo de elasticidad para el mortero celular.

Autores	Ecuación	Comentarios
Tada (1986)	$E = 5.31 * W - 853$	Densidad de 200 – 800 kg/m ³
McCormick (1967)	$E = 33 W^{1.5} \sqrt{f'c}$	Ecuación Pauw
Jones and	$E = 0.42 f'c^{1.18}$	Arena como agregado fino
MacCarthy (2005)	$E = 0.99 f'c^{0.67}$	Puzolanas como agregado fino

W – Densidad del hormigón (kg/m³), f'c – Fuerza compresiva (N/mm²), E en KN/mm²

Nota: Del artículo A Classification of Studies on Properties of Foam Concrete, Narayanan & Ramamurthy, 2009.

$$E = 33 x W^{1.5} \sqrt{f'c} \quad (38)$$

3.5.1.3. Mesa de flujo ASTM C230 (norma INEN 2500).

Este tipo de ensayo se utilizó para determinar la consistencia de la mezcla del hormigón celular que se expresa mediante el incremento de los diámetros del molde, después de una secuencia específica de movimientos.

Con los siguientes parámetros se pueden evaluar al hormigón celular:

- Baja fluidez: 150 mm o menos.
- Media fluidez: 150-200 mm
- Alta fluidez: superior a 200 mm

Equipos y materiales para realizar el ensayo de Cono de Abraham

- Mesa de flujo que cumpla con la Norma ASTM C230.
- Espátula.
- Molde de flujo
- Pistón pequeño.

Procedimiento.

1. Se debe nivelar sobre una superficie plana la mesa de flujo, y limpiar el plato (plataforma) para que no haya ningún tipo de residuo.
2. Se coloca el molde de flujo en el centro de la plataforma.
3. Se prepara la mezcla a ensayar y vaciar en el molde una capa de la mezcla, aproximadamente de 25 mm de espesor esperando que el compactador realice los 20 veces.
4. Llenar el molde con la mezcla y se apisona tal como se realizó en la primera capa y enrasar la superficie de la mezcla con ayuda de una espátula.
5. Quitar el molde de la mezcla y se seca la plataforma para remover el agua.
6. Dejar caer la mezcla por medio de la mesa a una altura de 13mm, 25 golpes durante 15 segundos.
7. Se toma lecturas de los diámetros y se determina la fluidez de la mezcla calculando el promedio de los diferentes diámetros a lo largo de las líneas señaladas en la plataforma.

Cálculos para obtener el % de fluidez de la mezcla de HC D600 y D800.

En la ecuación (39) explicamos la fórmula a usar en el porcentaje (%) de fluidez y detallamos su composición.

$$\%F = \frac{DI - A}{A} \quad (39)$$

Dónde:

%F = Porcentaje de fluidez de la mezcla.

DI = Diámetro promedio de las cuatro mediciones realizadas, mm.

A = Diámetro real de la base del molde, mm.

3.5.1.4. Tipo y tiempo de Curado.

Inicialmente se opta por un fraguado y curado a temperatura ambiente, pero debido a la naturaleza líquida de las muestras los tiempos resultan ser muy extensos y poco eficientes, por tal motivo se pone a prueba un tipo de curado térmico por vapor con temperatura constante sin presión, por un periodo de 2 horas, esperando que la temperatura reduzca en gran medida los tiempos de curado, y favorezca la ganancia temprana de resistencia a la compresión.

3.5.2. Ensayo de resistencia a la compresión.

Las muestras de hormigón celular sometidas a esta prueba mantienen dimensiones en una proporción de altura dos veces el diámetro. Siendo probetas de dimensiones 10x20 cm, deben estar en condiciones húmedas previo al ensayo para una mejor precisión en resultados de su resistencia.

Al tratarse de probetas de hormigón celular la carga axial óptima de configuración es de 0,24 MPa/s, misma que será aplicada de manera constante hasta la rotura. Debe usarse neoprenos, y centrar las muestras para que la máquina de ensayo de rotura arroje resultados precisos. Los días de ruptura definidos para este estudio son a los 7, 14 y 28 días.

Materiales y equipos.

- Máquina de ensayos de compresión hidráulica con suficiente capacidad para ejercer carga continua a la muestra.
- Neopreno
- Balanza con aproximación y exactitud de 0,1 g y 0,1 %.
- Vernier con precisión de 0,1 mm.

Procedimiento.

1. Conforme el día de rotura, seleccionar los cilindros de la zona de curado previos a romper.
2. Con ayuda de la balanza y del vernier, se registra el peso y las dimensiones del cilindro.
3. Se coloca los neoprenos en la cara superior e inferior del cilindro.
4. Se ubica de manera vertical y centrada el cilindro en la en la máquina de ensayos de compresión hidráulica.

Cálculos.

Se debe realizar una corrección de resistencia a los resultados con la siguiente fórmula:

$$C = \frac{P}{A} \quad (40)$$

Donde:

C: Resistencia a la compresión.

P: Carga máxima (Lecturas de ensayo)

A: Promedio del área del cilindro ensayado.

Resultados.

Los resultados se muestran en el capítulo IV.

3.6. METODOLOGÍA DEL OE.4: DETERMINAR LOS COSTOS DE ELABORACIÓN DE HORMIGONES CELULARES CON CEMENTO HIDRÁULICO HE Y CEMENTO HÍBRIDO DE ZEOLITA ACTIVADA

El análisis de costo consiste en desglosar el costo por unidad de medida de cada rubro, identificando los rendimientos, costos y cantidades de cada uno de los materiales a emplearse en el hormigón celular, y así establecer dichos costos en los diferentes componentes del rubro como: materiales, mano de obra, equipos y costos indirectos.

La determinación de los costos de elaboración de hormigones celulares con cemento híbrido de zeolita activada se efectuará mediante un análisis de precios unitarios por m³, posteriormente serán comparado con los costos de hormigones celulares con cemento convencional, para definir su viabilidad económica en el mercado de la construcción.

Se considerará los precios unitarios basados en valores comerciales de la provincia de Santa Elena, a excepción de ciertos materiales de condiciones específicas necesarias para el estudio que no están a disposición del mercado local y que fueron adquiridos en la provincia del Guayas.

Se detallarán los costos de elaboración de la solución activadora alcalina y de la espuma preformada, para consecutivamente ser usado como referentes junto a los demás materiales.

Finalmente, por medio de las cantidades de los materiales reflejadas por dosificación y por los precios referenciales recopilados se obtendrán los costos de producción de los hormigones celulares estudiados.

CAPÍTULO IV: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

4.1. ANÁLISIS DE RESULTADOS OE. 1: CARACTERIZAR LOS MATERIALES COMPONENTES PRESELECCIONADOS PARA LA OBTENCIÓN DE HORMIGONES CELULARES

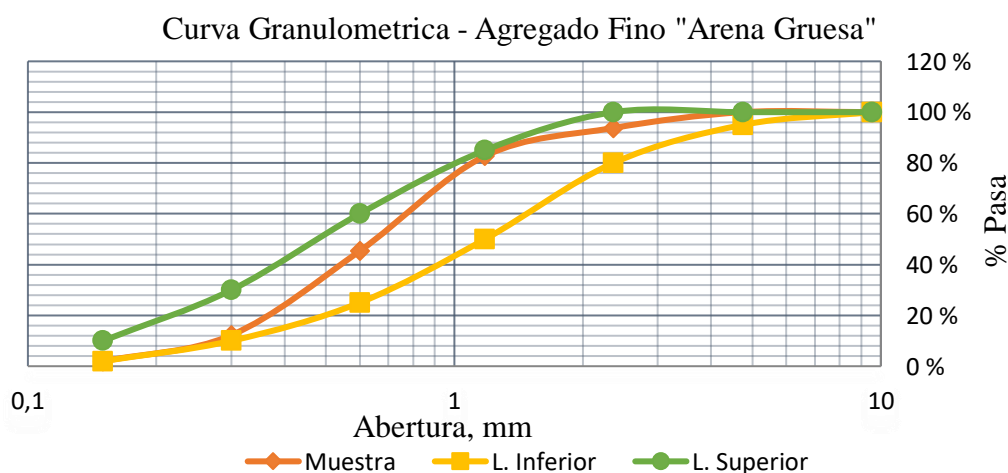
4.1.1. Agregado fino.

4.1.1.1. Granulometría y módulo de finura.

El arreglo de partículas de la arena se ha verificado por medio del ensayo de granulometría con el fin de trabajar bajo los parámetros normativos establecidos, seguidamente se calculó el módulo de finura a partir de los valores granulométricos anteriormente obtenidos, caracterizando a la arena por emplear en los hormigones celulares. Ver Figura 16 y Tabla 24.

Figura 16

Curva granulométrica de la arena gruesa.



Nota. Análisis granulométrico de acuerdo a NTE INEN 872 - ASTM C33.

Tabla 24*Modulo de finura del agregado fino – arena gruesa.*

Material	MF	Estándar
Arena gruesa	2.46	2,3 – 3,1

Nota. Módulo de finura de acuerdo a NTE INEN 872 / ASTM C33.

Basados en la norma ASTM C33/ C33M, C144, C330/ C330M o C332, que son especificaciones técnicas del agregado fino obtenemos los resultados de la granulometría detallados en el anexo 2, en la curva granulométrica ilustrada en la Figura 16 se observa que la granulometría realizada en la arena tiene un pequeño desfase en el tamiz No.16. En cuanto al módulo de finura se obtuvo un valor de 2.46 encontrándose dentro de los rangos requeridos por la norma.

4.1.1.2. *Peso volumétrico.*

En la Tabla 25 se ilustra el resultado del ensayo de peso volumétrico para el agregado fino conforme a la norma NTE INEM 858 (ASTM C-29)

Tabla 25*Peso volumétrico del agregado fino.*

Material	Peso volumétrico (kg/m³)
Arena gruesa	1387,90

Nota. De acuerdo a NTE INEM 858/ASTM C-29.**4.1.1.3. *Contenido de humedad.***

Conforme a la norma NTE INEN 862 (ASTM C-566) en la Tabla 26 se muestra el resultado del ensayo de contenido de humedad para el agregado fino.

Tabla 26*Contenido de humedad del agregado fino.*

Material	Contenido de humedad (%)
Arena gruesa	2,05

Nota. De acuerdo a NTE INEN 862/ASTM C-566.**4.1.1.4. Densidad saturada superficialmente seca y absorción.**

Basados en la norma NTE INEN 856 (ASTM- C128) se presenta el resultado del ensayo de densidad saturada superficialmente seca y porcentaje de absorción para el agregado fino en la Tabla 27.

Tabla 27*Densidad Saturada Superficialmente Seca y absorción del agregado fino.*

Material	D.S.S.S (g/cm³)	Absorción (%)
Arena gruesa	2,46	1,36

Nota. De acuerdo a NTE INEN 856/ASTM- C128.**4.1.2. Zeolita.****4.1.2.1. Granulometría por hidrómetro.**

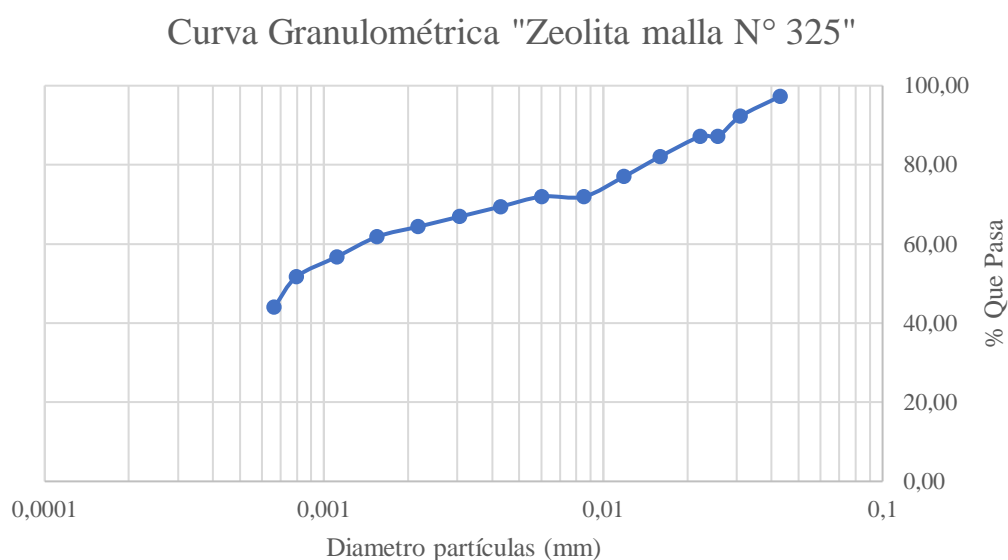
Para el presente trabajo se ha realizado la granulometría por hidrómetro para verificar que la zeolita cumpla con la finura del cemento y así poder ser utilizada en la elaboración de hormigón celular como parte del cemento alcalino, ver Figura 17 y Anexo 3.

En el anexo 3 se observa que del 85% de material pasante de la malla N°200 que se empleó para realizar el ensayo de hidrómetro, que el 82,72% de material es más fino que 0,043mm, por lo que se considera que el 97,32%

del material pasa la malla con 0,043mm de abertura, considerando a la zeolita apta para ser utilizada como material cementante y sustituir en una parte al cemento hidráulico HE en las dosificaciones realizadas.

Figura 17

Curva granulométrica de la zeolita por método de hidrómetro.



Nota. De acuerdo a ASTM D7928.

4.1.2.2. *Peso volumétrico.*

En la Tabla 28, se ilustra el resultado del ensayo de peso volumétrico para la zeolita malla N°325 en base a la norma NTE INEM 858 (ASTM C-29).

Tabla 28

Peso volumétrico de la zeolita para elaboración de hormigón celular.

Material	Peso volumétrico (kg/m³)
Zeolita	868,33

Nota. De acuerdo a NTE INEM 858/ASTM C-29.

4.1.2.3. *Contenido de humedad.*

Basados en la norma NTE INEN 862 (ASTM C-566), se presenta el resultado del ensayo para la zeolita mostrado en la Tabla 29.

Tabla 29

Contenido de humedad de la zeolita para elaboración de hormigón celular.

Material	Contenido de humedad (%)
Zeolita	2,80

Nota. De acuerdo a NTE INEN 862/ASTM C-566.

4.1.2.4. *Densidad saturada superficialmente seca y absorción.*

En la Tabla 30 se presenta el resultado de los ensayos para la zeolita conforme la norma NTE INEN 856 (ASTM- C128).

Tabla 30

Densidad Saturada Superficialmente Seca y absorción de la zeolita.

Material	D.S.S.S (g/cm³)	Absorción (%)
Zeolita	2,35	3,47

Nota. De acuerdo a NTE INEN 856/ASTM- C128.

4.1.3. **Activador alcalino.**

Mediante la concentración del hidróxido de sodio se determinó la molaridad de nuestro concentrado de NaOH al 50% de pureza (18,75 M), para encontrar la cantidad de agua necesaria que debemos agregar para tener un 32% de pureza (12 M) y así poder tener las cantidades que necesitamos para obtener nuestra solución activadora, teniendo para nuestra solución una relación de 1 hidróxido de sodio al 32% al 2 silicato de sodio con ratio 2,92.

En la Tabla 31 se detalla la cantidad de agua destilada que se debe agregar a un litro de la disolución de soda caustica al 50% para obtener una molaridad de 12M.

Tabla 31

Cantidades necesarias en el proceso de disolución de NaOH con 50 % de pureza.

Material	Unidad	Cantidad	% (Volumen)
Hidróxido de sodio	kg	1,5	64
	L	1	
Agua destilada	kg	0,561	36
	L	0,563	
Hidróxido de sodio (12 M)	kg	2,344	100
	L	1,563	

Nota: Se detallan los volúmenes en porcentajes de la disolución.

En la Tabla 32, se detalla las cantidades necesarias para poder obtener la solución activadora alcalina para ser empleada en el hormigón celular con cemento alcalino. Se trabaja con una proporción 1 (NaOH): 2 (Na₂SiO₃) en volumen.

Tabla 32

Cantidades necesarias para la creación de la solución activadora alcalina.

Material	Unidad	Cantidad	% (Volumen)
Hidróxido de sodio (12 M)	kg	2,344	33,33
	L	1,563	
Silicato de sodio	kg	4,387	66,67
	L	3,125	
Solución activadora alcalina	kg	6,448	100
	L	4,688	

Nota: La cantidad de hidróxido de sodio es referente a la anteriormente diluida.

En la Tabla 33 se detallan las propiedades físicas resultantes de la solución activadora que se empleó en la elaboración del hormigón celular con cemento híbrido alcalino.

Tabla 33

Propiedades físicas de la solución activadora.

Apariencia:	Líquido, corrosivo, viscoso, incoloro
Densidad:	1.38 g/cm ³
Color:	Gris opalescente claro
pH:	13,5

4.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS OE. 2: ELABORAR DOSIFICACIONES DE HORMIGONES CELULAR PATRÓN Y CON SUSTITUCIÓN DE CEMENTO POR ZEOLITA ACTIVADA CON SOLUCIÓN ALCALINA

A través del método experimental de volúmenes aparentes, se obtuvo las dosificaciones requeridas para alcanzar las densidades de 600 y 800 kg/m³ tanto como para el hormigón celular con 100% cemento hidráulico HE y para hormigones celulares con cemento híbrido alcalino, considerando que la densidad de diseño en estado fresco sobredimensionada en un 5% de la densidad buscada, funcionó adecuadamente.

Cabe indicar que para densidades de 600kg/m³ se tuvo problemas en la dosificación con relación a la zeolita y porcentaje de agua, siendo así que para la mezcla MP.1-600 con 50% cemento y 50% zeolita sin solución activadora no se tuvo probetas que puedan ser ensayadas, debido a revenimientos considerables en estado fresco, siendo posible solo obtener hormigón celular de 800kg/m³ en adelante.

En la Tabla 34, se ilustran las dosificaciones de hormigones celulares con densidad de 600 kg/ m³ primero haciendo el cálculo para 1m³ y posteriormente para 9 cilindros con un volumen de 0,014 m³.

Tabla 34*Dosificaciones de hormigones celulares D600.*

Mezcla	Cemento (kg)	Zeolita (kg)	Agua (kg)	Activador (kg)	Espuma (L)	Cantidad
MP-600	393,000	0,000	196,500	0,000	678,738	1 m ³
	5,556	0,000	2,778	0,000	9,595	0,014 m ³
MP.1-600	197,000	197,000	197,000	0,000	656,631	1 m ³
	2,785	2,785	2,785	0,000	9,283	0,014 m ³
M1-600	174,000	174,000	174,000	69,600	646,285	1 m ³
	2,460	2,460	2,460	0,984	9,137	0,014 m ³
M2-600	214,000	142,667	178,333	57,067	651,668	1 m ³
	3,025	2,017	2,521	0,807	9,213	0,014 m ³
M3-600	255,000	109,286	182,143	43,714	658,723	1 m ³
	3,605	1,545	2,575	0,618	9,312	0,014 m ³
M4-600	172,000	172,000	172,000	77,400	644,118	1 m ³
	2,432	2,432	2,432	1,094	9,106	0,014 m ³
M5-600	211,000	140,667	175,833	63,300	651,455	1 m ³
	2,983	1,989	2,486	0,895	9,210	0,014 m ³
M6-600	253,000	108,429	180,714	48,793	657,471	1 m ³
	3,577	1,533	2,555	0,690	9,295	0,014 m ³
M7-600	169,000	169,000	169,000	84,500	644,202	1 m ³
	2,389	2,389	2,389	1,195	9,107	0,014 m ³
M8-600	209,000	139,333	174,167	69,667	649,710	1 m ³
	2,955	1,970	2,462	0,985	9,185	0,014 m ³
M9-600	251,000	107,571	179,286	53,786	656,282	1 m ³
	3,548	1,521	2,535	0,760	9,278	0,014 m ³

Nota: Dosificaciones diseñado para 1 m³ y para 9 cilindros de 10x20cm.

A continuación, se ilustra la distribución volumétrica de los hormigones celulares con densidad de 600 kg/ m³ para las dosificaciones ensayadas.

Figura 18

Distribución volumétrica porcentual de hormigones celulares D600.

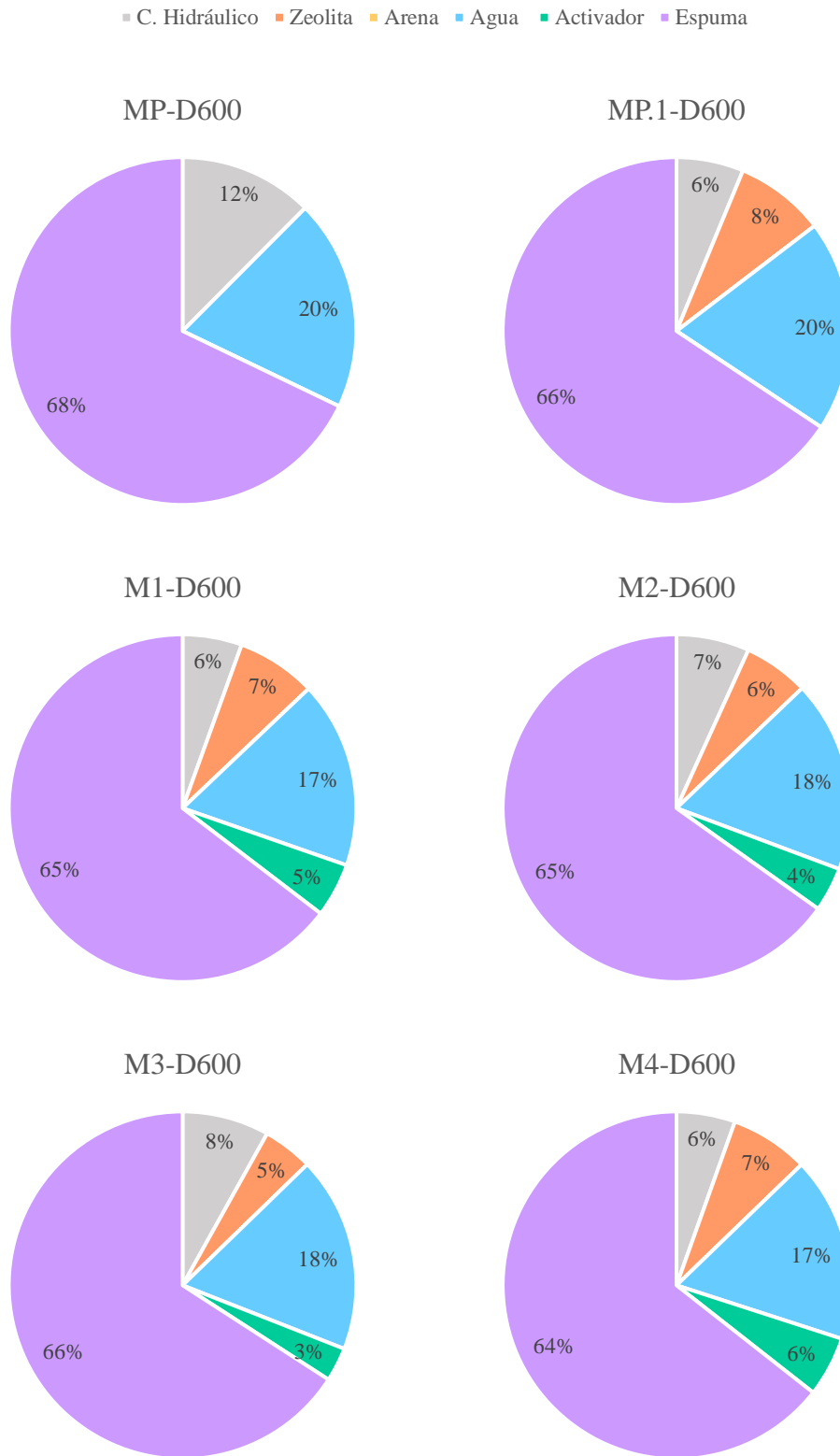
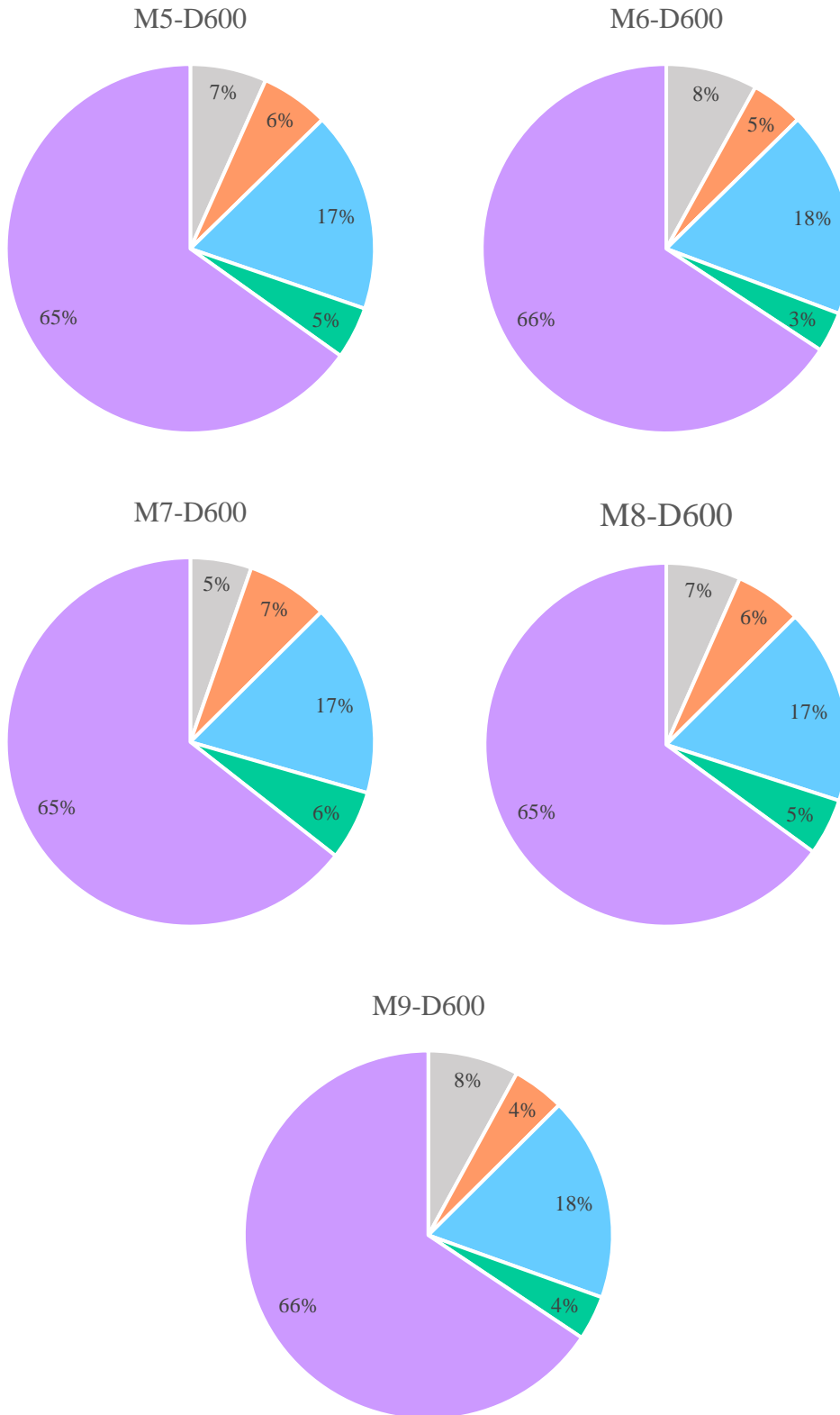


Figura 19

Distribución volumétrica porcentual de hormigones celulares D600.

■ C. Hidráulico ■ Zeolita ■ Arena ■ Agua ■ Activador ■ Espuma



En la Tabla 35, se ilustran las dosificaciones de hormigones celulares con densidad de 800 kg/m³.

Tabla 35

Dosificaciones de hormigones celulares D800.

Mezcla	Cemento (kg)	Zeolita (kg)	Agua (kg)	Activador (kg)	Espuma (L)	Cantidad
MP-800	538,000	0,000	269,000	0,000	560,206	1 m ³
	7,606	0,000	3,803	0,000	7,920	0,014 m ³
MP.1-800	270,000	270,000	270,000	0,000	529,392	1 m ³
	3,817	3,817	3,817	0,000	7,484	0,014 m ³
M1-800	238,000	238,000	238,000	95,200	516,182	1 m ³
	3,365	3,365	3,365	1,346	7,297	0,014 m ³
M2-800	293,000	195,333	244,167	78,133	523,079	1 m ³
	4,142	2,761	3,452	1,105	7,395	0,014 m ³
M3-800	349,000	149,571	249,286	59,829	532,919	1 m ³
	4,934	2,115	3,524	0,846	7,534	0,014 m ³
M4-800	235,000	235,000	235,000	105,750	513,766	1 m ³
	3,322	3,322	3,322	1,495	7,263	0,014 m ³
M5-800	289,000	192,667	240,833	86,700	522,609	1 m ³
	4,086	2,724	3,405	1,226	7,388	0,014 m ³
M6-800	346,000	148,286	247,143	66,729	531,562	1 m ³
	4,891	2,096	3,494	0,943	7,515	0,014 m ³
M7-800	232,000	232,000	232,000	116,000	511,568	1 m ³
	3,280	3,280	3,280	1,640	7,232	0,014 m ³
M8-800	286,000	190,667	238,333	95,333	520,656	1 m ³
	4,043	2,695	3,369	1,348	7,361	0,014 m ³
M9-800	343,000	147,000	245,000	73,500	530,297	1 m ³
	4,849	2,078	3,464	1,039	7,497	0,014 m ³

Nota: Cada una de las dosificaciones está diseñada para 1 m³ y para 9 cilindros de 10x20cm.

A continuación, se ilustra la distribución volumétrica de los hormigones celulares con densidad de 800 kg/ m³ para las dosificaciones ensayadas.

Figura 20

Distribución volumétrica porcentual de hormigones celulares D800.

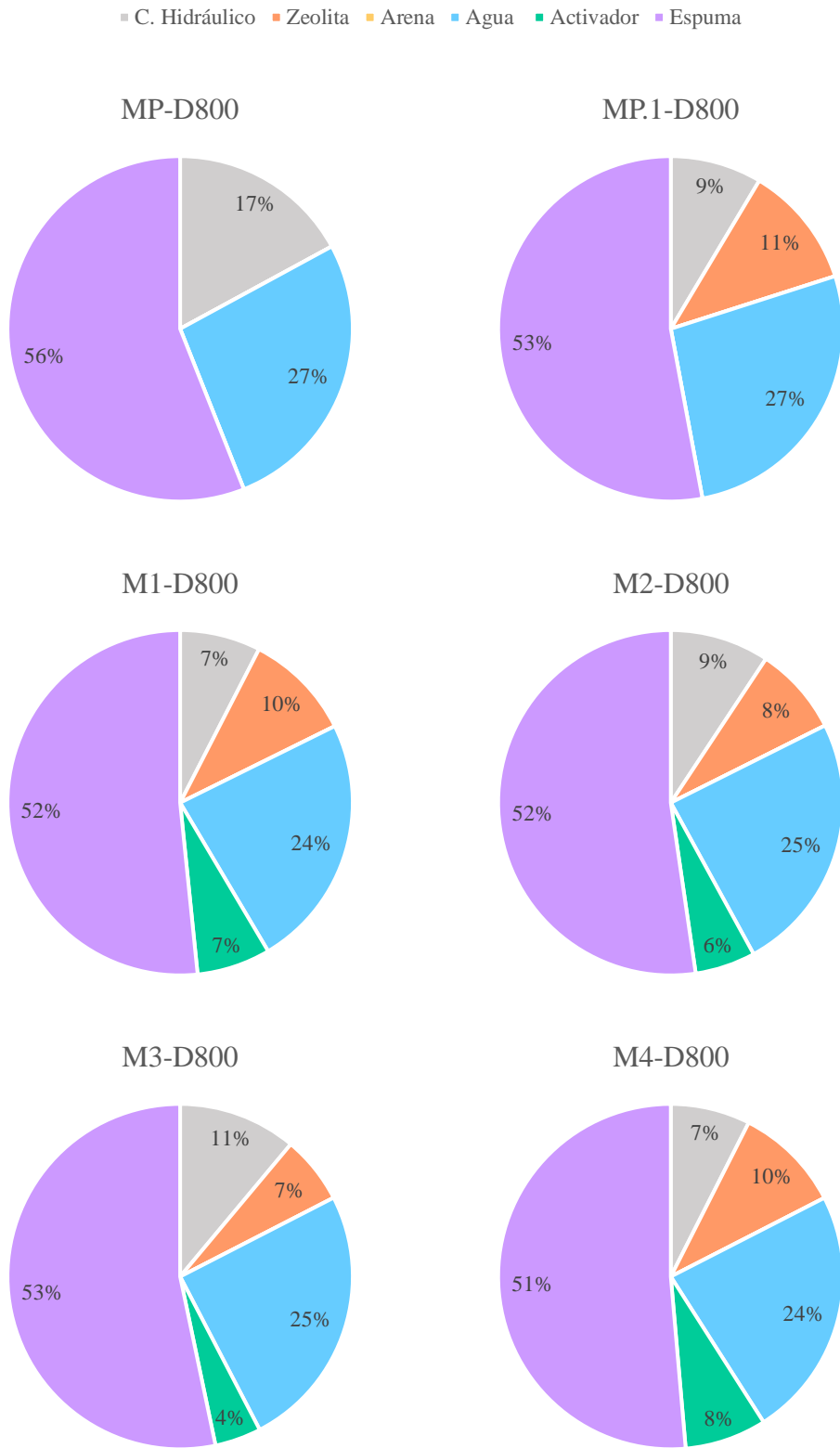
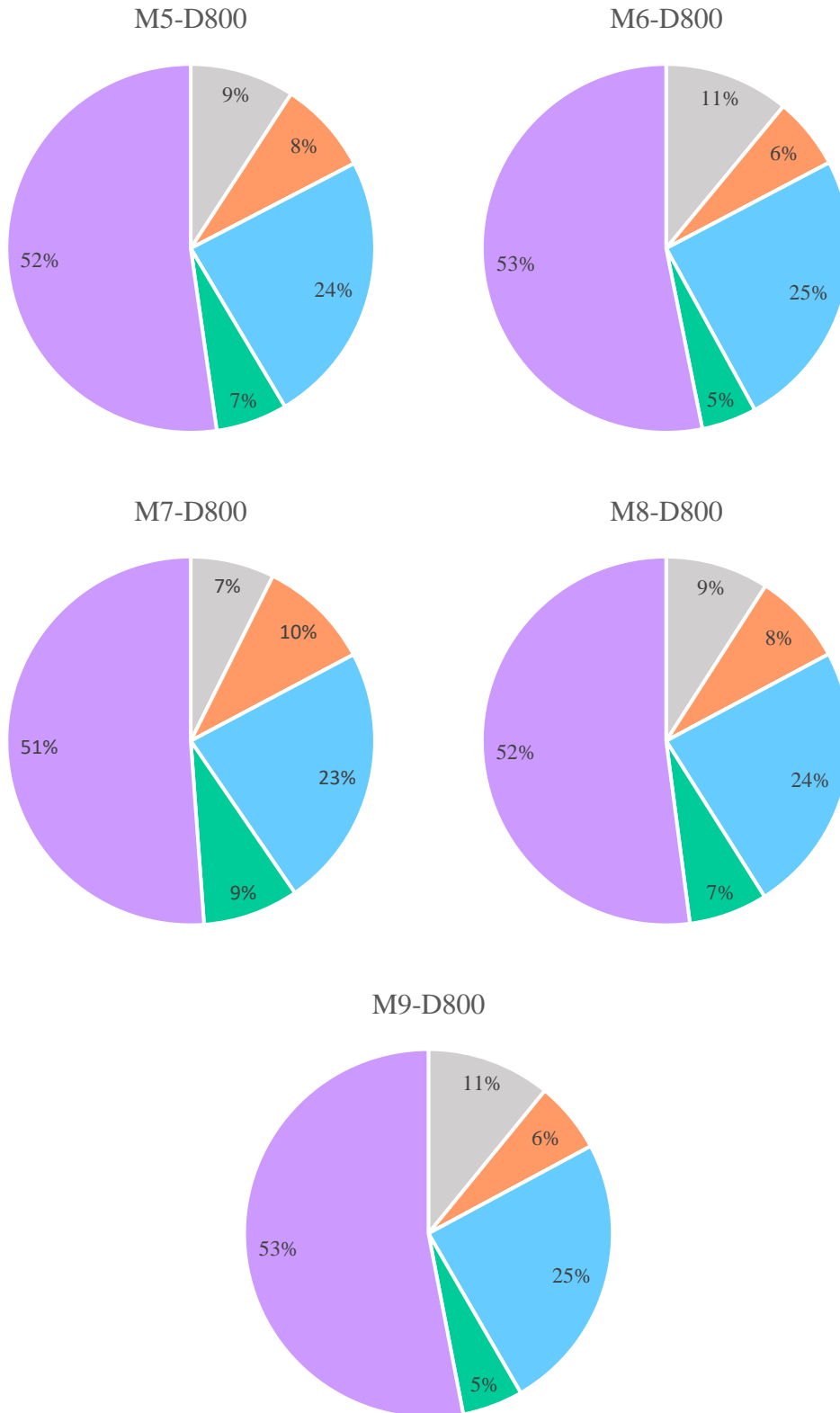


Figura 21

Distribución volumétrica porcentual de hormigones celulares D800.

■ C. Hidráulico ■ Zeolita ■ Arena ■ Agua ■ Activador ■ Espuma



4.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS OE. 3: EVALUAR PROPIEDADES FÍSICA - MECÁNICAS CARACTERÍSTICAS DE LAS DISTINTAS DOSIFICACIONES OBTENIDAS DE HORMIGONES CELULARES

4.3.1. Propiedades en estado fresco y endurecido.

4.3.1.1. Asentamiento.

En la Tabla 36, se muestran los resultados de los asentamientos obtenidos de las mezclas D600 y D800, en donde se puede observar que ambas mezclas se asientan casi en su totalidad, por lo que nuestras mezclas tienen consistencias muy fluida.

Al realizar el ensayo de cono de Abrams y verificar la consistencia de las mezclas de hormigón celular, se logra notar que el rango de dispersión de las diferentes muestras varía entre 27 y 28 cm, dependiendo de su densidad.

Sin embargo, se trabajó con esta cantidad de agua por motivos que la zeolita al ser porosa y absorbente al momento del fraguado al tener una relación a/c menor iba a provocar que la probeta tenga un revenimiento considerable, por lo que no sería posible el uso de dicha muestra para los ensayos mecánicos correspondientes.

Tabla 36

Datos de asentamiento de la mezcla D600 y D800.

Densidad (kg/m ³)	Agregado	a/c	D. Espuma (kg/m ³)	Asentamiento	
				in	cm
600	Arena	0.5	63	11,02	28
800		0.5	63	10,63	27

Nota: Valores obtenidos del ensayo de asentamiento.

4.3.1.2. *Módulo de elasticidad teórico.*

Usando la ecuación (38), calculamos el módulo elástico teórico obtenido con las mezclas M6 D600 y M6 D800.

$$E_1 = 33 \times 800^{1.5} \sqrt{1,04}$$
$$E_1 = 494603,84 \text{ KN/mm}^2$$

$$E_2 = 33 \times 800^{1.5} \sqrt{1,64}$$
$$E_2 = 611101,73 \text{ KN/mm}^2$$

4.3.1.3. *Mesa de flujo.*

Una vez se realizó el ensayo de la mesa de flujo, dio como resultados diámetros superiores a 200 mm, en todas las dosificaciones diseñadas de hormigones celulares, por lo que se considera que el hormigón celular D600 y D800 tienen una alta fluidez, tal como se indica en la Tabla 37.

Tabla 37

Porcentaje de Fluidez obtenido del ensayo mesa de flujo.

Densidad (kg/m³)	Diámetro promedio (mm)	Diámetro inicial (mm)	%fluidez
600	248,5	125	98,80%
800	247	125	97,60%

4.3.1.4. *Tipo y tiempo de Curado.*

El curado térmico a vapor de temperatura constante sin presión mostró una reducción del tiempo de fraguado de todas las muestras en un 50 %, es decir de dos días que se requerían inicialmente para desencofrar las probetas al final solo se pudo desencofrar al siguiente día. Por otra parte, no existió una ganancia notable de resistencias tempranas en comparación del curado a temperatura ambiente.

4.3.2. Resistencia a la compresión.

4.3.2.1. Hormigones celulares D600.

Se realizó el seguimiento del aumento de resistencia a la compresión de las distintas muestras D600 a edades de 7, 14 y 28 días, además se registró su respectiva densidad, tanto en estado fresco como en endurecido, considerando que todas fueron diseñadas para densidades de 630 kg/m³.

Todas las muestras se desarrollaron sin problemas, a excepción de la MP.1, que presentó un considerable asentamiento provocando que no se permita su estudio respectivo, acotando que esta muestra no posee activador alcalino, pero sí zeolita.

Tabla 38

Densidad a distintas edades de hormigones celulares D600.

DENSIDAD (kg/m ³)					
Nomenclatura	Mezcla Información	Fresco		Endurecida	
		0 días	7 días	14 días	28 días
MP-600	100%C 0%Z 0ACT	642	612	592	582
MP.1-600	50%C 50%Z 0Act	609	-	-	-
M1-600	50%C 50%Z 0.40Act	618	602	594	584
M2-600	60%C 40%Z 0.40Act	615	604	593	580
M3-600	70%C 30%Z 0.40Act	621	618	615	610
M4-600	50%C 50%Z 0.45Act	622	609	601	586
M5-600	60%C 40%Z 0.45Act	618	606	598	586
M6-600	70%C 30%Z 0.45Act	616	614	610	603
M7-600	50%C 50%Z 0.50Act	631	614	605	593
M8-600	60%C 40%Z 0.50Act	611	597	593	583
M9-600	70%C 30%Z 0.50Act	623	618	616	613

Nota: Densidades promedio de muestras D600 a distintas edades.

En la Tabla 38, se muestran los valores promedios de densidades de muestras D600, mientras que en la Tabla 39 se sitúan las resistencias registradas de las probetas ensayadas junto a su promedio.

También se detallan por medio de gráficas la evolución de la resistencia a la compresión a distintas edades de muestras D600. En la Figura 22 se han todas las resistencias a la compresión promedio de la Tabla 39 seguidamente se representan por separado las mismas resistencias con relación activador/zeolita de 0,4, 0,45 y 0,5 en las Figura 23, Figura 24 y Figura 25 respectivamente, además de las cantidades de 50 % Cemento + 50 Zeolita, 60 % Cemento + 40 Zeolita y 70 % Cemento + 30 Zeolita en las Figura 26, Figura 27 y Figura 28 respectivamente.

Por último, en las Figura 29 y Figura 30, se grafica el comportamiento de la resistencia mecánica de muestras D600 a los 28 días bajo las variables activador/zeolita y % cemento + % Zeolita correspondientemente.

Tabla 39*Resistencia a la compresión a distintas edades de hormigones celulares D600.*

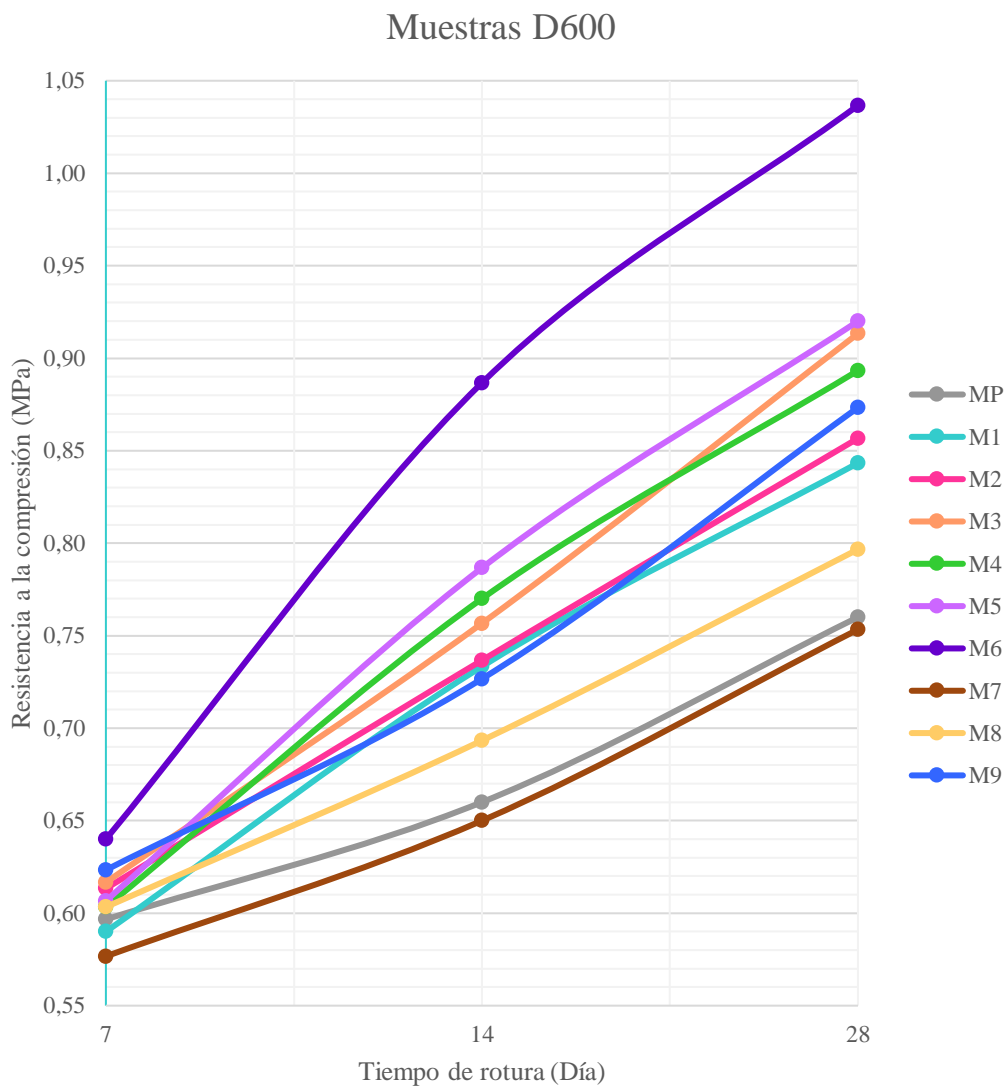
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (MPa)													
Mezcla		7 días				14 días				28 días			
Nomenclatura	Información	1	2	3	f 'c	1	2	3	f 'c	1	2	3	f 'c
MP-600	100%C 0%Z 0Act	0,60	0,58	0,61	0,60	0,70	0,60	0,68	0,66	0,78	0,72	0,78	0,76
MP.1-600	50%C 50%Z 0Act	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
M1-600	50%C 50%Z 0.40Act	0,59	0,58	0,60	0,59	0,74	0,75	0,71	0,73	0,82	0,85	0,86	0,84
M2-600	60%C 40%Z 0.40Act	0,60	0,59	0,65	0,61	0,70	0,75	0,76	0,74	0,87	0,88	0,82	0,86
M3-600	70%C 30%Z 0.40Act	0,64	0,61	0,60	0,62	0,77	0,77	0,73	0,76	0,98	0,86	0,90	0,91
M4-600	50%C 50%Z 0.45Act	0,62	0,57	0,62	0,60	0,79	0,77	0,75	0,77	0,90	0,93	0,85	0,89
M5-600	60%C 40%Z 0.45Act	0,65	0,59	0,58	0,61	0,78	0,78	0,80	0,79	0,95	0,91	0,90	0,92
M6-600	70%C 30%Z 0.45Act	0,59	0,66	0,67	0,64	0,87	0,89	0,90	0,89	1,01	1,03	1,07	1,04
M7-600	50%C 50%Z 0.50Act	0,58	0,58	0,57	0,58	0,69	0,64	0,62	0,65	0,75	0,73	0,78	0,75
M8-600	60%C 40%Z 0.50Act	0,59	0,60	0,62	0,60	0,63	0,74	0,71	0,69	0,80	0,76	0,83	0,80
M9-600	70%C 30%Z 0.50Act	0,62	0,61	0,64	0,62	0,67	0,75	0,76	0,73	0,89	0,88	0,85	0,87

Nota: Recopilación de datos de resistencia a la compresión de las probetas ensayadas junto a su promedio en diferentes edades de las dosificaciones estudiadas.

Desde una vista general de la resistencia a la compresión de las dosificaciones D600, la mezcla 6 de material cementante 70 % cemento + 30 % Zeolita cuenta con la más alta resistencia de 1,04 MPa, a los 28 días, superior en un 36,84 % a la mezcla patrón de material cementante 100 % cemento + 0 % Zeolita (0,76 MPa). En su contraparte, la mezcla 7 registra la más baja resistencia de 0,75 MPa, inferior en un 1,32 % a la mezcla patrón anteriormente mencionada

Figura 22

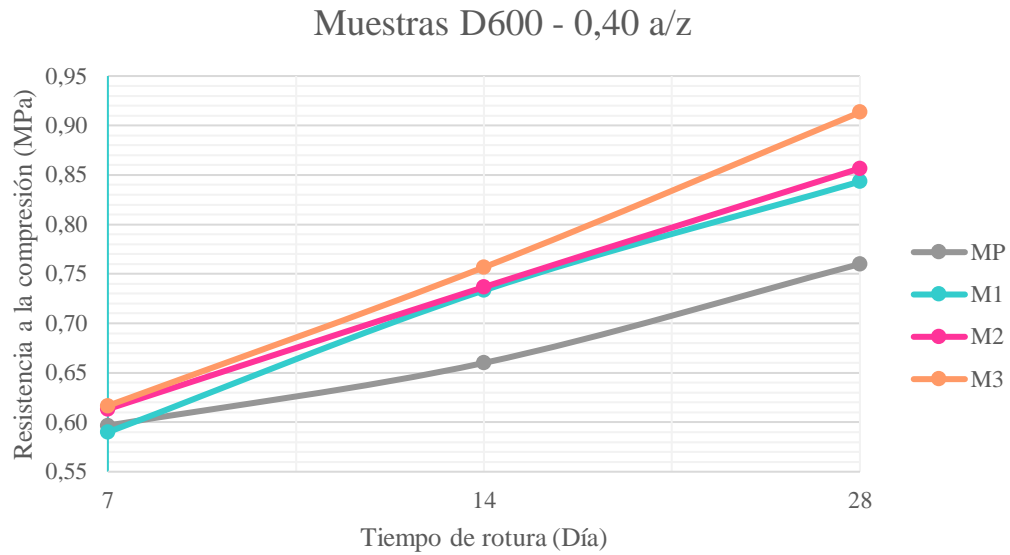
Variación de la resistencia a la compresión a distintas edades de hormigones celulares D600.



Nota: Progresión de la resistencia a la compresión promedio de las probetas ensayadas de todas las dosificaciones 600 kg/m³ estudiadas.

Figura 23

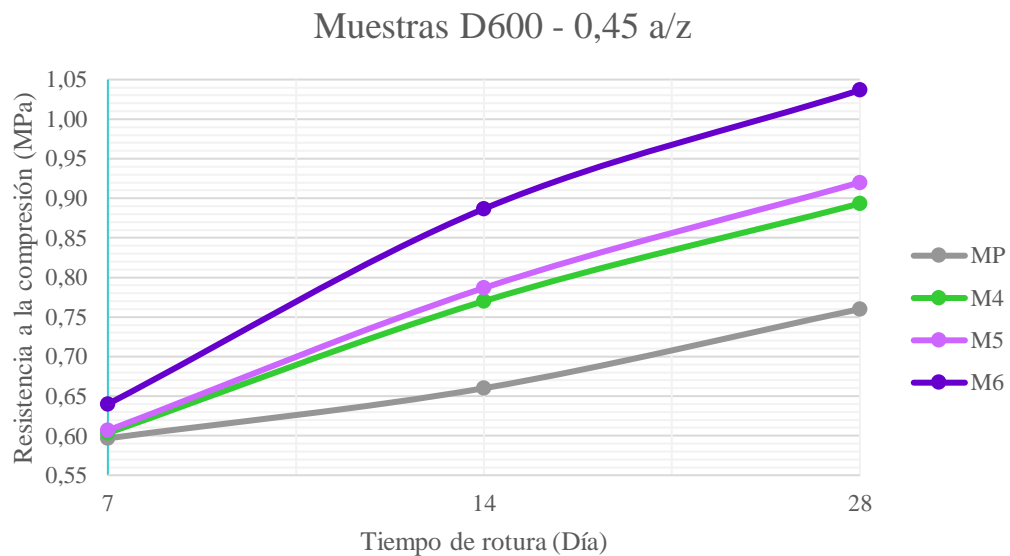
Variación de la resistencia a la compresión a distintas edades de hormigones celulares D600 con una relación activador/zeolita del 0,40.



Nota: Probetas a una misma relación activador/zeolita, pero con 30%, 40% y 50% de zeolita como material cementante, comparados con la mezcla patrón.

Figura 24

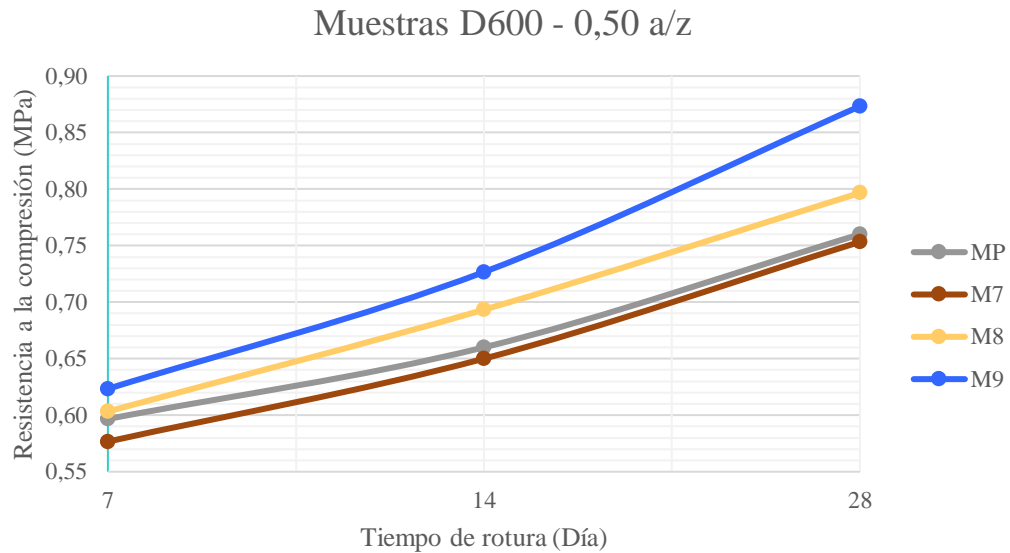
Variación de la resistencia a la compresión a distintas edades de hormigones celulares D600 con una relación activador/zeolita del 0,45.



Nota: Probetas a una misma relación activador/zeolita, pero con 30%, 40% y 50% de zeolita como material cementante, comparados con la mezcla patrón.

Figura 25

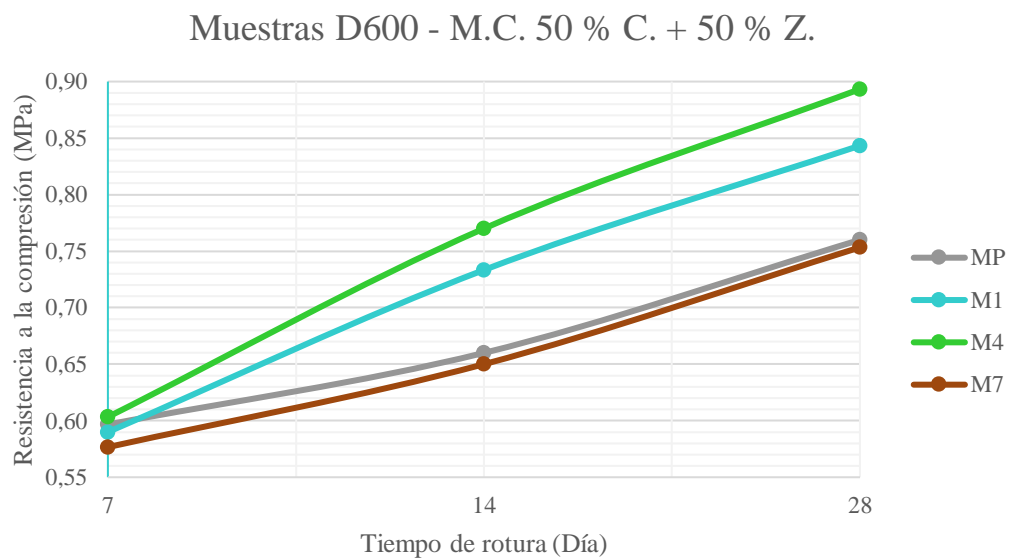
Variación de la resistencia a la compresión a distintas edades de hormigones celulares D600 con una relación activador/zeolita del 0,50.



Nota: Probetas a una misma relación activador/zeolita, pero con 30%, 40% y 50% de zeolita como material cementante, comparados con la mezcla patrón.

Figura 26

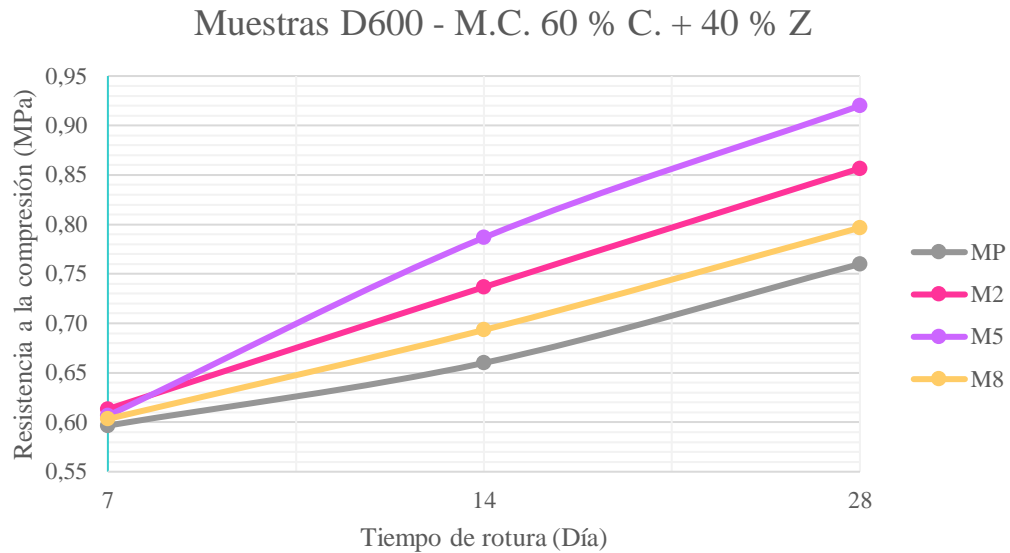
Variación de la resistencia a la compresión a distintas edades de hormigones celulares D600 con material cementante 50 % C. + 50 % Z.



Nota: Probetas a una misma cantidad porcentual de material cementante, pero con 0,40, 0,45 y 0,50 de activador/zeolita, comparados con la mezcla patrón.

Figura 27

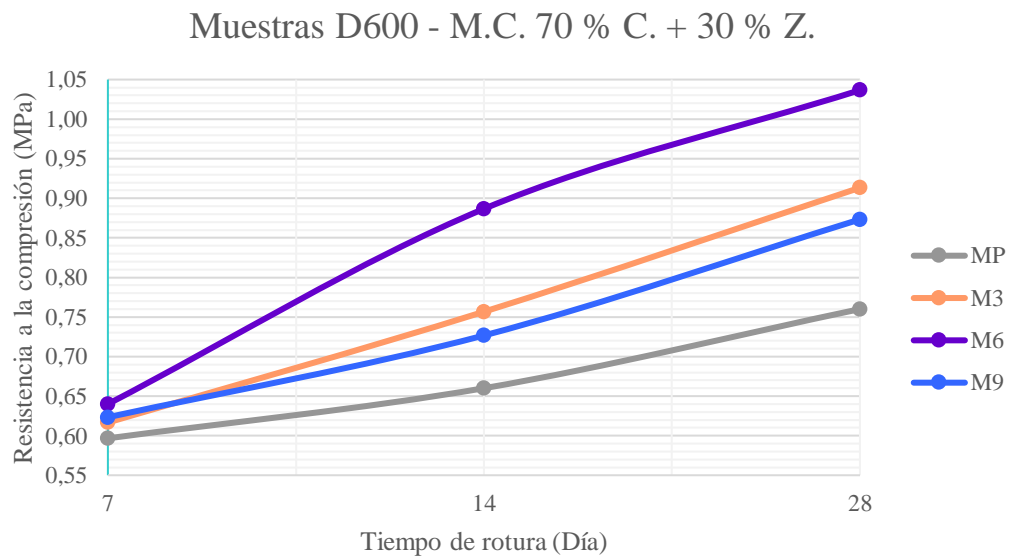
Variación de la resistencia a la compresión a distintas edades de hormigones celulares D600 con material cementante 60 % C. + 40 % Z.



Nota: Probetas a una misma cantidad porcentual de material cementante, pero con 0,40, 0,45 y 0,50 de activador/zeolita, comparados con la mezcla patrón.

Figura 28

Variación de la resistencia a la compresión a distintas edades de hormigones celulares D600 con material cementante 70 % C. + 30 % Z.

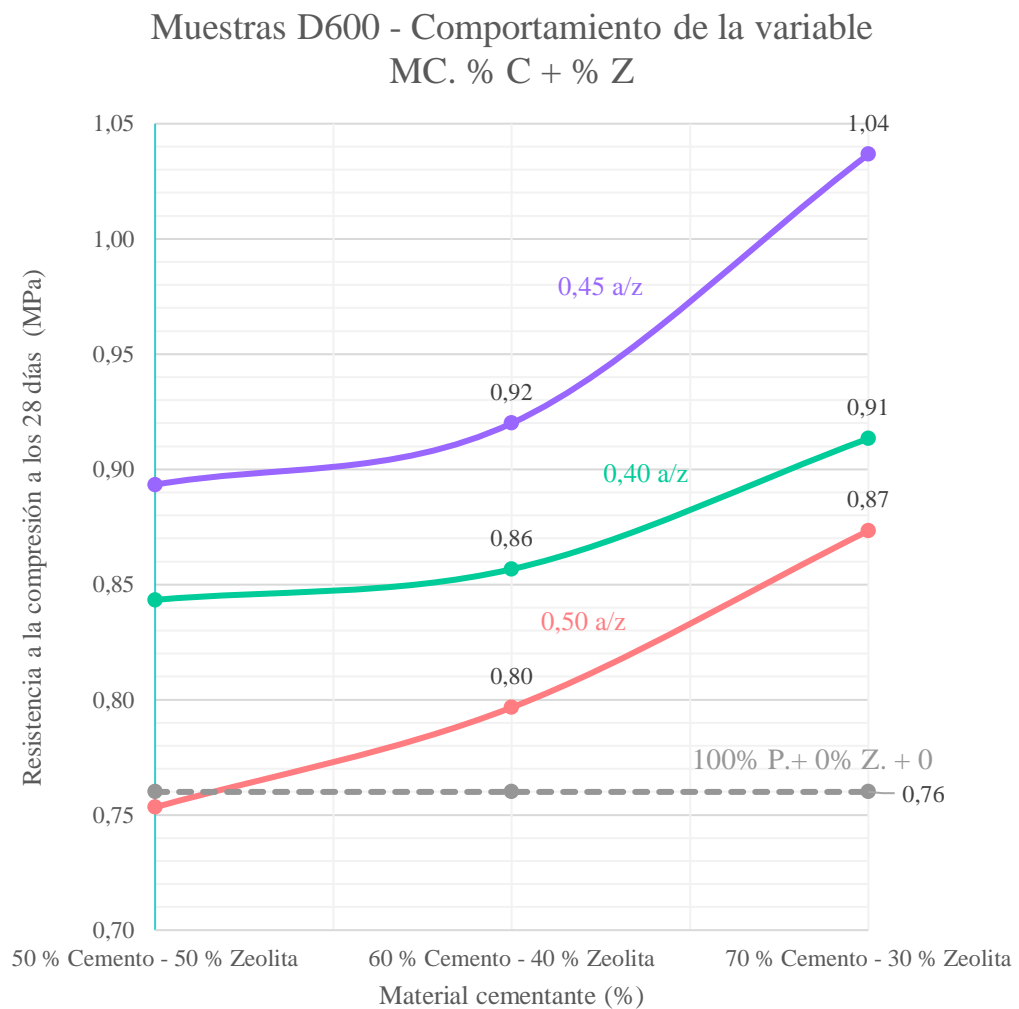


Nota: Probetas a una misma cantidad porcentual de material cementante, pero con 0,40, 0,45 y 0,50 de activador/zeolita, comparados con la mezcla patrón.

- a) **Análisis del comportamiento de la variable zeolita como material cementante suplementario en mezclas D600.** El comportamiento de la resistencia a la compresión, a los 28 días, de la variable zeolita como material cementante suplementario al cemento hidráulico tiene una tendencia a crecer inversamente proporcional a la cantidad de zeolita en la constitución de la mezcla, en todas las relaciones activador/zeolitas estudiadas D600. Revisar Figura 29.

Figura 29

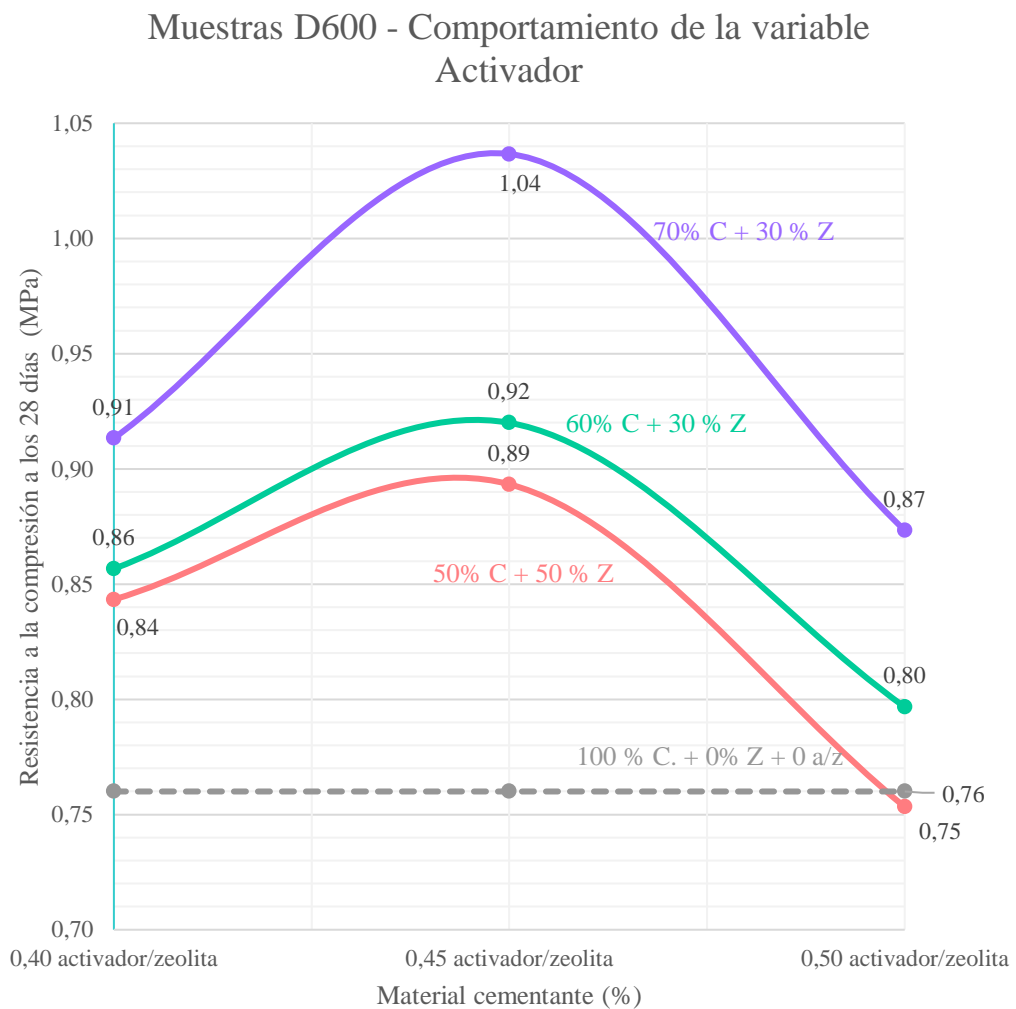
Resistencia a la compresión bajo la variable % Cemento + % Zeolita en muestras D600.



b) **Análisis del comportamiento de la variable relación activador/zeolita en mezclas D600.** El comportamiento de la resistencia a la compresión, a los 28 días, de la variable activador/zeolita tiene una tendencia ascendente a mayor relación hasta alcanzar un determinado pico y comenzar a descender gradualmente. Revisar Figura 30.

Figura 30

Resistencia a la compresión bajo la variable Activador/Zeolita en muestras D600.



- c) **Interpretación porcentual del comportamiento de la resistencia a la compresión en mezclas D600.** En la Tabla 40 se encuentra en porcentaje la pérdida o ganancia de resistencia a la compresión, sobre la mezcla patrón, bajo ambas variables.

Tabla 40

Porcentajes de pérdida o ganancia de resistencia a la compresión de muestras D600 con respecto a la mezcla patrón.

Material cementante	Relaciones activador/zeolita		
	0,40 a/z	0,45 a/z	0,50 a/z
50 % C + 50% z	+ 10,53 %	+ 17,11 %	- 1,32 %
60 % C + 40% z	+ 13,16 %	+ 21,05 %	+ 5,26 %
70 % C + 30% z	+ 19,74 %	+ 36,84 %	+ 14,47 %

Nota: La mezcla patrón tiene un $f'c$ de 0,76 MPa.

4.3.2.2. Hormigones celulares D800.

Se realizó el seguimiento del aumento de resistencia a la compresión de las distintas muestras D800 a edades de 7, 14 y 28 días, además se registró su respectiva densidad, tanto en estado fresco como en endurecido, considerando que todas fueron diseñadas para densidades de 840 kg/m³.

En la Tabla 41 se muestran los valores promedios de densidades de muestras D800, mientras que en la Tabla 42 se sitúan las resistencias registradas de las probetas ensayadas junto a su promedio.

También se detallan por medio de gráficas la evolución de la resistencia a la compresión a distintas edades de muestras D600. En la Figura 31 se hayan todas las resistencias a la compresión promedio de la Tabla 42 seguidamente se representan por separado las mismas resistencias con relación activador/zeolita de 0,4, 0,45 y 0,5 en las Figura 32, Figura 33 y Figura 34 respectivamente, además de las cantidades de 50 % Cemento + 50 Zeolita, 60 % Cemento + 40 Zeolita y 70 % Cemento + 30 Zeolita en las Figura 35, Figura 36 y Figura 37 respectivamente.

Por último, en las Figura 38 y Figura 39 se grafica el comportamiento de la resistencia mecánica de muestras D600 a los 28 días bajo las variables activador/zeolita y % Cemento + % Zeolita correspondientemente.

Tabla 41

Variación de densidad a distintas edades de hormigones celulares D800.

DENSIDAD (kg/m³)					
Mezcla		Fresco		Endurecida	
Nomenclatura	Información	0 días	7 días	14 días	28 días
MP-800	100%C 0%Z 0Act	844	819	805	798
MP.1-800	50%C 50%Z 0Act	833	815	804	798
M1-800	50%C 50%Z 0.40Act	835	828	821	818
M2-800	60%C 40%Z 0.40Act	826	814	804	797
M3-800	70%C 30%Z 0.40Act	844	822	804	790
M4-800	50%C 50%Z 0.45Act	830	816	804	798
M5-800	60%C 40%Z 0.45Act	838	822	810	803
M6-800	70%C 30%Z 0.45Act	847	835	830	827
M7-800	50%C 50%Z 0.50Act	834	827	823	821
M8-800	60%C 40%Z 0.50Act	839	815	798	788
M9-800	70%C 30%Z 0.50Act	825	808	800	796

Nota: Densidades promedio de muestras D800 a distintas edades.

Tabla 42

Variación de resistencia a la compresión a distintas edades de hormigones celulares D800.

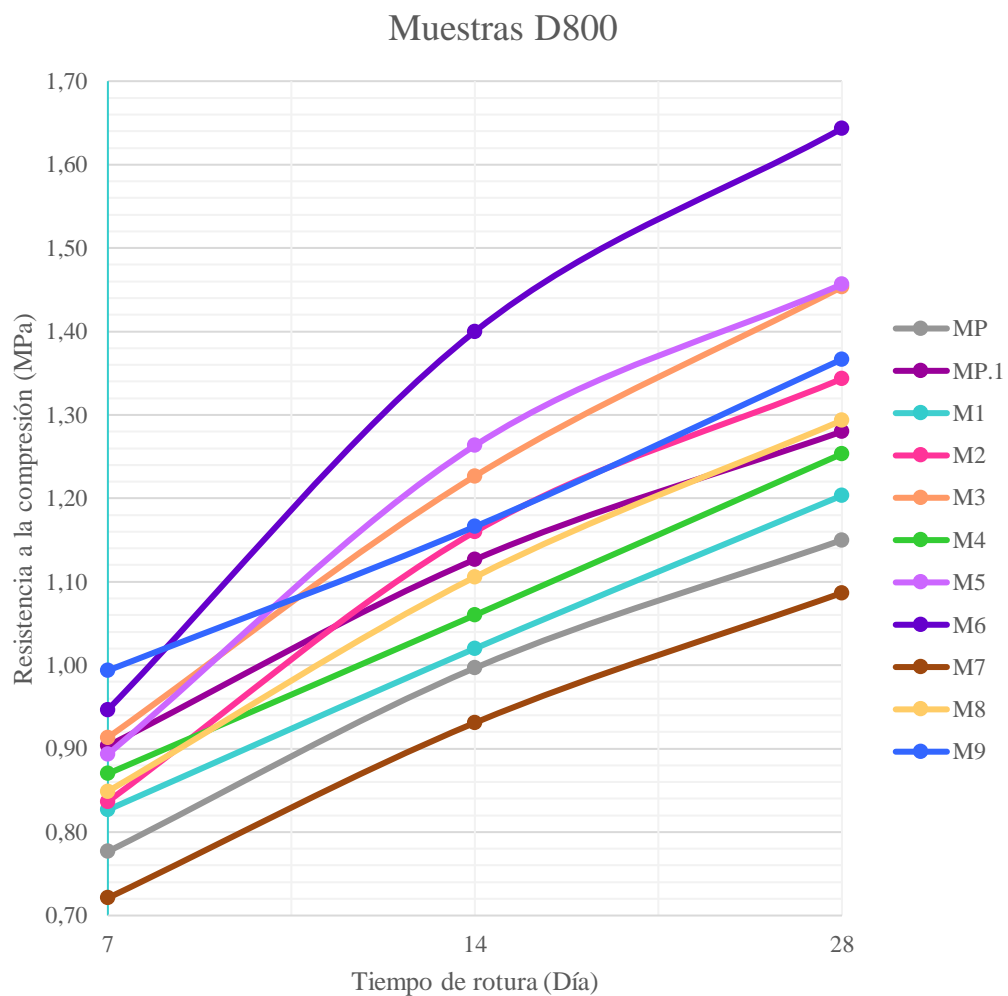
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (MPa)													
Mezcla		7 días				14 días				28 días			
Nomenclatura	Información	1	2	3	f 'c	1	2	3	f 'c	1	2	3	f 'c
MP-800	100%C 0%Z 0ACT	0,78	0,76	0,79	0,78	1,00	1,01	0,98	1,00	1,14	1,17	1,14	1,15
MP.1-800	50%C 50%Z 0ACT	0,89	0,92	0,90	0,90	1,14	1,16	1,08	1,13	1,27	1,30	1,27	1,28
M1-800	50%C 50%Z 0.40ACT	0,83	0,83	0,82	0,83	1,00	1,02	1,04	1,02	1,16	1,25	1,20	1,20
M2-800	60%C 40%Z 0.40ACT	0,87	0,77	0,87	0,84	1,12	1,16	1,20	1,16	1,34	1,38	1,31	1,34
M3-800	70%C 30%Z 0.40ACT	0,90	0,87	0,97	0,91	1,32	1,17	1,19	1,23	1,48	1,42	1,46	1,45
M4-800	50%C 50%Z 0.45ACT	0,87	0,89	0,85	0,87	1,08	1,09	1,01	1,06	1,26	1,23	1,27	1,25
M5-800	60%C 40%Z 0.45ACT	0,89	0,92	0,87	0,89	1,20	1,34	1,25	1,26	1,40	1,47	1,50	1,46
M6-800	70%C 30%Z 0.45ACT	1,02	0,90	0,92	0,95	1,55	1,30	1,35	1,40	1,68	1,62	1,63	1,64
M7-800	50%C 50%Z 0.50ACT	0,69	0,74	0,74	0,72	0,95	0,90	0,95	0,93	1,05	1,09	1,12	1,09
M8-800	60%C 40%Z 0.50ACT	0,83	0,88	0,83	0,85	1,12	1,08	1,11	1,11	1,30	1,28	1,30	1,29
M9-800	70%C 30%Z 0.50ACT	0,98	0,99	1,01	0,99	1,12	1,19	1,18	1,17	1,40	1,36	1,34	1,37

Nota: Recopilación de datos de resistencia a la compresión de las probetas ensayadas junto a su promedio en diferentes edades de las dosificaciones estudiadas.

Desde una vista general de la resistencia a la compresión de las dosificaciones D800, la mezcla 6 de material cementante 70 % Cemento + 30 % Zeolita cuenta con la más alta resistencia de 1,64 MPa, a los 28 días, superior en un 42,61 % a la mezcla patrón de material cementante 100 % Cemento + 0 % Zeolita (1,15 MPa), y a su vez también superior en un 28,13 % de la mezcla patrón adicional de 50 % Cemento + 50 % Zeolita sin activar (1,28 MPa). En su contraparte, la mezcla 7 registra la más baja resistencia de 1,09 MPa, inferior en un 5,22 % a la mezcla patrón, y en un 14,84 % a la mezcla patrón de zeolita sin activar anteriormente mencionadas.

Figura 31

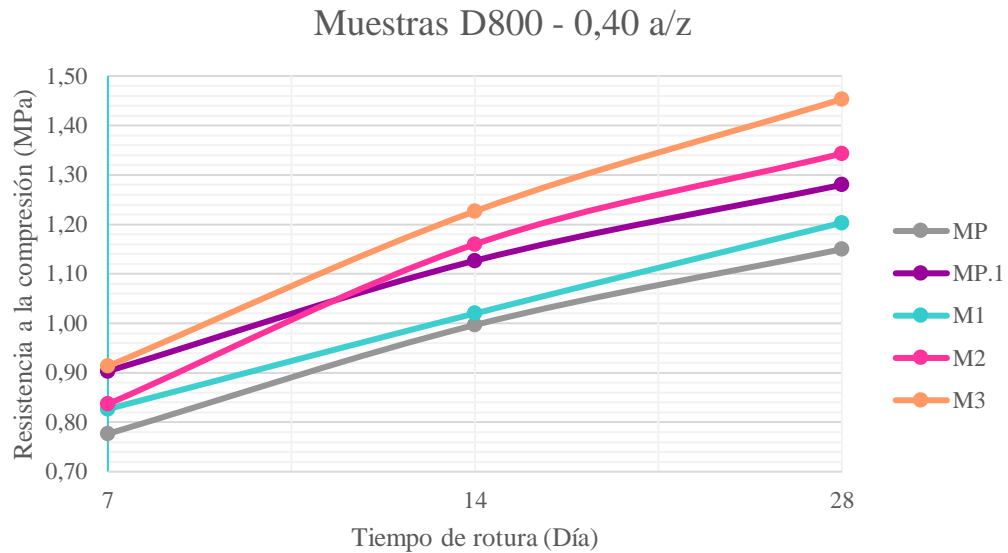
Variación de la resistencia a la compresión a distintas edades de hormigones celulares D800.



Nota: Progresión de la resistencia a la compresión promedio de las probetas ensayadas de todas las dosificaciones 600 kg/m³ estudiadas.

Figura 32

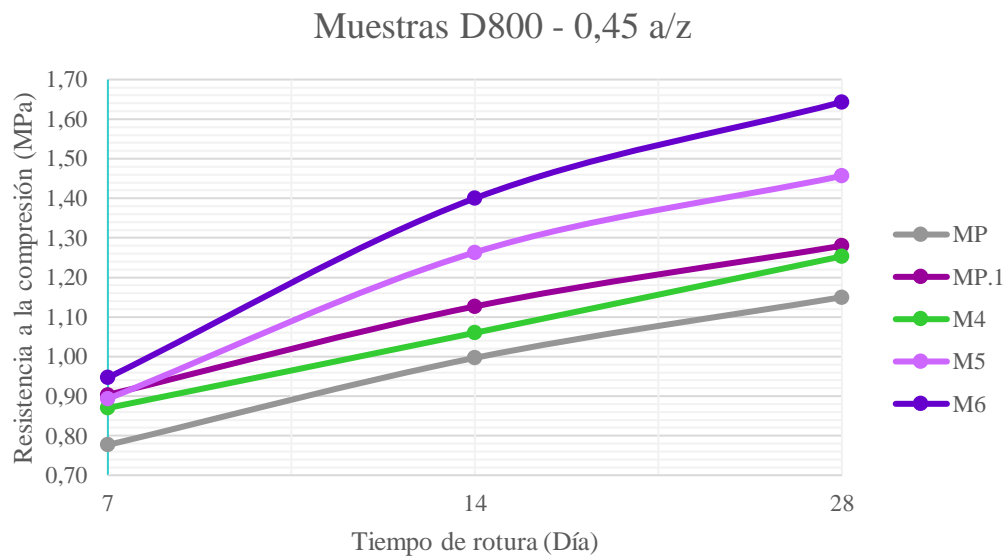
Variación de la resistencia a la compresión a distintas edades de hormigones celulares D800 con una relación activador/zeolita del 0,40.



Nota: Probetas a una misma relación activador/zeolita, pero con 30%, 40% y 50% de zeolita como material cementante, comparados con las mezclas patrones.

Figura 33

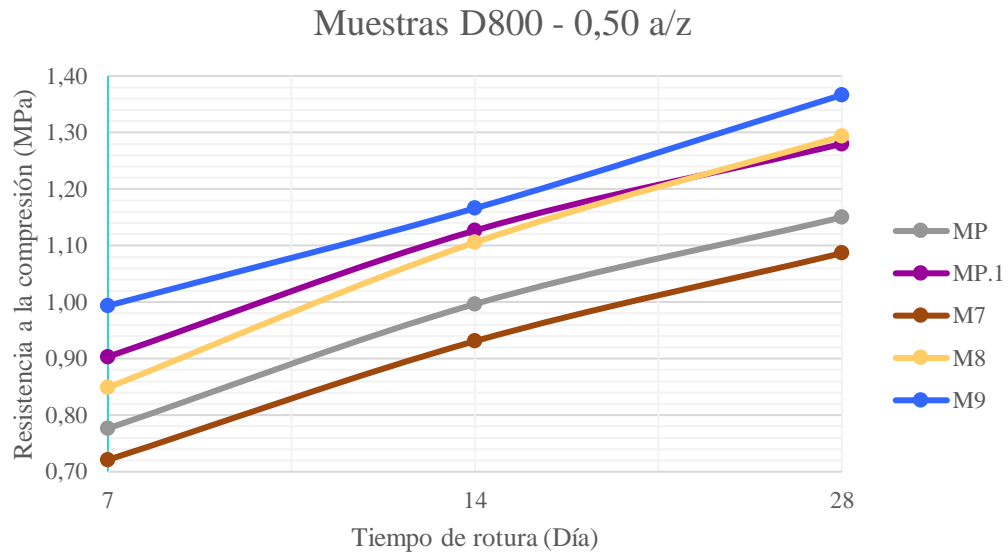
Variación de la resistencia a la compresión a distintas edades de hormigones celulares D800 con una relación activador/zeolita del 0,45.



Nota: Probetas a una misma relación activador/zeolita, pero con 30%, 40% y 50% de zeolita como material cementante, comparados con las mezclas patrones.

Figura 34

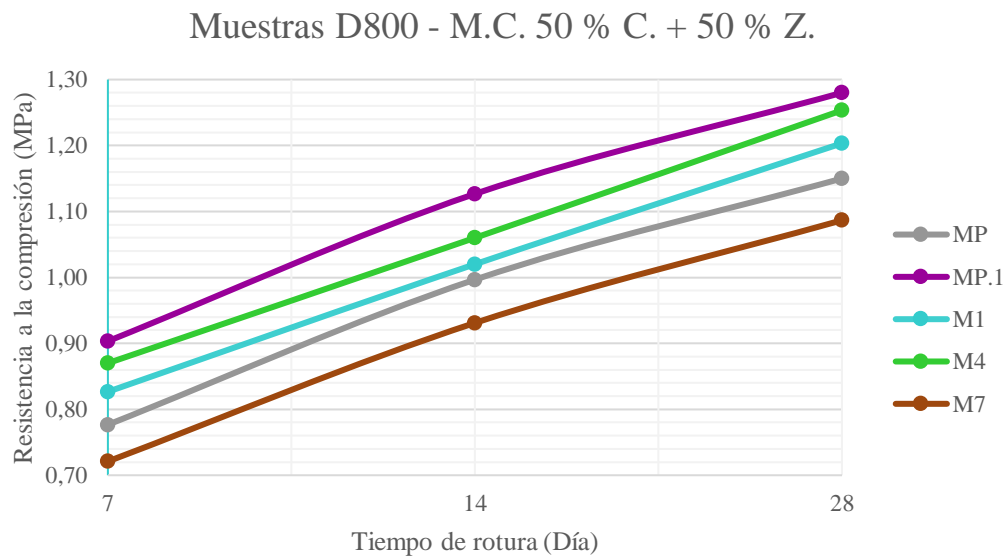
Variación de la resistencia a la compresión a distintas edades de hormigones celulares D800 con una relación activador/zeolita del 0,50.



Nota: Probetas a una misma relación activador/zeolita, pero con 30%, 40% y 50% de zeolita como material cementante, comparados con las mezclas patrones.

Figura 35

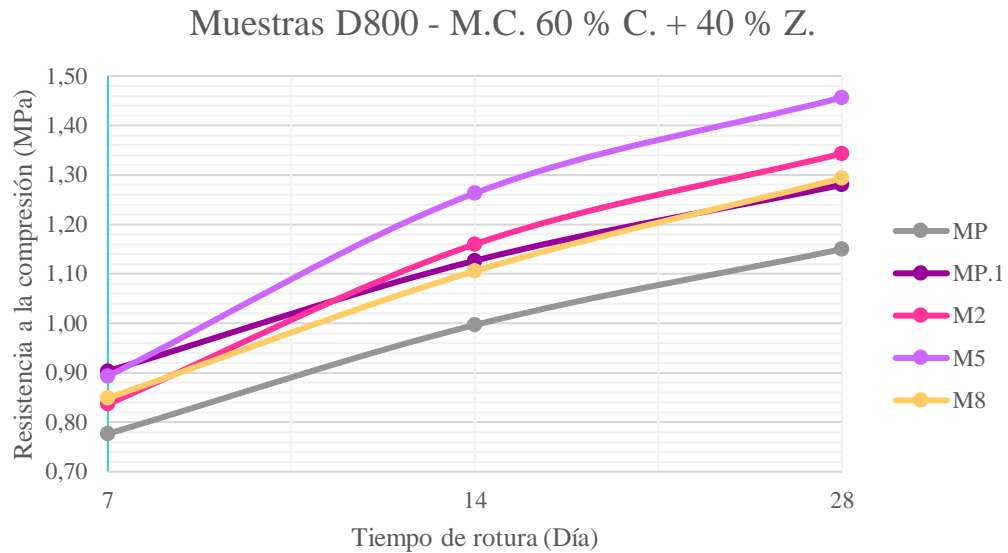
Variación de la resistencia a la compresión a distintas edades de hormigones celulares D800 con material cementante 50 % C. + 50 % Z.



Nota: Probetas a una misma cantidad porcentual de material cementante, pero con 0,40, 0,45 y 0,50 de activador/zeolita, comparados con las mezclas patrones.

Figura 36

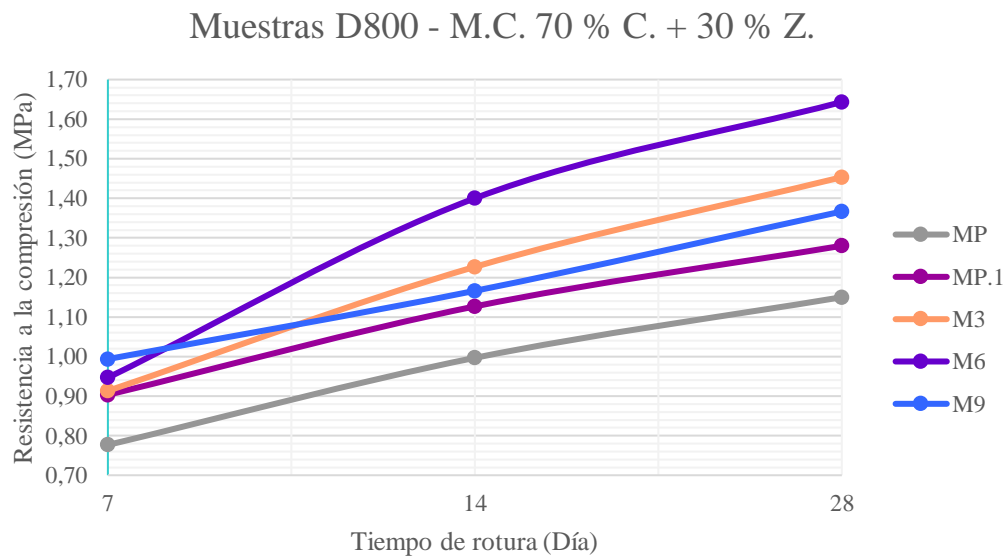
Variación de la resistencia a la compresión a distintas edades de hormigones celulares D800 con material cementante 60 % P. + 40 % Z.



Nota: Probetas a una misma cantidad porcentual de material cementante, pero con 0,40, 0,45 y 0,50 de activador/zeolita, comparados con las mezclas patrones.

Figura 37

Variación de la resistencia a la compresión a distintas edades de hormigones celulares D800 con material cementante 70 % P. + 30 % Z.

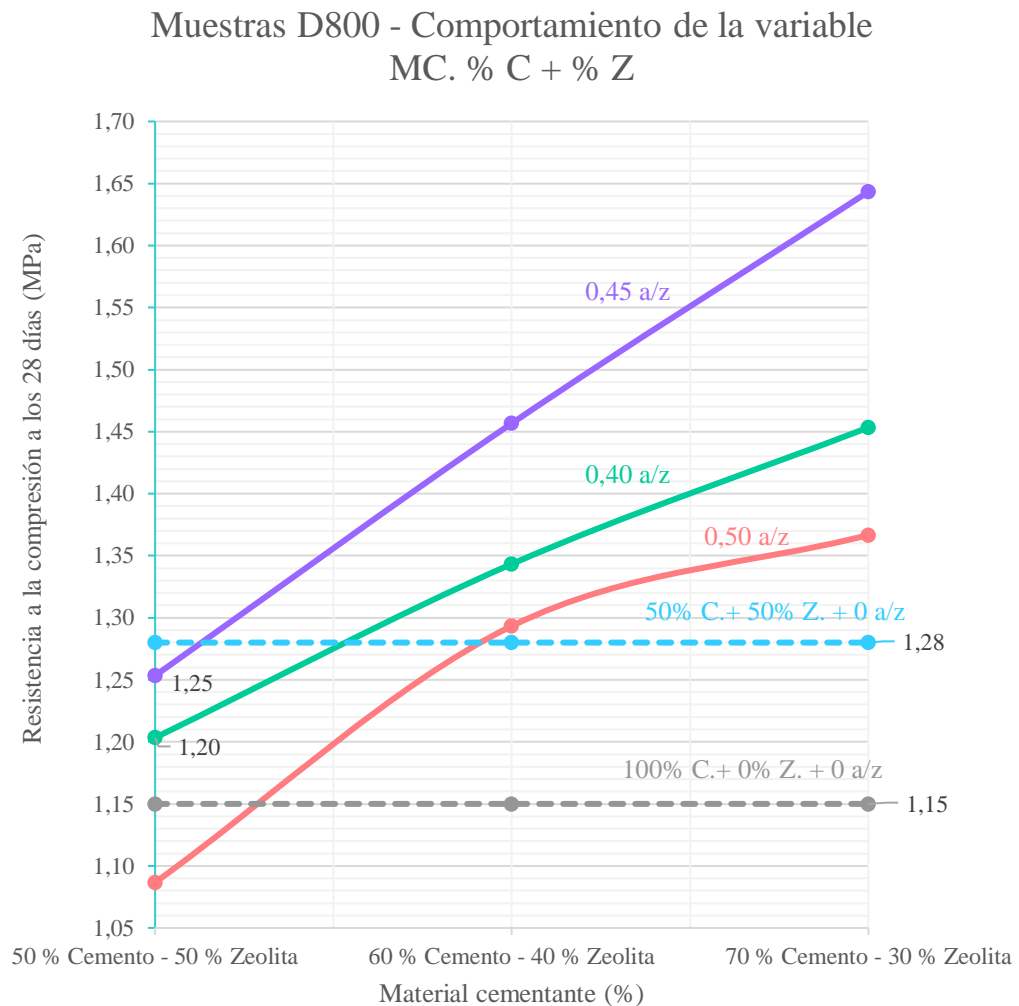


Nota: Probetas a una misma cantidad porcentual de material cementante, pero con 0,40, 0,45 y 0,50 de activador/zeolita, comparados con las mezclas patrones.

- a) **Análisis del comportamiento de la variable zeolita como material cementante suplementario en mezclas D800.** El comportamiento de la resistencia a la compresión, a los 28 días, de la variable zeolita como material cementante suplementario al cemento tiene una tendencia a crecer inversamente proporcional a la cantidad de zeolita en la constitución de la mezcla, en todas las relaciones activador/zeolitas estudiadas D800. Revisar Figura 38.

Figura 38

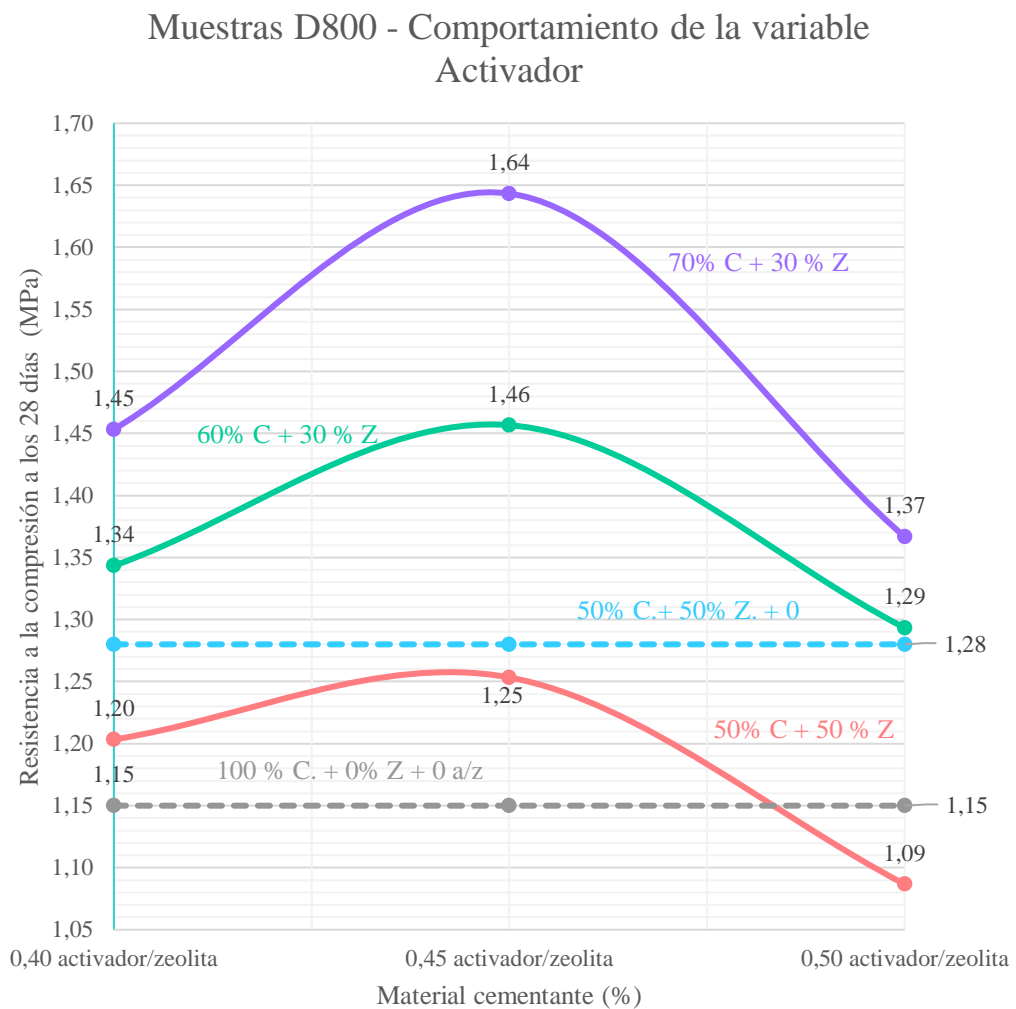
Resistencia mecánica bajo la variable % Cemento + % Zeolita en muestras D800.



b) **Análisis del comportamiento de la variable zeolita como material cementante suplementario en mezclas D800.** El comportamiento de la resistencia a la compresión, a los 28 días, de la variable activador/zeolita tiene una tendencia ascendente a mayor relación hasta alcanzar un determinado pico y comenzar a descender gradualmente. Revisar Figura 39.

Figura 39

Resistencia mecánica bajo la variable Activador/Zeolita en muestras D800.



- c) **Interpretación porcentual del comportamiento de la resistencia a la compresión en mezclas D800.** En la se encuentra en porcentaje la pérdida o ganancia de resistencia a la compresión, sobre la mezcla patrón, bajo ambas variables.

Tabla 43

Porcentajes de pérdida o ganancia de resistencia a la compresión de muestras D800 con respecto a la mezcla patrón.

Material cementante	Relaciones activador/zeolita		
	0,40 a/z	0,45 a/z	0,50 a/z
50 % C + 50% Z	+ 4,35 %	+ 8,70 %	- 5,22 %
60 % C + 40% Z	+ 16,52 %	+ 26,96 %	+ 12,17 %
70 % C + 30% Z	+ 26,09 %	+ 42,61 %.	+ 19,13 %

Nota: La mezcla patrón tiene un $f'c$ de 1,15 MPa.

Tabla 44

Porcentajes de pérdida o ganancia de resistencia a la compresión de muestras D800 con respecto a la mezcla patrón de zeolita sin activar.

Material cementante	Relaciones activador/zeolita		
	0,40 a/z	0,45 a/z	0,50 a/z
50 % C + 50% Z	- 6,25 %	- 2,34 %	- 14,84 %
60 % C + 40% Z	+ 4,69 %	+ 14,06 %	+ 0,78 %
70 % C + 30% Z	+ 13,28 %	+ 28,13 %.	+ 7,03 %

Nota: La mezcla patrón de zeolita sin activar tiene un $f'c$ de 1,28 MPa.

4.3.2.3. Discusión de resultados de la resistencia a la compresión.

En cuanto a la cantidad de zeolita suplementaria del cemento hidráulico, como primera variable, el aumento de resistencia fue inversamente proporcional a esta, denotando al 50 % Cemento + 50 Zeolita como el peor escenario, y al 70 % Cemento + 30 % Zeolita como el mejor.

Así, para muestras de 600 kg/m³, en el peor escenario superó apenas a la muestra patrón (0,76 MPa) en un 17 % (0,89 MPa), a los 28 días (en el mejor

escenario de la segunda variable, 0,45 activador/zeolita), contrario al mejor que en las mismas condiciones superó a la muestra patrón en un 37 % (1,04 MPa).

Al mismo tiempo, para muestras de 800 kg/m³, en el peor escenario la muestra patrón (1,15 MPa) es superado en 9 % (1,25 MPa) a los 28 días, misma que se encuentra 2 % por debajo del patrón de zeolita sin activar (1,28 MPa), contrario al mejor escenario en donde el patrón es superado en un 42 % (1,64 MPa), prevaleciendo también sobre el patrón de zeolita sin activar en un 28 %.

En cuanto a la relación activador/zeolita, como segunda variable estudiada, tiene un comportamiento ascendente a mayor relación hasta alcanzar un determinado pico y comenzar a descender gradualmente. Dicho comportamiento refleja como peor escenario a la relación activador/zeolita 0,50, seguido de la relación 0,40, y ambas superadas por la relación 0,45.

Para muestras de 600 kg/m³, bajo el mejor escenario de la primera variable (70 % Cemento + 30 Zeolita), en el peor escenario con relación activador/zeolita de 0,50, las muestras logran superar al patrón (0,76 MPa) en un 14 % (0,87 MPa), mientras que en el mejor escenario con relación activador/zeolita de 0,45, el patrón es superado en un 37 % (1,04 MPa).

De igual forma, para muestras de 800 kg/m³, bajo las mismas directrices, en el peor escenario las muestras logran superar al patrón (1,15 MPa) en un 19 % (1,37 MPa), además de también al patrón adicional de zeolita sin activar (1,28 MPa) en un 7 %. Para el mejor escenario, las muestras (1,64 MPa) logran superar al patrón y al patrón adicional de zeolita sin activar en un 43 % y 28 % respectivamente.

Cabe destacar que no se logra comparar las muestras estudiadas D600 con el patrón adicional de 50 % Cemento + % 50 Zeolita sin activador, puesto que dicho patrón no llegó a funcionar apropiadamente para su estudio. Denotando una importancia influyente de la solución activadora para

hormigones celulares con cemento híbrido de densidades bajas de 600 kg/m³.

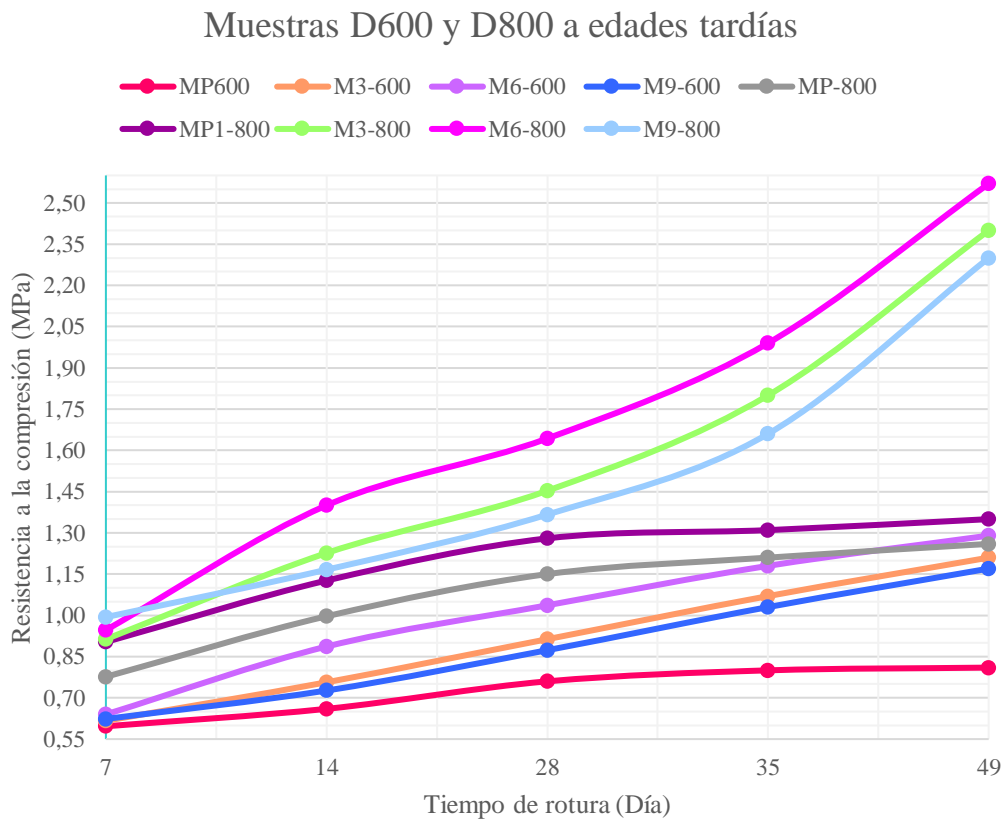
Tomando los mejores escenarios de ambas variables, ultimamos que las mejores resistencias se encuentran en dosificaciones con material cementante conformado por 70 % Cemento + 30 % Zeolita reaccionado con una relación activador/zeolita de 0,45.

De la misma manera, en la tabla se encuentran los porcentajes de pérdida y ganancia de resistencia a la compresión, sobre la mezcla patrón de zeolita sin activar, bajo ambas variables.

4.3.2.4. Resistencia a la compresión a edades tardías.

Figura 40

Comportamiento mecánico de muestras D600 y D800 a edades tardías.



En la Figura 40 se puede observar la rotura de cilindros de hormigones celulares con cemento alcalino a edades tardías mostró un notable

incremento en la resistencia a la compresión en comparación con los hormigones celulares patrón.

Por ejemplo, en la mezcla 6 de 70% cemento hidráulico HE, 30% zeolita y 0,45 activador se refleja un aumento del 24% en hormigón celular con densidad de 600 kg/m³, y un aumento del 57% para densidades de 800 kg/m³, de 28 a 49 días.

Por otro lado, en la mezcla patrón de 100% cemento hidráulico HE sin agregado fino se refleja un aumento del 7% en hormigón celular con densidad de 600 kg/m³, y un aumento del 10% para densidades de 800 kg/m³, de 28 a 49 días.

4.4. ANÁLISIS DE RESULTADOS OE. 4: DETERMINAR LOS COSTOS DE ELABORACIÓN DE HORMIGONES CELULARES CON CEMENTO HIDRÁULICO HE Y CEMENTO HÍBRIDO DE ZEOLITA ACTIVADA

4.4.1. Precios referenciales de los materiales.

A continuación, se detallan los precios en cantidades considerables de los materiales que se requieren para la elaboración del hormigón celular con cemento híbrido alcalino.

4.4.1.1. Solución activadora.

En la Tabla 45 se expresan los precios al por mayor referente de los materiales requeridos para la solución activadora. Mientras que en la Tabla 46 se definen los precios de las cantidades necesarias para la receta de la misma, donde se observa que para 6,45 kg de solución tiene un precio de \$1,72.

Tabla 45*Precios referenciales de la materia prima de la solución activadora alcalina.*

Materia prima		
Material	Cantidad	Precio
Hidróxido de sodio (kg)	1000	\$437,00
Agua destilada (kg)	1000	\$0,96
Silicato de sodio (kg)	500	\$120,75

Tabla 46.*Precio referencial de la solución activado alcalina.*

Solución activadora alcalina		
Material	Cantidad	Precio
Hidróxido de sodio (kg)	1,5	\$0,66
Agua destilada (kg)	0,56	\$0,00054
Silicato de sodio (kg)	4,39	\$1,06
Total (kg)	6,45	\$1,72

4.4.1.2. Espumante RV-2020.

En la Tabla 47 se expresan los precios al por mayor referente de los materiales requeridos para el espumante RV-2020. Mientras que en la Tabla 48 se definen los precios de las cantidades necesarias para la receta concentrada de la misma, donde se observa que para 1,76 kg del concentrado tiene un precio de \$0,57.

Tabla 47*Precios referenciales de la materia prima del espumante RV-2020.*

Materia prima		
Material	Cantidad	Precio
Goma xantana (kg)	1	\$16,00
CMC (kg)	0,5	\$4,50
Gel detergente (kg)	1	\$2,40
Agua (kg)	1000	\$1,00

Tabla 48*Precio referencial de la solución concentrada RV-2020.*

Solución concentrada		
Material	Cantidad	Precio
Goma xantana (kg)	0,012	\$0,192
CMC (kg)	0,002	\$0,018
Gel detergente (kg)	0,150	\$0,36
Agua (kg)	1,600	\$0,0002
Total (kg)	1,764	\$0,57

Para la elaboración de la espuma RV-2020, con una disolución de 1:12 en agua, se requiere las cantidades mostradas en la Tabla 49, donde se observa que 20 L de espuma tiene un precio de \$0,10.

Tabla 49*Precio referencial del espumante RV-2020.*

Espumante		
Material	Cantidad	Precio
Concentrado (kg)	0,3	\$0,10
Agua (kg)	3,6	\$0,0004
Total	Espumante (kg)	3,9
	Espuma (L)	20
		\$0,10

4.4.1.3. Materiales para hormigón celular con zeolita activada.

Tabla 50*Precios referenciales de los materiales empleado en las dosificaciones.*

Precios de referencia de la materia prima		
Material	Cantidad	Precio
Cemento HE (kg)	50	\$8,40
Zeolita (kg)	25	\$3,20
Agua (kg)	1000	\$1,00
Solución activadora (kg)	6,45	\$1,72
Espuma (L)	20	\$0,10

4.4.2. Precios unitarios de hormigones celulares por m³.

4.4.2.1. Hormigones celulares D600.

En Tabla 51 los precios del material a emplear en la elaboración del hormigón celular por m³ tentativos de las dosificaciones D600.

Tabla 51

Precios unitarios por m³ de hormigones celulares D600 sin considerar mano de obra y equipos.

Mezcla	Cemento	Zeolita	Agua	Activador	Espuma	Precio
MP-600	\$66,02	\$0,00	\$0,02	\$0,00	\$3,30	\$69,35
MP.1-600	\$33,10	\$25,22	\$0,02	\$0,00	\$3,20	\$61,53
M1-600	\$29,23	\$22,27	\$0,02	\$18,51	\$3,15	\$73,18
M2-600	\$35,95	\$18,26	\$0,02	\$15,18	\$3,17	\$72,58
M3-600	\$42,84	\$13,99	\$0,02	\$11,63	\$3,21	\$71,68
M4-600	\$28,90	\$22,02	\$0,02	\$20,59	\$3,13	\$74,65
M5-600	\$35,45	\$18,01	\$0,02	\$16,84	\$3,17	\$73,48
M6-600	\$42,50	\$13,88	\$0,02	\$12,98	\$3,20	\$72,58
M7-600	\$28,39	\$21,63	\$0,02	\$22,47	\$3,13	\$75,65
M8-600	\$35,11	\$17,83	\$0,02	\$18,53	\$3,16	\$74,65
M9-600	\$42,17	\$13,77	\$0,02	\$14,30	\$3,19	\$73,45

Tabla 52

APU de mezclas de interés D600.

Mezcla		Precio por m³
Nomenclatura	Información	
MP-600	100% C 0% Z 0Act	\$96,04
MP.1-600	50% C 50% Z 0Act	\$86,23
M6-600	70% C 30% Z 0.45Act	\$100,16

En la Tabla 52 se realizó un análisis de precios unitarios detallado únicamente de las dosificaciones de interés, es decir, la mezcla patrón, la

mezcla de zeolita sin activar y la mezcla con el mejor resultado mecánico de la presente investigación. Para mayor detalle revisar Anexo 15, 16 y 17.

4.4.2.2. *Hormigones celulares D800.*

En la Tabla 53 se expresa los precios del material a emplear en la elaboración del hormigón celular por m³ tentativos de las dosificaciones D800.

Tabla 53

Precios unitarios por m³ de hormigones celulares D800 sin considerar mano de obra y equipos.

Mezcla	Cemento	Zeolita	Agua	Activador	Espuma	Precio
MP-800	\$91,24	\$0,00	\$0,03	\$0,00	\$2,73	\$93,14
MP.1-800	\$45,79	\$37,80	\$0,03	\$0,00	\$2,58	\$82,52
M1-800	\$40,36	\$33,32	\$0,02	\$25,32	\$2,51	\$98,30
M2-800	\$49,69	\$27,35	\$0,02	\$20,78	\$2,55	\$97,58
M3-800	\$59,19	\$20,94	\$0,02	\$15,91	\$2,59	\$96,31
M4-800	\$39,86	\$32,90	\$0,02	\$28,12	\$2,50	\$100,21
M5-800	\$49,01	\$26,97	\$0,02	\$23,06	\$2,54	\$98,84
M6-800	\$58,68	\$20,76	\$0,02	\$17,75	\$2,59	\$97,47
M7-800	\$39,35	\$32,48	\$0,02	\$30,85	\$2,49	\$102,04
M8-800	\$48,51	\$26,69	\$0,02	\$25,35	\$2,53	\$100,37
M9-800	\$58,17	\$20,58	\$0,02	\$19,55	\$2,58	\$98,59

Tabla 54

APU de mezclas de interés D800.

Mezcla		Precio por m³
Nomenclatura	Información	
MP-800	100% C 0% Z 0Act	\$125,72
MP.1-800	50% C 50% Z 0Act	\$112,46
M6-800	70% C 30% Z 0.45Act	\$131,23

En la Tabla 54 se realizó un análisis de precios unitarios detallado únicamente de las dosificaciones de interés, es decir, la mezcla patrón, la mezcla de zeolita sin activar y la mezcla con el mejor resultado mecánico de la presente investigación. Para mayor detalle revisar Anexo 18, 19 y 20.

4.4.2.3. *Análisis de precios de hormigones celulares.*

En el análisis del precio unitario del hormigón celular por metro cubico detallado en los anexos mencionados, se observa 2 situaciones:

Primero que el valor del m³ de hormigón celular patrón con 50% Cemento hidráulico y 50% zeolita sin activador (MP-1) es menor que el m³ de hormigón celular patrón con 100% cemento hidráulico HE (MP), esto se debe que luego de ensayos preliminares, se obtuvo que para bajas densidades se tiene mejores resultados cuando el diseño no tiene agregado fino por lo que nuestras mezclas finales fueron diseñadas solo con cemento hidráulico HE, agua y agente espumante y al solo tener cemento hidráulico HE en el hormigón celular patrón su precio es más costoso.

Segundo el precio del m³ de hormigón celular con cemento híbrido alcalino con 70% cemento, 30% zeolita y 0.45 solución activadora (M6) es mayor que el hormigón celular con 50% cemento y 50% zeolita sin activador (MP-1), al igual que el hormigón celular con 100% cemento hidráulico HE (MP), esto se debe a que para poder activar la zeolita y así se comporte como un material cementante se tiene que incorporar a la mezcla un porcentaje de solución activadora de acuerdo a la cantidad de zeolita por lo que su precio se eleva.

Así, económicamente el hormigón celular patrón con 100% cemento hidráulico HE, es más eficiente que el hormigón celular con cemento alcalino, mientras que mecánicamente los hormigones celulares con cemento híbrido activados alcalinamente reflejan resistencias a la compresión mayores.

4.5. SOLUCIÓN AL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

En primer lugar, al lograr diseñar hormigones celulares con estos materiales a bajas densidades se reduce el peso muerto de posibles elementos no estructurales en construcciones como mamposterías, losa, y rellenos reductores de cargas, y por ende disminuir costos de cimentación principalmente.

Por otra parte, los hormigones celulares de cemento híbrido alcalino disminuyeron el uso de cemento hidráulico en mezcla, y por consiguiente se reduce la huella de carbono del mismo. Considerando las emisiones de zeolita y las sustancias químicas que la activan, la producción de 1 T de cemento híbrido alcalino, con 70 % Cemento y 30% Zeolita, genera 0,29 T de CO₂, disminuyendo en un 26 % la emisión inicial de 0,4 T CO₂ en producción de cementos convencionales en un 100 % de su uso. Revisar Tabla 55 y Tabla 56.

Tabla 55

Emisiones de CO₂ referentes de materiales usados.

	Material	Emisión de CO ₂
1 T	Cemento convencional	0,4 T
1 T	Zeolita	0,0476 T
1 T	NaOH	0,011 T
1 T	Na ₂ SiO ₃	0,016 T

Tabla 56

Emisiones de CO₂ de cemento híbrido alcalino.

	Material	Emisión de CO ₂
1 T	Cemento alcalino (0,45 a/z)	0,0479 T
0,7 T	Cemento convencional	0,28 T
0,3 T	Cemento alcalino	0,014 T
1 T	Cemento híbrido alcalino	0,29 T

Nota. Las emisiones mostradas corresponden al escenario hipotético de un cemento híbrido alcalino de zeolita activada estudiado.

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

De lo investigado y analizado en esta tesis en cuanto al diseño de hormigones celulares con cementos híbridos se puede concluir que el diseño y la implementación de cementos híbridos para hormigones celulares es viable ya que refleja un aumento de la resistencia a la compresión en un 40% aproximadamente y solo un aumento del 4% en relación al precio del hormigón celular patrón en densidades de 600 y 800 kg/m³, aumento que se espera siga incrementando por la naturaleza propia del cemento híbrido alcalino.

Se caracterizó la materia prima con la que se elaboró el hormigón celular con cemento híbrido alcalino, donde se utilizó el cemento hidráulico HE que cumple la norma INEN 2380, la zeolita cumple con la norma ASTM C430 teniendo un tamaño de partículas de 45 µm y una densidad de 2,35 g/cm³, lo que permite ser sustituido como parte de material cementante, en cuanto a la arena negra del Triunfo cumplió con la norma ASTM C-33 en cuanto a gradación y módulo de finura 2,46. La solución activadora compuesta de hidróxido de sodio NaOH y silicato de sodio Na₂SiO₃ alcanzó un pH de 13,5 lo que favorece a la reacción con zeolita. El agente espumante RV-2020 es estable y mantiene densidades que oscilan entre 60 kg/m³ a 80 kg/m³ conforme la norma ASTM C 869 y ASTM C 796.

Se tiene dos diseños de hormigón celular con cemento híbrido alcalino con sus dosificaciones de: cemento hidráulico HE, zeolita, agua, solución activadora y agente espumante RV-2020 con el método experimental de volúmenes aparentes ajustado para obtener densidades 600 y 800 kg/m³ respectivamente.

Luego de analizar las distintas dosificaciones se observa en el comportamiento mecánico del hormigón celular con cemento híbrido alcalino en la mezcla M6 una

resistencia a la compresión a los 28 días de 1,04 MPa y 1,64 MPa en las densidades de 600 y 800 kg/m³ respectivamente, la cual, supero al hormigón celular patrón de densidad 600 kg/m³ en un 37% y de densidad 800 kg/m³ en un 43%. Además, se obtuvo resistencias a la compresión a los 49 días de la misma mezcla para densidad 600 kg/m³ de 1,29 MPa y para densidad 800 kg/m³ de 2,57 MPa, aumentando en un 24% y 57% respectivamente sobre la resistencia a la compresión a los 28 días a comparación de la mezcla patrón que aumentó solo un 7% y 10% bajo el mismo criterio.

Se determinó los costos de elaboración de los hormigones celulares mediante el análisis de precios unitarios por m³ de hormigón donde los precios de hormigones celulares con cemento hidráulico HE para densidades de 600 y 800 kg/m³ están en \$96,04 / m³ y \$125,72 / m³, y hormigones celulares con cemento híbrido alcalino en \$100,16 / m³ y \$ 131,23 / m³ respectivamente. Concluyendo que el precio de un m³ de hormigón celular con cemento híbrido alcalino es más costoso en ambas densidades, aumentando su precio aproximadamente un 4% en comparación al hormigón celular patrón, sin embargo, se escogería trabajar con el hormigón celular con cemento híbrido alcalino por mejores resistencias a la compresión, adecuadas para ser empleadas en bloques para losas alivianadas (INEN 3066) o en rellenos reductores de cargas.

5.2. RECOMENDACIONES

A pesar de que la arena resultó ser perjudicial en cuestiones de resistencia a la compresión, siendo más notorio en muestras de 600 kg/m³, se sugiere probar otras granulometrías más finas y relaciones arena/cemento más bajas a las estudiadas para poder incluir dicho material sin disminuir las propiedades mecánicas, por lo menos en densidades de 800 kg/m³, que es donde no hubo tanta pérdida.

Las relaciones activador/zeolita fueron estudiadas bajo una receta específica de solución activadora, sin embargo, existe otras recetas similares de los mismos químicos, variando la concentración del hidróxido de sodio y proporción NaOH: Na₂SiO₃. Se sugiere estudiar las mismas relaciones de activador/zeolita con otras recetas de la solución activadora, para dar con la que mejor reaccione la zeolita.

Se recomienda probar el curado térmico a vapor a altas presiones (autoclave) para no solo reducir aún más el tiempo de fraguado y curado, sino también mejorar las resistencias tempranas de estos hormigones celulares con cemento híbrido, además de lograr la zeolita se active en su mayoría y actúe como cemento.

Se aconseja estudiar más a fondo otras relaciones activador/zeolita puesto que es un valor influyente para controlar la cantidad de zeolita que logra ser activada para trabajar como material cementante, y contar con ella para la ganancia de resistencia, además de la cantidad residual de zeolita no activada que termina trabajando como agregado fino.

Para reducir costos de elaboración de este tipo de hormigón celular de cemento híbrido se recomienda en la parte de la solución activadora trabajar con materia prima pura, es decir adquirir los químicos en estado sólidos puro necesarios y tratarlos apropiadamente, puesto que los químicos usados en esta investigación son comerciales líquidos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alomoto Limones, M. Á., Mejillones Suárez, K. V., & Veliz Aguayo, A. C. (2023). *"Estudio comparativo de 3 tipos de espumantes para la fabricación de un hormigón celular de densidad de 800 kg/m³ d800 en Santa Elena."* [Título profesional, Universidad Estatal Península de Santa Elena]. Repositorio UPSE. Obtenido de <https://repositorio.upse.edu.ec/handle/46000/9219>
- Arbito Contreras, G. V. (2016). *Concreto celular para uso estructural"* [Tesis de maestría, Universidad de Cuenca]. Repositorio Institucional UCuenca. Obtenido de <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/25669>
- ARIS. (22 de Julio de 2022). Certificado de calidad. *Silicato de Sodio Líquido 2.2*.
- ASTM C 1157. (2020). *Standard Performance Specification for Hydraulic Cement* [Especificación de rendimiento estándar para cemento hidráulico]. Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales.
- Athira, V. S., Bahurudeen, A., Saljas, M., & Jayachandran, K. (13 de September de 2021). "Influence of different curing methods on mechanical and durability properties of alkali activated binders". *Construction and Building Materials*, 299, 123963. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123963>
- ATSDR. (06 de Mayo de 2016). *"Hidróxido de sodio"*. Obtenido de Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades: https://www.atsdr.cdc.gov/es/toxfaqs/es_tfacts178.html#:~:text=A%20temperatura%20ambiente%2C%20el%20hidróxido,como%20para%20encender%20materiales%20combustibles.
- Bastidas Ronquillo, M. J., & Bermudez Romero, J. E. (2013). *"Estudio de geopolímeros basados en zeolitas naturales del ecuador: aplicaciones a eficiencia energética en construcciones en climas tropicales."* [Título profesional, Escuela Superior Politécnica del Litoral]. Repositorio ESPOL. Obtenido de <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/30850>
- Basurto Barcia, C. J., & Villalba Lynch, J. L. (2013). *"Síntesis y caracterización de geopolímeros basados en zeolita natural."* [Título profesional, Escuela

- Superior Politécnica del Litoral*]. Repositorio ESPOL. Obtenido de <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/25391>
- Caicedo Barona, W. A., Tipán Quinatoa, F. M., & Morales Gubio, L. W. (2019). *"Propiedades mecánicas del hormigón estructural ligero y celular, utilizando materiales de diferentes canteras en la ciudad de Quito"* [Título profesional, Universidad Central del Ecuador]. Repositorio digital UCE. Obtenido de <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/18703>
- Castillo Jumbo, F. M., Reyes Villamar, R. G., & Garcés Vargas, J. F. (2019). *"Efectos de los agentes intensificadores de molienda en la adición mineral LC2."* [Título profesional, Universidad Estatal Península de Santa Elena]. Repositorio UPSE. Obtenido de <https://repositorio.upse.edu.ec/handle/46000/4762>
- Cervantes Abarca, A. (2008). *"Nuevas tecnologías en concretos. Concreto celular - concreto reforzado con fibra - concreto ligero estructural"* [Publicación técnica No. 10, Memorias 2do. Congreso Administración y Tecnología para arquitectura, diseño e ingeniería.]. Universidad Autónoma Metropolitana. Obtenido de https://administracionytecnologiaparaeldisenio.azc.uam.mx/publicaciones/memorias_cong2008/10.pdf
- Chipantiza Punina, J. M., Figueroa Franco, L. A., & Ramírez Palma, R. I. (2021). *"Diseño de hormigón con agregado zeolita del río Ayampe"* [Título profesional, Universidad Estatal Península de Santa Elena]. Repositorio UPSE. Obtenido de <https://repositorio.upse.edu.ec/handle/46000/5969>
- Comité ACI 318. (2019). *Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural*. American Concrete Institute.
- Comité ACI 523. (2006). *"523.1R-06: Guide for Cast-in-Place Low-Density Cellular Concrete"* [Guía para hormigón celular de baja densidad vaciado in situ]. Technical Documents.
- Conza Luzón, H. J. (2021). *"Diseño de hormigón celular de baja densidad, utilizando áridos de la cantera del río Jubones. Analizar sus propiedades y aplicaciones."* [Título profesional, Universidad Técnica de Machala]. Repositorio digital UTMACH. Obtenido de <http://repositorio.utmachala.edu.ec/handle/48000/17803>

- Curi, A., Vásquez Granda, W. J., Lima, H. M., & Sousa, W. T. (2006). Las Zeolitas y su aplicación en la descontaminación de efluentes mineros. *Información tecnológica*, 17(6), 111-118. doi:<http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642006000600017>
- Davidovits, J. (Agosto de 1991). "Geopolymers: Inorganic polymeric new materials" [Geopolímeros: nuevos materiales poliméricos inorgánicos]. *Journal of Thermal Analysis*, 37, 1633-1656. doi:<https://doi.org/10.1007/BF01912193>
- Fernández Álvarez, R. P., & Ureña Aguirre, M. E. (2021). "Estudio comparativo de las propiedades físicas de aluminosilicatos del cantón Guayaquil para sustitución parcial del cemento portland IP." [Título profesional, Universidad Técnica de Ambato]. Repositorio UTA. Obtenido de <https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/31996>
- Fonseca Acosta, A. B., & Medina Robalino, W. S. (2015). "El hormigón de baja densidad y su aplicación en bloques para la construcción de viviendas" [Título profesional, Universidad Técnica de Ambato]. Repositorio UTA. Obtenido de <https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/11740>
- Fréré Cárdenas, C. V., Torres Monroy, J. E., & Chavez Moncayo, M. Á. (2018). "Elaboración De Un Cemento Híbrido Basado En la Activación Alcalina De Cemento Portland Puro y Zeolita Ecuatoriana" [Título profesional, Escuela Superior Politécnica del Litoral]. Repositorio ESPOL. Obtenido de <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/46159>
- Garcés Vargas, J. F., Flores De la Rosa, V., & Huamán Marcillo, F. F. (Diciembre de 2016). Estudio del polvo de vidrio obtenido de la molienda de botellas recicladas en la provincia de Santa Elena, como sustituto parcial del cemento en el hormigón. *Revista Científica y Tecnológica UPSE*, 3(3), 27-32. Obtenido de <https://repositorio.upse.edu.ec/handle/46000/8310>
- Garg, A., Singhal, D., & Parveen. (12 de November de 2020). "Review on the durability properties of sustainable alkali activated concrete" [Revisión de las propiedades de durabilidad del hormigón activado alcalino sostenible]. *Materials Today: Proceedings*, 33(3), 1643-1649. doi:<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.370>
- Geofill. (2016). "Geofill, concreto celular". Obtenido de Geofill LLC: <https://geofill.com/>

- Gómez Del Pezo, R. S., Mora Figueroa, J. A., & Ramírez Palma, R. I. (2022). "Diseño de hormigón celular en base a espumante RV-2020 y cerámica cocida" [Título profesional, Universidad Estatal Península de Santa Elena]. Repositorio UPSE. Obtenido de <https://repositorio.upse.edu.ec/handle/46000/6942>
- González Lara, J. (2018). "Estudio sobre cinco tipos de hormigones con propiedades especiales." [Tesis de maestría, Universidad de Cantabria]. Repositorio UC. Obtenido de <http://hdl.handle.net/10902/14519>
- Harmesen, T. E. (2005). *Diseño de estructuras de concreto armado* (4ta Edición ed.). Lima: Fondo Editorial de la Pontificia Universidad Católica. Obtenido de https://books.google.com.ec/books?id=Gr3Ga9__NB4C&printsec=frontcover&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
- Hassan, A., Arif, M., & Shariq, M. (20 de June de 2019). "Use of geopolymers concrete for a cleaner and sustainable environment – A review of mechanical properties and microstructure" [Uso de hormigón geopolímero para un medio ambiente más limpio y sostenible]. *Journal of Cleaner Production*, 223, 704-728. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.051>
- Huaman Quispe, C. A., & Villanueva Ore, D. D. (2020). "Análisis de las propiedades mecánicas de un bloque de albañilería para muros portantes con concreto celular en Lima 2020." [Título profesional, Universidad César Vallejo]. Repositorio UCV. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12692/60970>
- Ibrahim, M., & Maslehuddin, M. (01 de March de 2021). An overview of factors influencing the properties of alkali-activated binders. *Journal of Cleaner Production*, 286, 124972. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124972>
- Ibrahim, M., Megat Johari, M. A., Rahman, M., & Maslehuddin, M. (30 de August de 2017). Effect of alkaline activators and binder content on the properties of natural pozzolan-based alkali activated concrete. *Construction and Building Materials*, 147, 648-660. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.163>
- Izquierdo Cárdenas, M. I., & Ortega Rivera, O. E. (2017). "Desarrollo y aplicación del concreto celular a base de aditivo espumante para la elaboración de

- bloques macizos destinados a tabiquerías no portantes en edificaciones*" [Título profesional, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas]. Repositorio académico UPC. Obtenido de <http://hdl.handle.net/10757/622468>
- Kadela, M., Kukielka, A., & Małek, M. (05 de November de 2020). "Characteristics of Lightweight Concrete Based on a Synthetic Polymer Foaming Agent" [Características del hormigón ligero a base de agente espumante polímero sintético]. *Materials*, 13(21), 4979. doi:<https://doi.org/10.3390/ma13214979>
- Lazo Arraya, J. (2017). *"Diseño de concreto celular para diferentes densidades, análisis de sus propiedades y sus aplicaciones"* [Título profesional, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa]. Repositorio Institucional UNSA. Obtenido de <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/2381>
- Li, N., Zhang, Z., Shi, C., & Zhang, J. (01 de October de 2018). Some Progresses in the Challenges for Geopolymer [Algunos avances en los desafíos de los geopolímeros]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 431(2), 022003. doi:<https://doi.org/10.1088/1757-899X/431/2/022003>
- Li, Z. (2011). *Advanced concrete technology* [Tecnología avanzada de hormigón]. John Wiley & Sons, Inc.
- Maldonado Maldonado, D. A., & Medina Robalino, W. S. (2021). *"Estudio de la zeolita natural como sustituto parcial del cemento tipo GU en la construcción."* [Título profesional, Universidad Técnica de Ambato]. Repositorio UTA. Obtenido de <https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/31997>
- Millán Corrales, G. (2019). *"Fabricación de cementantes híbridos mediante la activación alcalina de eniza volante-OPC-caliza."* [Tesis doctoral, Universidad Autónoma de Nuevo León]. Repositorio académico digital. Obtenido de <http://eprints.uanl.mx/id/eprint/18521>
- NTE INEN 2380. (2011). *Cemento hidráulico. Requisitos de desempeño para cementos hidráulicos*. Instituto Ecuatoriano de Normalización.
- Oñate Miranda, J. B., Paredes Fierro, K. M., & Andrade Valle, A. I. (2022). *"Diseño de un geo polímero utilizando como material precursor piedra pómez de las provincias de Cotopaxi, Imbabura y Tungurahua."* [Título profesional,

- Universidad Nacional de Chimborazo*]. Repositorio digital UNACH. Obtenido de <http://dspace.unach.edu.ec/handle/51000/9012>
- Orrala Yagual, F. A., Gómez Suárez, F. G., & Ramírez Palma, R. (2015). "*Estudio de la resistencia a la compresión del hormigón con adición de puzolana obtenida de la calcinación de residuos del cultivo de maíz producido en la provincia de Santa Elena.*" [Título profesional, Universidad Estatal Península de Santa Elena]. Repositorio UPSE. Obtenido de <https://repositorio.upse.edu.ec/handle/46000/2272>
- Palomo, A., Fernández-Jiménez, A., Kovalchuk, G., Ordoñez, L. M., & Naranjo, M. C. (22 de Febrero de 2007). "OPC-fly ash cementitious systems: study of gel binders produced during alkaline hydration" [Cemento Portland Ordinario - sistemas cementosos de cenizas volantes: estudio de aglutinantes de gel producidos durante la hidratación alcalina]. *Journal of Materials Science*, 42, 2958–2966. doi:<https://doi.org/10.1007/s10853-006-0585-7>
- PaviConj. (20 de Junio de 2020). *Pavimentos de hormigón decorativo*. Paviconj. Obtenido de PaviConj-es.es: <https://www.paviconj-es.es/hormigon-precios/hormigon-celular/>
- Payá Bernabeu, J., Monzó, J., Borrachero, M. V., Soriano, L., & Tashima, M. M. (01 de January de 2022). Alternative activators in alkali activated cements. *Revista ALCONPAT*, 12(1), 16 - 31. doi:<https://doi.org/10.21041/ra.v12i1.568>
- PROMSA. (2022). *Hormigón*. Obtenido de Promotora Mediterránea-2, S.A.: <https://www.promsa.com/es/productos/f/hormigon>
- PROQUIMSA. (25 de Octubre de 2009). Hoja de seguridad de materiales. *MSDS No. 012. Soda Cáustica Líquida al 50%*.
- Qu, B., Martin, A., Pastor, J. Y., Palomo, A., & Fernández-Jiménez, A. (01 de October de 2016). Characterisation of pre-industrial hybrid cement and effect of pre-curing temperature. *Cement and Concrete Composites*, 73, 281-288. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.07.019>
- Quiroz Crespo, M. V., & Salamanca Osuna, L. E. (2006). "*Apoyo didáctico para la enseñanza y aprendizaje en la asignatura de Tecnología del Hormigón*" [Título profesional, Universidad Mayor del San Simón]. Repositorio UMSS. Obtenido de <http://www.fcyt.umss.edu.bo/materias/>

- Rabie, M., Irshidat, M. R., & Al-Nuaimi, N. (20 de April de 2022). "Ambient and Heat-Cured Geopolymer Composites: Mix Design Optimization and Life Cycle Assessment" [Compuestos de geopolímero curados con calor y ambientales: optimización del diseño de mezclas y evaluación del ciclo de vida]. *Sustainability*, 14(9), 4942. doi:<https://doi.org/10.3390/su14094942>
- Rendón Belmonte, M., Fernández Jiménez, A., Palomo Sánchez, Á., Martínez Madrid, M., Torres Acosta, A., & Pérez Quiroz, J. T. (2015). "*Desarrollo de nuevos cementos: Cementos alcalinos y cementos híbridos.*" [Publicación técnica No.444, Instituto Mexicano del Transporte]. IMT Publicaciones, Sanfandila. Obtenido de <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt444.pdf>
- Rengifo Cuenca, M. C., & Yupangui Cushicondor, R. V. (2013). "*Estudio del hormigón celular*" [Título profesional, Escuela Politécnica Nacional]. Repositorio Digital - EPN. Obtenido de <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/6841>
- Robalino Villagomez, G. H., & Terreros, C. (2016). "*Implementación del mortero celular en el Ecuador*" [Título profesional, Universidad de Especialidades Espíritu Santo]. Repositorio digital UEES. Obtenido de <http://repositorio.uees.edu.ec/handle/123456789/478>
- Salcedo Rivera, V. E., & Coello Fiallos, D. C. (2021). "*Estudio de las propiedades físicas de zeolita natural (aluminosilicato) de tipo clinoptilolita para remplazo parcial del cemento portland.*" [Título profesional, Universidad Técnica de Ambato]. Repositorio UTA. Obtenido de <https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/32000>
- Sánchez Herrero, M. J. (2017). "*La activación alcalina como procedimiento para el desarrollo de nuevos cementos belíticos.*" [Tesis doctoral, Universidad Nacional de Educación a Distancia]. Repositorio Institucional UNED, España. Obtenido de <http://e-spacio.uned.es/fez/view/tesisuned:ED-Pg-Ciencias-Mjsanchez>
- Seguí Seguí, P. (Agosto de 2019). El hormigón: el material más destructivo de la Tierra. *OVACEN: Periódico de Noticias de eficiencia energética y arquitectura*. Obtenido de <https://ovacen.com/hormigon-material-destructivo->

tierra/#:~:text=Más%20tarde%2C%20la%20invención%20del,su%20resistencia%20a%20la%20tracción.











- Shi, X., Zhang, C., Liang, Y., Luo, J., Wang, X., Feng, Y., . . . Abomohra, A. E.-F. (01 de December de 2021). "Life Cycle Assessment and Impact Correlation Analysis of Fly Ash Geopolymer Concrete" [Evaluación del ciclo de vida y análisis de correlación de impacto del hormigón geopolímero de cenizas volantes]. *Materials*, *14*(23), 7375. doi:https://doi.org/10.3390/ma14237375
- Sofi, M., Van Deventer, J. S., Mendis, P. A., & Lukey, G. C. (Febrero de 2007). "Engineering properties of inorganic polymer concretes (IPCs)" [Propiedades de ingeniería de hormigones poliméricos inorgánicos]. *Cement and Concrete Research*, *37*(2), 251-257. doi:https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.10.008
- Tayeh, B. A., Hamada, H. M., Almeshal, I., & Bakar, B. A. (01 de December de 2022). "Durability and mechanical properties of cement concrete comprising pozzolanic materials with alkali-activated binder: A comprehensive review" [Durabilidad y propiedades mecánicas del hormigón de cemento compuesto por materiales puzolánicos...]. *Case Studies in Construction Materials*, *17*, e01429. doi:https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01429
- Tekle, B. H., Hertwig, L., & Holschemacher, K. (18 de September de 2021). "Rheology of Alkali-Activated Blended Binder Mixtures" [Reología de mezclas de ligantes combinados activados con álcali]. *Materials*, *14*(18), 5405. doi:https://doi.org/10.3390/ma14185405
- Torres-Carrasco, M., & Puertas, F. (Agosto de 2017). La activación alcalina de diferentes aluminosilicatos como una alternativa al Cemento Portland: cementos activados alcalinamente o geopolímeros. *Revista ingeniería de construcción*, *32*(2), 05-12. doi:http://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732017000200001
- Ulloa, N., Allauca, J. L., & Reinoso, D. (31 de Agosto de 2021). Cementos alternativos basados en geopolímeros de zeolitas naturales. *Green World Journal*, *4*(2), 22. doi:https://doi.org/10.53313/gwj42022
- Valenzuela Romero, Y. G., & Chérrez Gavilanes, D. S. (2017). "Análisis comparativo de la resistencia a compresión del hormigón tradicional, con

- hormigón al emplear zeolita natural en reemplazo parcial del cemento.*" [Título profesional, Universidad Técnica de Ambato]. Repositorio UTA. Obtenido de <https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/25828>
- Watts, J. (15 de Marzo de 2019). Concrete: the most destructive material on Earth [Hormigón: el material más destructivo de la Tierra]. *Guardian concrete week*. Recuperado el Diciembre de 2022, de <https://www.theguardian.com/cities/2019/feb/25/concrete-the-most-destructive-material-on-earth>
- Yoc Chamalé, J. A. (2018). "Fabricación y evaluación experimental de unidades de mampostería de concreto celular de espuma preformada." [Título profesional, Universidad de San Carlos de Guatemala]. Repositorio Institucional USAC. Obtenido de <http://www.repositorio.usac.edu.gt/id/eprint/8820>
- Yu, W., Liang, X., Ni, F. M.-W., Oyeyi, A. G., & Tighe, S. (12 de June de 2020). "Characteristics of Lightweight Cellular Concrete and Effects on Mechanical Properties" [Características del concreto celular ligero y efectos en las propiedades mecánicas]. *Materials*, 13(12), 2678. doi:<https://doi.org/10.3390/ma13122678>
- Zeonatec. (2020). "Zeolita en la construcción". Obtenido de Zeonatec S.A.: <https://www.zeonatec.com/construccion>

ANEXOS

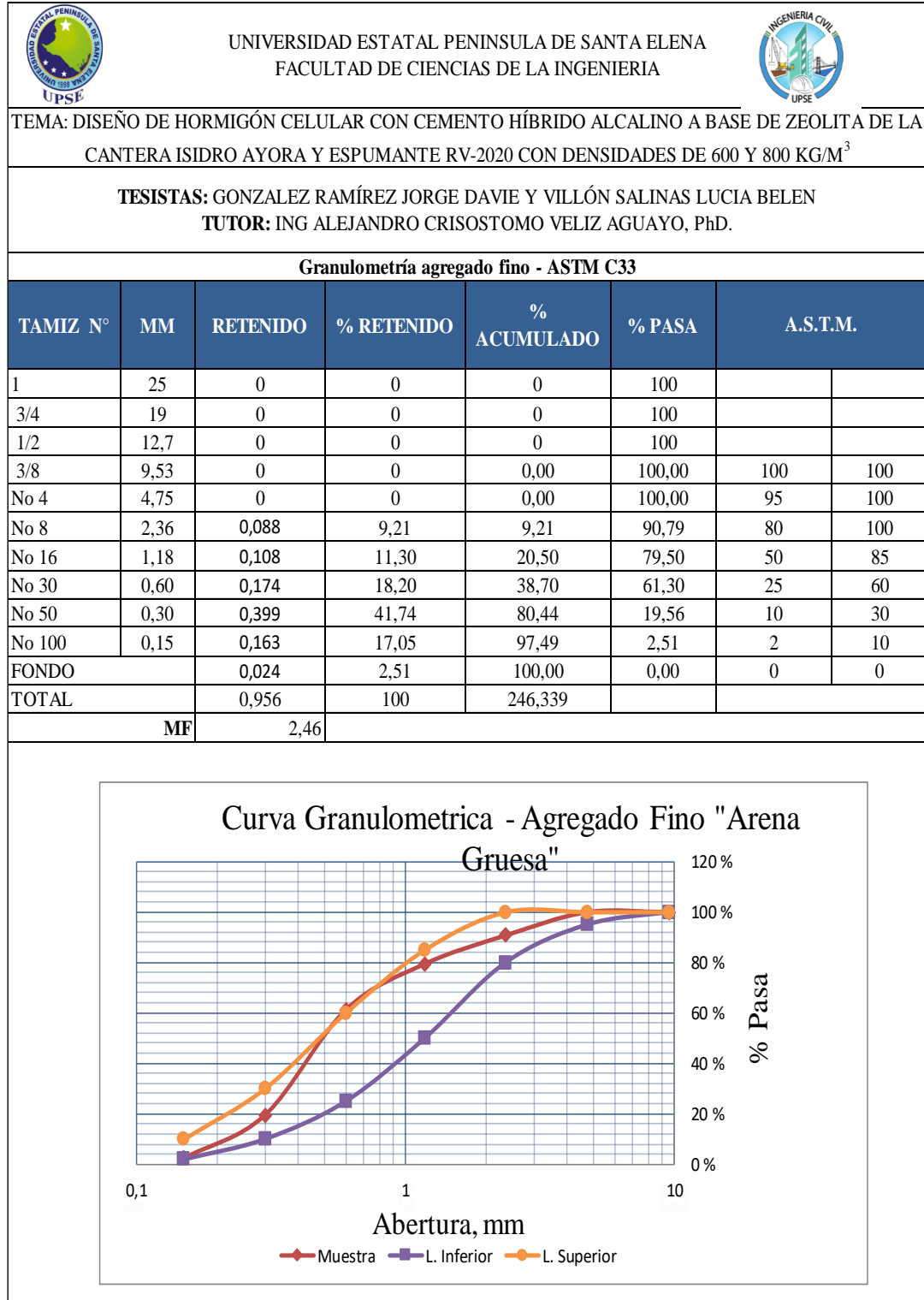
Anexo 1

Registro Fotográfico.

 UNIVERSIDAD ESTATAL PENINSULA DE SANTA ELENA FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERIA 	
TEMA: DISEÑO DE HORMIGÓN CELULAR CON CEMENTO HÍBRIDO ALCALINO A BASE DE ZEOLITA DE LA CANTERA ISIDRO AYORA Y ESPUMANTE RV-2020 CON DENSIDADES DE 600 Y 800 KG/M ³	
TESIS: GONZALEZ RAMÍREZ JORGE DAVIE Y VILLÓN SALINAS LUCIA BELEN TUTOR: ING ALEJANDRO CRISOSTOMO VELIZ AGUAYO, PhD.	
ENSAYOS PRELIMINARES CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES	
GRANULOMETRÍA AGREGADO FINO	GRANULOMETRÍA ZEOLITA MALLA N°325
 	TAMIZADO MALLA N°200 
	GRANULOMETRÍA POR HIDROMETRO  
PESO VOLUMETRICO A.F.	PESO VOLUMETRICO ZEOLITA MALLA N°325
	 



Anexo 2

Análisis granulométrico agregado fino "arena".





Anexo 3

Análisis granulométrico por hidrómetro “zeolita malla N°325”

 <div style="text-align: center;"> UNIVERSIDAD ESTATAL PENINSULA DE SANTA ELENA FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERIA INGENIERIA CIVIL </div> 													
TEMA: DISEÑO DE HORMIGÓN CELULAR CON CEMENTO HÍBRIDO ALCALINO A BASE DE ZEOLITA DE LA CANTERA ISIDRO AYORA Y ESPUMANTE RV-2020 CON DENSIDADES DE 600 Y 800 KG/M ³													
TESISISTAS: GONZALEZ RAMÍREZ JORGE DAVIE Y VILLÓN SALINAS LUCIA BELEN TUTOR: ING ALEJANDRO CRISOSTOMO VELIZ AGUAYO, PhD.													
Granulometría POR Hidrometo - ASTM D7928-16													
HIDROMETRO PUNTA PLATEADA 379854													
FACTOR DE CORRECCIÓN		2		CORRECCIÓN DEL CERO				2		a			1,08
Hora de lectura	Temperatura	Tiempo transcurrido (min)	Tiempo transcurrido (h)	Lectura real del hidrometro Rc	Lectura corregida del hidrometro	% mas fino corregido	hidrometro corregido por menisco R	Valor L (cm)	L/T	Valor k	Diametro particulas (mm)	% Que Pasa	
9h33	27	1	0,02	38	38,4	82,72	40,4	9,75	9,75	0,013788	0,04304641	97,32	
9h34	27	2	0,03	36	36,4	78,41	38,4	10,09	5,05	0,013788	0,03097115	92,25	
9h35	27	3	0,05	34	34,4	74,11	36,4	10,44	3,48	0,013788	0,02571547	87,18	
9h36	27	4	0,07	34	34,4	74,11	36,4	10,44	2,61	0,013788	0,02227025	87,18	
9h40	27	8	0,13	32	32,4	69,80	34,4	10,78	1,35	0,013788	0,01600503	82,11	
9h47	27	15	0,25	30	30,4	65,49	32,4	11,12	0,74	0,013788	0,01187355	77,05	
10h02	27	30	0,50	28	28,4	61,18	30,4	11,47	0,38	0,013788	0,00852477	71,98	
10h32	27	60	1,00	28	28,4	61,18	30,4	11,47	0,19	0,013788	0,00602792	71,98	
11h32	27	120	2,00	27	27,4	59,03	29,4	11,64	0,10	0,013788	0,00429424	69,44	
13h32	27	240	4,00	26	26,4	56,87	28,4	11,81	0,05	0,013788	0,00305885	66,91	
17h32	27	480	8,00	25	25,4	54,72	27,4	11,98	0,02	0,013788	0,00217863	64,37	
01h32	27	960	16,00	24	24,4	52,56	26,4	12,16	0,01	0,013788	0,00155155	61,84	
05h32	27	1920	32,00	22	22,4	48,26	24,4	12,50	0,01	0,013788	0,00111253	56,77	
01h32	27	3840	64,00	20	20,4	43,95	22,4	12,84	0,00	0,013788	0,00079744	51,70	
09h32	27	5760	96,00	17	17,4	37,48	19,4	13,36	0,00	0,013788	0,00066406	44,10	



Anexo 4

Tabla de cálculo peso volumétrico suelto, densidad superficialmente saturada seca, % de absorción y contenido de humedad del agregado fino.

		UNIVERSIDAD ESTATAL PENINSULA DE SANTA ELENA FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERIA			
TEMA: DISEÑO DE HORMIGÓN CELULAR CON CEMENTO HÍBRIDO ALCALINO A BASE DE ZEOLITA DE LA CANTERA ISIDRO AYORA Y ESPUMANTE RV-2020 CON DENSIDADES DE 600 Y 800 KG/M ³					
TESISTAS: GONZALEZ RAMÍREZ JORGE DAVIE Y VILLÓN SALINAS LUCIA BELEN TUTOR: ING ALEJANDRO CRISOSTOMO VELIZ AGUAYO, PhD.					
CARACTERISTICAS DEL AGREGADO FINO					
ENSAYOS - ARENA GRUESA					
PESO VOLUMETRICO SUELTO					
	ITEM	VALOR	UNIDAD		
	VOLUMEN	0,00281	m3		
	P.V.S + R	8,32	Kg		
	RECIPIENTE	4,42	Kg		
	PESO DEL MATERIAL	3,9	Kg		
	PVS	1387,90	kg/m3		
DENSIDAD SATURADA SUPERFICIALMENTE SECA					
	ITEM	VALOR	UNIDAD		
	P.S.S.S.	500	gr		
	LECTURA INICIAL	200	gr		
	LECTURA FINAL	403	gr		
	W(DESALOJADO)	203	gr		
	VOLUMEN	203	cm3		
	D.S.S.S.	2,46	gr/cm3		
	D.S.S.S.	2463,05419	Kg/m3		
% ABSORCION					
	ITEM	VALOR	UNIDAD		
	RECIPIENTE	DC3			
	W RECIPIENTE (gr)	31,62	gr		
	W ARENA SATURADA + R	328,7	gr		
	W ARENA SECA + R	324,72	gr		
	W AGUA	3,98	gr		
	W ARENA SECA	293,1	gr		
	% ABSORCION	1,36	%		
HUMEDAD					
	ITEM	VALOR	UNIDAD		
	RECIPIENTE	Rt			
	W RECIPIENTE (gr)	93,77	gr		
	W ARENA + R	792	gr		
	W ARENA SECA + R	778	gr		
	W AGUA	14	gr		
	W ARENA SECA	684,23	gr		
	HUMEDAD	2,05	%		




Anexo 5

Tabla de cálculo peso volumétrico suelto, densidad superficialmente saturada seca, % de absorción y contenido de humedad de la zeolita.

 UNIVERSIDAD ESTATAL PENINSULA DE SANTA ELENA FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERIA		 INGENIERIA CIVIL UPSE	
TEMA: DISEÑO DE HORMIGÓN CELULAR CON CEMENTO HÍBRIDO ALCALINO A BASE DE ZEOLITA DE LA CANTERA ISIDRO AYORA Y ESPUMANTE RV-2020 CON DENSIDADES DE 600 Y 800 KG/M ³			
TESISTAS: GONZALEZ RAMÍREZ JORGE DAVIE Y VILLÓN SALINAS LUCIA BELEN TUTOR: ING ALEJANDRO CRISOSTOMO VELIZ AGUAYO, PhD.			
CARACTERISTICAS DEL AGREGADO FINO			
ENSAYOS - ZEOLITA			
PESO VOLUMETRICO SUELTO			
	ITEM	VALOR	UNIDAD
	VOLUMEN	0,00281	m ³
	P.V.S + R	6,86	Kg
	RECIPIENTE	4,42	Kg
	PESO DEL MATERIAL	2,44	Kg
	PVS	868,33	kg/m ³
DENSIDAD SATURADA SUPERFICIALMENTE SECA			
	ITEM	VALOR	UNIDAD
	P.S.S.S.	500	gr
	LECTURA INICIAL	200	gr
	LECTURA FINAL	413	gr
	W(DESALOJADO)	213	gr
	VOLUMEN	213	cm ³
	D.S.S.S.	2,35	gr/cm ³
	D.S.S.S.	2347,41784	Kg/m ³
% ABSORCION			
	ITEM	VALOR	UNIDAD
	RECIPIENTE	l	
	W RECIPIENTE (gr)	34,01	gr
	W ARENA SATURADA + R	167,03	gr
	W ARENA SECA + R	162,57	gr
	W AGUA	4,46	gr
	W ARENA SECA	128,56	gr
	% ABSORCION	3,47	%
HUMEDAD			
	ITEM	VALOR	UNIDAD
	RECIPIENTE	l	
	W RECIPIENTE (gr)	34,01	gr
	W ARENA + R	181	gr
	W ARENA SECA + R	177	gr
	W AGUA	4	gr
	W ARENA SECA	142,99	gr
	HUMEDAD	2,80	%

Anexo 6

Registro fotográfico.

	UNIVERSIDAD ESTATAL PENINSULA DE SANTA ELENA FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERIA INGENIERIA CIVIL																								
TEMA: DISEÑO DE HORMIGÓN CELULAR CON CEMENTO HÍBRIDO ALCALINO A BASE DE ZEOLITA DE LA CANTERA ISIDRO AYORA Y ESPUMANTE RV-2020 CON DENSIDADES DE 600 Y 800 KG/M ³																									
TESISISTAS: GONZALEZ RAMÍREZ JORGE DAVIE Y VILLÓN SALINAS LUCIA BELEN TUTOR: ING ALEJANDRO CRISOSTOMO VELIZ AGUAYO, PhD.																									
Gravedad especifica zeolita																									
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>RECIPIENTE</td><td style="text-align: center;">n° 2</td></tr> <tr><td>TEMPERATURA</td><td style="text-align: center;">26</td></tr> <tr><td>PESO RECIPIENTE</td><td style="text-align: center;">166,18</td></tr> <tr><td>RECIPIENTE + Ws</td><td style="text-align: center;">236,97</td></tr> <tr><td>FRASCO + AGUA (WBW)</td><td style="text-align: center;">663,9</td></tr> <tr><td>FRASCO + AGUA +WBW</td><td style="text-align: center;">779,80</td></tr> </table> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr style="background-color: #0056b3; color: white;"> <th colspan="2" style="text-align: center;">CÁLCULO</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td style="text-align: center;">Ws</td><td style="text-align: center;">200</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">ws + wbw</td><td style="text-align: center;">863,90</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">ws + wbw - wbws</td><td style="text-align: center;">84,10</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">k</td><td style="text-align: center;">0,99858</td></tr> <tr style="background-color: #0056b3; color: white;"><td style="text-align: center;">Gs</td><td style="text-align: center;">2,37</td></tr> </tbody> </table>	RECIPIENTE	n° 2	TEMPERATURA	26	PESO RECIPIENTE	166,18	RECIPIENTE + Ws	236,97	FRASCO + AGUA (WBW)	663,9	FRASCO + AGUA +WBW	779,80	CÁLCULO		Ws	200	ws + wbw	863,90	ws + wbw - wbws	84,10	k	0,99858	Gs	2,37	
RECIPIENTE	n° 2																								
TEMPERATURA	26																								
PESO RECIPIENTE	166,18																								
RECIPIENTE + Ws	236,97																								
FRASCO + AGUA (WBW)	663,9																								
FRASCO + AGUA +WBW	779,80																								
CÁLCULO																									
Ws	200																								
ws + wbw	863,90																								
ws + wbw - wbws	84,10																								
k	0,99858																								
Gs	2,37																								



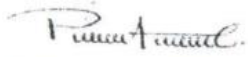
Anexo 7

Registro fotográfico.

	UNIVERSIDAD ESTATAL PENINSULA DE SANTA ELENA FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERIA INGENIERIA CIVIL	
TEMA: DISEÑO DE HORMIGÓN CELULAR CON CEMENTO HÍBRIDO ALCALINO A BASE DE ZEOLITA DE LA CANTERA ISIDRO AYORA Y ESPUMANTE RV-2020 CON DENSIDADES DE 600 Y 800 KG/M ³		
TESISISTAS: GONZALEZ RAMÍREZ JORGE DAVIE Y VILLÓN SALINAS LUCIA BELEN TUTOR: ING ALEJANDRO CRISOSTOMO VELIZ AGUAYO, PhD.		
DENSIDAD DE ESPUMA Y RENDIMIENTO		
		

Anexo 8

Ficha técnica silicato de sodio que se utilizó para la solución activadora.

	UNIVERSIDAD ESTATAL PENINSULA DE SANTA ELENA FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERIA INGENIERIA CIVIL							
TEMA: DISEÑO DE HORMIGÓN CELULAR CON CEMENTO HÍBRIDO ALCALINO A BASE DE ZEOLITA DE LA CANTERA ISIDRO AYORA Y ESPUMANTE RV-2020 CON DENSIDADES DE 600 Y 800 KG/M ³								
TESISISTAS: GONZALEZ RAMÍREZ JORGE DAVIE Y VILLÓN SALINAS LUCIA BELEN TUTOR: ING ALEJANDRO CRISOSTOMO VELIZ AGUAYO, PhD.								
FICHA TECNICA SILICATO DE SODIO								
<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin: 0 auto; width: 80%;"> CERTIFICADO DE CALIDAD SILICATO DE SODIO LÍQUIDO 3.2 </div>								
Fecha de producción: Enero 2023 Fecha de vencimiento: Dos años después de su producción.								
FECHA	KILOS	CLIENTE	NÚMERO LOTE	% Na2O 9,2% - 11,0%	Densidad (° Bé) 41,0 - 43,0	% SiO2 27,5% - 29,5%	% SiO2 /% Na2O Relación 2,9 - 3,2	% Sólidos totales (Por peso)
02-feb-23	6.720	RESIQUM S.A	230123	9,59	41,70	27,97	2,92	37,56
Observaciones: <small>* Si existe algún reclamo, favor dirigirse al departamento de control de calidad de nuestra empresa indicando fecha de despacho, número de lote y motivo del reclamo al correo.</small>								
								
I.Q. Paola Andrea Cardona Hernández. Control de Calidad								

Anexo 9

técnica silicato de sodio que se utilizó para la solución activadora.

	UNIVERSIDAD ESTATAL PENINSULA DE SANTA ELENA FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERIA INGENIERÍA CIVIL		
TEMA: DISEÑO DE HORMIGÓN CELULAR CON CEMENTO HÍBRIDO ALCALINO A BASE DE ZEOLITA DE LA CANTERA ISIDRO AYORA Y ESPUMANTE RV-2020 CON DENSIDADES DE 600 Y 800 KG/M ³			
TESISTAS: GONZÁLEZ RAMÍREZ JORGE DAVIE Y VILLÓN SALINAS LUCIA BELEN TUTOR: ALEJANDRO CRISOSTOMO VELIZ AGUAYO, PhD.			
FICHA TÉCNICA HIDRÓXIDO DE SODIO			
1. IDENTIFICACION DEL MATERIAL			
Nombre Comercial:	Soda Cáustica Líquida al 50%		
Nombre Químico:	Solución de Hidróxido de Sodio al 50%		
Formula Química:	NaOH		
Nombre del Distribuidor:	PROQUIMSA S.A.		
Dirección del Distribuidor:	Parque Industrial Ecuatoriano, Km. 16.5 vía a Daule Av. Rosavín y Cobre		
2. COMPOSICION / INFORMACION DE INGREDIENTES			
Ingrediente(s) Peligroso(s)	% (p/p)	TLV(ppm)	CAS N°
Hidróxido de Sodio	50	2 mg/m ³	1310-73-2
3. PROPIEDADES FISICAS			
Apariencia:	Líquido corrosivo viscoso incoloro		
Temperatura de ebullición (1 bar):	145 °C		
Temperatura de congelamiento (1 bar):	14 °C		
Gravedad específica 20°C:	1.35		
Peso molecular:	39.997 g/mol		
Solubilidad en Agua:	Soluble en todas proporciones.		

Anexo 10

Registro fotográfico.

	UNIVERSIDAD ESTATAL PENINSULA DE SANTA ELENA FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERIA INGENIERIA CIVIL	
TEMA: DISEÑO DE HORMIGÓN CELULAR CON CEMENTO HÍBRIDO ALCALINO A BASE DE ZEOLITA DE LA CANTERA ISIDRO AYORA Y ESPUMANTE RV-2020 CON DENSIDADES DE 600 Y 800 KG/M ³		
TESISTAS: GONZALEZ RAMÍREZ JORGE DAVIE Y VILLÓN SALINAS LUCIA BELEN TUTOR: ING ALEJANDRO CRISOSTOMO VELIZ AGUAYO, PhD.		
ENSAYO DE CONO DE ABRAMS - ASTM C 143		
		

Anexo 11

Registro fotográfico.

	UNIVERSIDAD ESTATAL PENINSULA DE SANTA ELENA FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERIA INGENIERIA CIVIL	
TEMA: DISEÑO DE HORMIGÓN CELULAR CON CEMENTO HÍBRIDO ALCALINO A BASE DE ZEOLITA DE LA CANTERA ISIDRO AYORA Y ESPUMANTE RV-2020 CON DENSIDADES DE 600 Y 800 KG/M ³		
TESISTAS: GONZALEZ RAMÍREZ JORGE DAVIE Y VILLÓN SALINAS LUCIA BELEN TUTOR: ING ALEJANDRO CRISOSTOMO VELIZ AGUAYO, PhD.		
ENSAYO DE FLUIDEZ - ASTM C230		
		

Anexo 12

Registro fotográfico.

	<p>UNIVERSIDAD ESTATAL PENINSULA DE SANTA ELENA FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERIA INGENIERIA CIVIL</p>	
<p>TEMA: DISEÑO DE HORMIGÓN CELULAR CON CEMENTO HÍBRIDO ALCALINO A BASE DE ZEOLITA DE LA CANTERA ISIDRO AYORA Y ESPUMANTE RV-2020 CON DENSIDADES DE 600 Y 800 KG/M³</p>		
<p>TESISTAS: GONZALEZ RAMÍREZ JORGE DAVIE Y VILLÓN SALINAS LUCIA BELEN TUTOR: ING ALEJANDRO CRISOSTOMO VELIZ AGUAYO, PhD.</p>		
<p>ELABORACIÓN DE PROBETAS</p>		
		

Anexo 13

Tabla utilizada para dosificación de hormigón celular con cemento híbrido alcalino con densidad de 600 kg/m^3 – M6 D600

UNIVERSIDAD ESTADAL PENINSULA DE SANTA ELENA FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERIA INGENIERÍA CIVIL		UNIVERSIDAD ESTADAL PENINSULA DE SANTA ELENA FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERIA INGENIERÍA CIVIL		
TEMA: DISEÑO DE HORMIGÓN CELULAR CON CEMENTO HÍBRIDO ALCALINO A BASE DE ZEOLITA DE LA CANTERA ISIDRO AYORA Y ESPUMANTE RV-2020 CON DENSIDADES DE 600 Y 800 KG/M ³				
TESISTAS: GONZÁLEZ RAMÍREZ JORGE DAVIE Y VILLÓN SALINAS LUCIA BELEN TUTOR: ALEJANDRO CRISOSTOMO VELIZ AGUAYO, PhD.				
DOSIFICACION DEL HORMIGÓN CELULAR				
CARACTERISTICA DE LOS MATERIALES				
UNIDAD		UNIDAD		
PESO ESPECIFICO	2,46 gr/cm3	TIPO DE CEMENTO	HE	
CONTENIDO DE HUMEDAD	0,00 %	PESO ESPECIFICO	3,15 g/cm3	
ABSORCION	0 %	DENSIDAD ZEOLITA	2,35	
MODULO DE FINURA	2,49	DENSIDAD ACTIVADOR	1,38	
UNIDAD		UNIDAD		
DENSIDAD DEL AGUA	1 kg/m3	RENDIMIENTO	0,8	
		DENSIDAD	0,06 g/cm3	
EN CASO DE USAR ADITIVOS Y FIBRAS				
	VALOR	UNIDAD	CANTIDAD	
ADITIVO	1,00	kg/lt	0 % PESO DEL CEMENTO	
FIBRA	1	kg/lt	0 KG/M3	
DISEÑO DE MEZCLAS DE HORMIGÓN CELULAR SEGÚN NORMA ACI 523.14				
DENSIDAD EN ESTADO FRESCO	630	kg/m3	mc	
RESISTENCIA A LA COMPRESION F'C	1,27	MPA (F'C TEÓRICA)	251 660,17903 0,625875028	
RELACION AGUA/CEMENTO (a/c)	0,50	a/c = 0,45 A 0,60 SEGUN	252 658,825162 0,62812951	
RELACION ARENA CEMENTO (s/c)	0,00	NORMA ACI 523.3R-14	253 657,471293 0,630383992	
RELACIÓN ZEOLITA/PORTLAND (z/p)	0,429		254 656,117425 0,632638474	
RELACIÓN ACTIVADOR/ZEOLITA (a/z)	0,45		255 654,763557 0,634892956	
RESULTADOS PRELIMINARES PARA 1M3 DE HC				
ITEM	VALOR	UNIDAD		
DENSIDAD EN ESTADO ENDURECIDO	600,366	kg/m3		
CANTIDAD DE CEMENTO	253,000	kg/m3		
CANTIDAD DE ZEOLITA	108,429	kg/m3		
CANTIDAD DE AGUA DE DISEÑO	180,714	lt/m3		
CANTIDAD DE ARENA	0,000	kg/m3		
CANTIDAD DE SOLUCIÓN ACTIVADORA	48,793	lt/m3		
CANTIDAD DE FIBRA	0,000	kg/m3		
VOLUMEN ABSOLUTO DE DISEÑO	1,000	kg/m3		
VOLUMEN ESPUMA REQUERIDA	657,471	m3		
PESO DE LA ESPUMA	39,448	kg/m3		
CANTIDADES NECESARIAS PARA 1M3 DE HC		CANTIDADES NECESARIAS PARA CILINDROS		
MATERIALES DE DISEÑO	VALOR	UNIDAD	DATOS CILINDRO	MATERIAL
CEMENTO	253,000	kg	PI 3,14156	CEMENTO 4,024
ZEOLITA	108,429	kg	r 0,05	ZEOLITA 1,724
SOLUCIÓN ACTIVADORA	48,793	kg	h 0,2	SOLUCIÓN 0,776
ARENA	0,000	kg	V 0,00157078	ARENA 0,000
AGUA	180,714	kg	# CILINDRO 9	AGUA 2,874
ESPUMA	39,448	L	VOLUMEN 0,01413702	ESPUMA 0,627
FIBRA			DESPERDICI 13%	FIBRA 0,000
AUTORES: GONZÁLEZ RAMÍREZ JORGE DAVIE VILLÓN SALINAS LUCIA BELÉN			O 0,00176713	10,026
		V. RQ	0,015904148	



Anexo 14

Tabla utilizada para dosificación de hormigón celular con cemento híbrido alcalino con densidad de 800 kg/m^3 – M6 D800

UNIVERSIDAD ESTADAL PENINSULA DE SANTA ELENA FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERIA INGENIERÍA CIVIL		UNIVERSIDAD ESTADAL PENINSULA DE SANTA ELENA FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERIA INGENIERÍA CIVIL			
TEMA: DISEÑO DE HORMIGÓN CELULAR CON CEMENTO HÍBRIDO ALCALINO A BASE DE ZEOLITA DE LA CANTERA ISIDRO AYORA Y ESPUMANTE RV-2020 CON DENSIDADES DE 600 Y 800 KG/M ³					
TESISTAS: GONZÁLEZ RAMÍREZ JORGE DAVIE Y VILLÓN SALINAS LUCIA BELEN TUTOR: ALEJANDRO CRISOSTOMO VELIZ AGUAYO, PhD.					
DOSIFICACION DEL HORMIGÓN CELULAR					
CARACTERISTICA DE LOS MATERIALES					
UNIDAD		UNIDAD			
PESO ESPECIFICO	2,46 gr/cm3	TIPO DE CEMENTO	HE		
CONTENIDO DE HUMEDAD	0,00 %	PESO ESPECIFICO	3,15 g/cm3		
ABSORCION	0 %	DENSIDAD ZEOLITA	2,35		
MODULO DE FINURA	2,49	DENSIDAD ACTIVADOR	1,38		
UNIDAD		UNIDAD			
DENSIDAD DEL AGUA	1 kg/m3	RENDIMIENTO	0,8		
		DENSIDAD	0,06 g/cm3		
EN CASO DE USAR ADITIVOS Y FIBRAS					
	VALOR	UNIDAD	CANTIDAD		
ADITIVO	1,00	kg/lt	0 % PESO DEL CEMENTO		
FIBRA	1	kg/lt	0 KG/M3		
DISEÑO DE MEZCLAS DE HORMIGÓN CELULAR SEGÚN NORMA ACI 523.14					
DENSIDAD EN ESTADO FRESCO	840	kg/m3	mc	Ve	Dhc
RESISTENCIA A LA COMPRESION F'C	1,98	MPA (F'C TEÓRICA)	344	534,269269	0,83554187
RELACION AGUA/CEMENTO (a/c)	0,50	a/c = 0,45 A 0,60 SEGUN	345	532,9154	0,837796353
RELACION ARENA CEMENTO (s/c)	0,00	NORMA ACI 523.3R-14	346	531,561532	0,840050835
RELACIÓN ZEOLITA/PORTLAND (z/p)	0,429		347	530,207663	0,842305317
RELACIÓN ACTIVADOR/ZEOLITA (a/z)	0,45		348	528,853795	0,844559799
RESULTADOS PRELIMINARES PARA 1M3 DE HC					
ITEM	VALOR	UNIDAD			
DENSIDAD EN ESTADO ENDURECIDO	800,048	kg/m3			
CANTIDAD DE CEMENTO	346,000	kg/m3			
CANTIDAD DE ZEOLITA	148,286	kg/m3			
CANTIDAD DE AGUA DE DISEÑO	247,143	lt/m3			
CANTIDAD DE ARENA	0,000	kg/m3			
CANTIDAD DE SOLUCIÓN ACTIVADORA	66,729	lt/m3			
CANTIDAD DE FIBRA	0,000	kg/m3			
VOLUMEN ABSOLUTO DE DISEÑO	1,000	kg/m3			
VOLUMEN ESPUMA REQUERIDA	531,562	m3			
PESO DE LA ESPUMA	31,894	kg/m3			
CANTIDADES NECESARIAS PARA 1M3 DE HC			CANTIDADES NECESARIAS PARA CILINDROS		
MATERIALES DE DISEÑO	VALOR	UNIDAD	DATOS CILINDRO	MATERIAL	
CEMENTO	346,000	kg	PI	3,14156	CEMENTO 5,503
ZEOLITA	148,286	kg	r	0,05	ZEOLITA 2,358
SOLUCIÓN ACTIVADORA	66,729	kg	h	0,2	SOLUCIÓN 1,061
ARENA	0,000	kg	V	0,00157078	ARENA 0,000
AGUA	247,143	kg	# CILINDRO	9	AGUA 3,931
ESPUMA	31,894	L	VOLUMEN	0,01413702	ESPUMA 0,507
FIBRA			DESPERDICI	13%	FIBRA 0,000
AUTORES: GONZÁLEZ RAMÍREZ JORGE DAVIE VILLÓN SALINAS LUCIA BELÉN			O	0,00176713	13,360
			V. RQ	0,015904148	



Anexo 15

Análisis de precio unitario para hormigón celular patrón con densidad de 600 kg/m³ – MP D600

		UNIVERSIDAD ESTATAL PENINSULA DE SANTA ELENA FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERIA INGENIERÍA CIVIL					
TEMA: DISEÑO DE HORMIGÓN CELULAR CON CEMENTO HÍBRIDO ALCALINO A BASE DE ZEOLITA DE LA CANTERA ISIDRO AYORA Y ESPUMANTE RV-2020 CON DENSIDADES DE 600 Y 800 KG/M ³							
TESISTAS: GONZÁLEZ RAMÍREZ JORGE DAVIE Y VILLÓN SALINAS LUCIA BELEN TUTOR: ALEJANDRO CRISOSTOMO VELIZ AGUAYO, PhD.							
ANALISIS DE PRECIOS UNITARIOS							
RUBRO:	1,00	UNIDAD:	m ³				
DETALLE:	HORMIGÓN CELULAR Patron densidad de 600 Kg/m ³ (M1 D600)						
EQUIPOS							
DESCRIPCION	CANTIDAD	TARIFA	COSTO HORA	RENDIMIENTO	COSTO		
	A	B	C=A*B	R	D=C*R		
Herramienta menor (5% MO)						0,2788	
Maquina generadora de espuma	1,000	2,1450	2,1450	0,5000	1,0730		
Batidora manual	1,000	1,2500	1,2500	0,20000	0,250		
SUBTOTAL M =					1,6018		
MANO DE OBRA							
DESCRIPCION	CANTIDAD	JORNAL /HR	COSTO HORA	RENDIMIENTO	COSTO		
(CATEGORIAS)	A	B	C=A*B	R	D=C*R		
Peon (estr.ocp. E2)	3,000	3,6200	10,8600	0,3000	3,2580		
Maestro (estr.ocp. C1)	1,000	4,0600	4,0600	0,0300	0,1218		
Albañil (estr.ocp. D2)	2,000	3,6600	7,3200	0,3000	2,1960		
SUBTOTAL N =					5,5758		
MATERIALES							
DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNIT.	COSTO			
		A	B	C=A*B			
Cemento HE Saco 50 Kg	Sacos	7,860	8,4000	66,0240			
Agua	m3	0,195	1,0800	0,2106			
Espuma RV2000	Lt	678,730	0,0050	3,4212			
SUBTOTAL O =				69,6558			
TRANSPORTE							
DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	TARIFA	COSTO			
		A	B	C=A*B			
SUBTOTAL P =				0,0000			
TOTAL COSTO DIRECTOS X=(M+N+O+P)					76,8334		
INDIRECTOS Y UTILIDAD 25,00%					19,2084		
OTROS INDIRECTOS %							
COSTO TOTAL DEL RUBRO					96,0418		
VALOR OFERTADO					\$ 96,04		
La libertad, 10 de Julio 2023,							
Realizado Por:		Gonzalez Ramirez Jorge Davie y Villón Salinas Lucia Belen					
Revisado por:		Ing. Alejandro Veliz Aguayo PhD. / Ing. Richard Ramirez Palma MSc.					



Anexo 16

Análisis de precio unitario para hormigón celular con zeolita sin activar densidad de 600 kg/m³ – MP.1 D600

		UNIVERSIDAD ESTATAL PENINSULA DE SANTA ELENA FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERIA INGENIERÍA CIVIL					
TEMA: DISEÑO DE HORMIGÓN CELULAR CON CEMENTO HÍBRIDO ALCALINO A BASE DE ZEOLITA DE LA CANTERA ISIDRO AYORA Y ESPUMANTE RV-2020 CON DENSIDADES DE 600 Y 800 KG/M ³							
TESISTAS: GONZÁLEZ RAMÍREZ JORGE DAVIE Y VILLÓN SALINAS LUCIA BELEN TUTOR: ALEJANDRO CRISOSTOMO VELIZ AGUAYO, PhD.							
ANALISIS DE PRECIOS UNITARIOS							
RUBRO:	2,00	UNIDAD:	m ³				
DETALLE:	HORMIGÓN CELULAR CON zeolita sin activar de 600 Kg/m ³ M1 D600						
EQUIPOS							
DESCRIPCION	CANTIDAD	TARIFA	COSTO HORA	RENDIMIENTO	COSTO		
	A	B	C=A*B	R	D=C*R		
Herramienta menor (5% MO)					0,2788		
Maquina generadora de espuma	1,000	2,1450	2,1450	0,5000	1,0730		
Batidora manual	1,000	1,2500	1,2500	0,20000	0,250		
SUBTOTAL M =					1,6018		
MANO DE OBRA							
DESCRIPCION	CANTIDAD	JORNAL /HR	COSTO HORA	RENDIMIENTO	COSTO		
(CATEGORIAS)	A	B	C=A*B	R	D=C*R		
Peon (estr.ocp. E2)	3,000	3,6200	10,8600	0,3000	3,2580		
Maestro (estr.ocp. C1)	1,000	4,0600	4,0600	0,0300	0,1218		
Albañil (estr.ocp. D2)	2,000	3,6600	7,3200	0,3000	2,1960		
SUBTOTAL N =					5,5758		
MATERIALES							
DESCRIPCION		UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNIT.	COSTO		
			A	B	C=A*B		
Cemento HE Saco 50 Kg		Saco	3,940	8,4000	33,0960		
Agua		m ³	0,197	1,0800	0,2128		
Espuma Rv		Lt	656,631	0,0050	3,2832		
Zeolita malla N° 325 saco 25 kg		Saco	7,880	3,2000	25,2160		
SUBTOTAL O =					61,8079		
TRANSPORTE							
DESCRIPCION		UNIDAD	CANTIDAD	TARIFA	COSTO		
			A	B	C=A*B		
SUBTOTAL P =					0,0000		
TOTAL COSTO DIRECTOS X=(M+N+O+P)					68,9855		
INDIRECTOS Y UTILIDAD					25,00%	17,2464	
OTROS INDIRECTOS					%		
COSTO TOTAL DEL RUBRO					86,2319		
VALOR OFERTADO					\$	86,23	
La libertad, 10 de Julio 2023, Realizado Por: Gonzalez Ramirez Jorge Davie y Villón Salinas Lucia Belen Revisado por: Ing. Alejandro Veliz Aguayo PhD. / Ing. Richard Ramirez Palma MSc.							



Anexo 17

Análisis de precio unitario para hormigón celular con cemento alcalino 70% cemento y 30% zeolita de 600 kg/m³ – M6 D600

		UNIVERSIDAD ESTATAL PENINSULA DE SANTA ELENA FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERIA INGENIERÍA CIVIL						
TEMA: DISEÑO DE HORMIGÓN CELULAR CON CEMENTO HÍBRIDO ALCALINO A BASE DE ZEOLITA DE LA CANTERA ISIDRO AYORA Y ESPUMANTE RV-2020 CON DENSIDADES DE 600 Y 800 KG/M ³								
TESISISTAS: GONZÁLEZ RAMÍREZ JORGE DAVIE Y VILLÓN SALINAS LUCIA BELEN TUTOR: ALEJANDRO CRISOSTOMO VELIZ AGUAYO, PhD.								
ANALISIS DE PRECIOS UNITARIOS								
RUBRO:	3,00	UNIDAD:	m ³					
DETALLE:	HORMIGÓN CELULAR con cemento híbrido alcalino 70% cemento y 30% zeolita de 600 Kg/m ³ (M6 D600)							
EQUIPOS								
DESCRIPCION	CANTIDAD	TARIFA	COSTO HORA	RENDIMIENTO	COSTO			
	A	B	C=A*B	R	D=C*R			
Herramienta menor (5% MO)						0,2788		
Maquina generadora de espuma	1,000	2,1450	2,1450	0,5000	1,0730			
Batidora manual	1,000	1,2500	1,2500	0,20000	0,250			
SUBTOTAL M =					1,6018			
MANO DE OBRA								
DESCRIPCION	CANTIDAD	JORNAL /HR	COSTO HORA	RENDIMIENTO	COSTO			
(CATEGORIAS)	A	B	C=A*B	R	D=C*R			
Peon (estr.ocp. E2)	3,000	3,6200	10,8600	0,3000	3,2580			
Maestro (estr.ocp. C1)	1,000	4,0600	4,0600	0,0300	0,1218			
Albañil (estr.ocp. D2)	2,000	3,6600	7,3200	0,3000	2,1960			
SUBTOTAL N =					5,5758			
MATERIALES								
DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNIT.	COSTO				
		A	B	C=A*B				
Cemento HE Saco 50 Kg	saco	5,060	8,4000	42,5040				
Agua	m ³	0,181	1,0800	0,1955				
Espuma Rv	Lt	678,730	0,0050	3,3937				
Zeolita Malla N°325 saco 25kg	saco	4,337	3,2000	13,8781				
Solución activadora Hidroxido de sodio + silicato de sodio	kg	48,793	0,2660	12,9809				
SUBTOTAL O =				72,9522				
TRANSPORTE								
DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	TARIFA	COSTO				
		A	B	C=A*B				
SUBTOTAL P =				0,0000				
					TOTAL COSTO DIRECTOS X=(M+N+O+P)			80,1298
					INDIRECTOS Y UTILIDAD 25,00%			20,0325
					OTROS INDIRECTOS %			
					COSTO TOTAL DEL RUBRO			100,1623
					VALOR OFERTADO			\$ 100,16
La libertad, 10 de Julio 2023,								
Realizado Por:				Gonzalez Ramirez Jorge Davie y Villón Salinas Lucia Belen				
Revisado por:				Ing. Alejandro Veliz Aguayo PhD. / Ing. Richard Ramirez Palma MSc.				



Anexo 18

Análisis de precio unitario para hormigón celular patrón con densidad de 800 kg/m³ – MP D800

		UNIVERSIDAD ESTATAL PENINSULA DE SANTA ELENA FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERIA INGENIERÍA CIVIL					
TEMA: DISEÑO DE HORMIGÓN CELULAR CON CEMENTO HÍBRIDO ALCALINO A BASE DE ZEOLITA DE LA CANTERA ISIDRO AYORA Y ESPUMANTE RV-2020 CON DENSIDADES DE 600 Y 800 KG/M ³							
TESISISTAS: GONZÁLEZ RAMÍREZ JORGE DAVIE Y VILLÓN SALINAS LUCIA BELEN TUTOR: ALEJANDRO CRISOSTOMO VELIZ AGUAYO, PhD.							
ANALISIS DE PRECIOS UNITARIOS							
RUBRO:	4,00	UNIDAD:	m ³				
DETALLE:	HORMIGÓN CELULAR Patron densidad de 800 Kg/m ³ (MP D800)						
EQUIPOS							
DESCRIPCION	CANTIDAD	TARIFA	COSTO HORA	RENDIMIENTO	COSTO		
	A	B	C=A*B	R	D=C*R		
Herramienta menor (5% MO)					0,2788		
Maquina generadora de espuma	1,000	2,1450	2,1450	0,5000	1,0730		
Batidora manual	1,000	1,2500	1,2500	0,20000	0,250		
SUBTOTAL M =					1,6018		
MANO DE OBRA							
DESCRIPCION	CANTIDAD	JORNAL /HR	COSTO HORA	RENDIMIENTO	COSTO		
(CATEGORIAS)	A	B	C=A*B	R	D=C*R		
Peon (estr.ocp. E2)	3,000	3,6200	10,8600	0,3000	3,2580		
Maestro (estr.ocp. C1)	1,000	4,0600	4,0600	0,0300	0,1218		
Albañil (estr.ocp. D2)	2,000	3,6600	7,3200	0,3000	2,1960		
SUBTOTAL N =					5,5758		
MATERIALES							
DESCRIPCION		UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNIT.	COSTO		
			A	B	C=A*B		
Cemento HE Saco 50 Kg		Saco	10,760	8,4000	90,3840		
Agua		m ³	0,269	1,0800	0,2905		
Espuma Rv		Lt	560,206	0,0049	2,7261		
SUBTOTAL O =					93,4007		
TRANSPORTE							
DESCRIPCION		UNIDAD	CANTIDAD	TARIFA	COSTO		
			A	B	C=A*B		
SUBTOTAL P =					0,0000		
					TOTAL COSTO DIRECTOS X=(M+N+O+P)		100,5783
					INDIRECTOS Y UTILIDAD		25,00%
					OTROS INDIRECTOS		%
					COSTO TOTAL DEL RUBRO		125,7229
					VALOR OFERTADO		\$ 125,72
La libertad, 10 de Julio 2023,							
Realizado Por:		Gonzalez Ramirez Jorge Davie y Villón Salinas Lucia Belen					
Revisado por:		Ing. Alejandro Veliz Aguayo PhD. / Ing. Richard Ramirez Palma MSc.					



Anexo 19

Análisis de precio unitario para hormigón celular con zeolita sin activar densidad de 800 kg/m³ – MP.1 D800

		UNIVERSIDAD ESTATAL PENINSULA DE SANTA ELENA FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERIA INGENIERÍA CIVIL					
TEMA: DISEÑO DE HORMIGÓN CELULAR CON CEMENTO HÍBRIDO ALCALINO A BASE DE ZEOLITA DE LA CANTERA ISIDRO AYORA Y ESPUMANTE RV-2020 CON DENSIDADES DE 600 Y 800 KG/M³							
TESISTAS: GONZÁLEZ RAMÍREZ JORGE DAVIE Y VILLÓN SALINAS LUCIA BELEN TUTOR: ALEJANDRO CRISOSTOMO VELIZ AGUAYO, PhD.							
ANALISIS DE PRECIOS UNITARIOS							
RUBRO:	5,00	UNIDAD:	m ³				
DETALLE:	HORMIGÓN CELULAR CON zeolita sin activar de 800 Kg/m ³ (MP.1 D800)						
EQUIPOS							
DESCRIPCION	CANTIDAD	TARIFA	COSTO HORA	RENDIMIENTO	COSTO		
	A	B	C=A*B	R	D=C*R		
Herramienta menor (5% MO)					0,2788		
Maquina generadora de espuma	1,000	2,1450	2,1450	0,5000	1,0730		
Batidora manual	1,000	1,2500	1,2500	0,20000	0,250		
SUBTOTAL M =					1,6018		
MANO DE OBRA							
DESCRIPCION	CANTIDAD	JORNAL /HR	COSTO HORA	RENDIMIENTO	COSTO		
(CATEGORIAS)	A	B	C=A*B	R	D=C*R		
Peon (estr.ocp. E2)	3,000	3,6200	10,8600	0,3000	3,2580		
Maestro (estr.ocp. C1)	1,000	4,0600	4,0600	0,0300	0,1218		
Albañil (estr.ocp. D2)	2,000	3,6600	7,3200	0,3000	2,1960		
SUBTOTAL N =					5,5758		
MATERIALES							
DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNIT.	COSTO			
		A	B	C=A*B			
Cemento HE Saco 50 Kg	saco	5,400	8,4000	45,3600			
Agua	m ³	0,270	1,0800	0,2916			
Espuma Rv	Lt	529,392	0,0049	2,5762			
Zeolita malla N° 325 saco 25kg	saco	10,800	3,2000	34,5600			
SUBTOTAL O =					82,7878		
TRANSPORTE							
DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	TARIFA	COSTO			
		A	B	C=A*B			
SUBTOTAL P =					0,0000		
TOTAL COSTO DIRECTOS X=(M+N+O+P)					89,9654		
INDIRECTOS Y UTILIDAD				25,00%	22,4914		
OTROS INDIRECTOS				%			
COSTO TOTAL DEL RUBRO					112,4568		
VALOR OFERTADO				\$	112,46		
La libertad, 10 de Julio 2023,							
Realizado Por:		Gonzalez Ramirez Jorge Davie y Villón Salinas Lucia Belen					
Revisado por:		Ing. Alejandro Veliz Aguayo PhD. / Ing. Richard Ramirez Palma MSc.					

Anexo 20

Análisis de precio unitario para hormigón celular con cemento alcalino 70% cemento y 30% zeolita de 800 kg/m³ – M6 D800

		UNIVERSIDAD ESTATAL PENINSULA DE SANTA ELENA FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERIA INGENIERÍA CIVIL					
TEMA: DISEÑO DE HORMIGÓN CELULAR CON CEMENTO HÍBRIDO ALCALINO A BASE DE ZEOLITA DE LA CANTERA ISIDRO AYORA Y ESPUMANTE RV-2020 CON DENSIDADES DE 600 Y 800 KG/M ³							
TESISTAS: GONZÁLEZ RAMÍREZ JORGE DAVIE Y VILLÓN SALINAS LUCIA BELEN TUTOR: ALEJANDRO CRISOSTOMO VELIZ AGUAYO, PhD.							
ANALISIS DE PRECIOS UNITARIOS							
RUBRO:	6,00	UNIDAD:	m ³				
DETALLE:	HORMIGÓN CELULAR con cemento hibrido alcalino 70% cemento y 30% zeolita de 800 Kg/m ³ (M6 D800)						
EQUIPOS							
DESCRIPCION	CANTIDAD	TARIFA	COSTO HORA	RENDIMIENTO	COSTO		
	A	B	C=A*B	R	D=C*R		
Herramienta menor (5% MO)					0,2788		
Maquina generadora de espuma	1,000	2,1450	2,1450	0,5000	1,0730		
Batidora manual	1,000	1,2500	1,2500	0,20000	0,250		
SUBTOTAL M=					1,6018		
MANO DE OBRA							
DESCRIPCION	CANTIDAD	JORNAL /HR	COSTO HORA	RENDIMIENTO	COSTO		
(CATEGORIAS)	A	B	C=A*B	R	D=C*R		
Peon (estr.ocp. E2)	3,000	3,6200	10,8600	0,3000	3,2580		
Maestro (estr.ocp. C1)	1,000	4,0600	4,0600	0,0300	0,1218		
Albañil (estr.ocp. D2)	2,000	3,6600	7,3200	0,3000	2,1960		
SUBTOTAL N=					5,5758		
MATERIALES							
DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	PRECIO UNIT.	COSTO			
		A	B	C=A*B			
Cemento He Saco 50 Kg	saco	6,920	8,4000	58,1280			
Agua	m ³	0,247	1,0800	0,2668			
Espuma Rv	Lt	531,560	0,0050	2,6794			
Zeolita malla N° 325 saco 25kg	saco	5,931	3,2000	18,9806			
Solución activadora Hidroxido de sodio + silicato de sodio	kg	66,729	0,2660	17,7470			
SUBTOTAL O=				97,8017			
TRANSPORTE							
DESCRIPCION	UNIDAD	CANTIDAD	TARIFA	COSTO			
		A	B	C=A*B			
SUBTOTAL P=				0,0000			
TOTAL COSTO DIRECTOS X=(M+N+O+P)					104,9793		
INDIRECTOS Y UTILIDAD					25,00%	26,2448	
OTROS INDIRECTOS					%		
COSTO TOTAL DEL RUBRO					131,2241		
VALOR OFERTADO					\$	131,22	
La libertad, 10 de Julio 2023,							
Realizado Por:		Gonzalez Ramirez Jorge Davie y Villón Salinas Lucia Belen					
Revisado por:		Ing. Alejandro Veliz Aguayo PhD. / Ing. Richard Ramirez Palma MSc.					





Anexo 21

Registro fotográfico – Ensayo a compresión.

	UNIVERSIDAD ESTATAL PENINSULA DE SANTA ELENA FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERIA INGENIERÍA CIVIL		
TEMA: DISEÑO DE HORMIGÓN CELULAR CON CEMENTO HÍBRIDO ALCALINO A BASE DE ZEOLITA DE LA CANTERA ISIDRO AYORA Y ESPUMANTE RV-2020 CON DENSIDADES DE 600 Y 800 KG/M ³			
TESISTAS: GONZÁLEZ RAMÍREZ JORGE DAVIE Y VILLÓN SALINAS LUCIA BELEN TUTOR: ALEJANDRO CRISOSTOMO VELIZ AGUAYO, PhD.			
ENSAYO A COMPRESIÓN			
			
			
			

Anexo 22

Registro fotográfico – HC después de rotura y vista microscópica.

	<p>UNIVERSIDAD ESTATAL PENINSULA DE SANTA ELENA FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERIA INGENIERÍA CIVIL</p>	
<p>TEMA: DISEÑO DE HORMIGÓN CELULAR CON CEMENTO HÍBRIDO ALCALINO A BASE DE ZEOLITA DE LA CANTERA ISIDRO AYORA Y ESPUMANTE RV-2020 CON DENSIDADES DE 600 Y 800 KG/M³</p>		
<p>TESISTAS: GONZÁLEZ RAMÍREZ JORGE DAVIE Y VILLÓN SALINAS LUCIA BELEN TUTOR: ALEJANDRO CRISOSTOMO VELIZ AGUAYO, PhD.</p>		
<p>HORMIGÓN CELULAR DESPUÉS DE ROTURA</p>		
		
<p>VISTA MICROSCÓPICA</p>		
