



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**DEPARTAMENTO INGENIERÍA MECÁNICA**



**Estudio experimental de las propiedades mecánicas del concreto con conchas marinas como reemplazo parcial del cemento**

POR

**Benjamín Sebastián Muñoz Toro**

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para optar al título profesional de Ingeniero Civil Mecánico

Profesora Guía:  
PhD. Meylí Valin Fernández  
Profesor co-Guía  
PhD. Luis Merino Q.

Enero 2024  
Concepción (Chile)

© 2024 Benjamín Sebastián Muñoz Toro

© 2024 Benjamín Sebastián Muñoz Toro

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

## Agradecimientos

En primer lugar, expreso mi gratitud a mi profesora guía, la Doctora Meylí Valin, por su buena voluntad, sus correcciones y por ser la persona que me apoyó desde el primer momento en el que le comenté sobre realizar esta Memoria de Título.

A los integrantes Laboratorio de Hormigones de Ingeniería Civil, especialmente a Don Carlos Bustos, el profesor Luis Merino, y a Beto y Seba, quienes me brindaron parte de su conocimiento cada vez que lo necesité. Asimismo, agradezco a don Ricardo Roa del laboratorio de Flotación del DIMET, quién como el Laboratorio de Hormigones, me facilitó las instalaciones para poder llevar a cabo este proyecto.

Quiero reconocer al equipo de Operaciones de Aclara, en especial a Denis de la Fuente, quien me guió y me brindó enseñanzas valiosas no solo en el ámbito de la Ingeniería, sino también en la vida misma.

A los profesores del DIM, con quienes me nutrí de una manera inconmensurable. Les deseo lo mejor en cada uno de sus caminos académicos y personales.

Agradezco profundamente a mi madre Jacqueline y mi padre Rigoberto, por brindarme la oportunidad de enfocarme únicamente en estudiar, por llevar todos los días un plato de comida a la mesa y permitirme estudiar sin otras preocupaciones. Soy consciente de que soy un privilegiado de tenerlos a mi lado acompañando en cada paso, sea avanzando o retrocediendo, esto es todo gracias a ustedes.

A mis hermanos, Héctor y Pía, les agradezco por estar siempre dispuestos a escuchar y ofrecer las palabras necesarias en los momentos difíciles. A mis sobrinos; Fernando, Amanda, Olivia, Nicolás (Q.E.P.D) y Laura que viene en camino, son mucho más importantes de lo que logran dimensionar, espero algún día poder devolver todo lo que junto a sus familias han hecho por mí.

A mis dos perritas; Pelu (Q.E.P.D) y Nala, agradezco su compañía y amor incondicional durante mis largas noches de estudio.

A mis compañeros de carrera, Ignacio, Vicente, Eimol, Caniu, Álvaro, Pablo y Cristóbal, agradezco la colaboración y los lazos formados, que espero perduren a lo largo del tiempo. Además, a mis compañeros de Ingeniería Civil Química, con quienes compartí eternas tardes/noches de estudios durante los primeros 2 años.

A mi abuelo Héctor y mi tía/madrina Gloria, quienes perdí durante este camino, estoy seguro de que estarían orgullosos del profesional que me convierto luego de este proyecto.

A la selección de fútbol de la UdeC, hicieron que me reencante con este hermoso deporte, y me volvió a unir a viejos amigos. En especial a mis amigos; Gonzalo, Matías, Evangelo, Yerko, quienes este último tiempo se han convertido en mis verdaderos hermanos.

A mi pareja Paz, mi cómplice, la persona más generosa y bondadosa que conozco, agradeceré eternamente a la Universidad y a esta carrera darme la oportunidad de conocernos, de acompañarnos y de amarnos. Nada de esto hubiera sido posible sin tu compañía.

*Esta memoria está dedicada a mis hermanos y sobrinos, a Paz y sobre todo a mis padres, quienes hicieron todo lo posible por darme las mejores herramientas para enfrentar este camino.*

*Los amo.*

## Resumen

A nivel global, las industrias cementeras se encuentran dentro de las principales generadoras de  $CO_2$  y contribuyen un gran porcentaje de las emisiones mundiales de  $CO_2$ . Por consiguiente, encontrar un reemplazo de cemento que presente una huella ambiental reducida es fundamental, debido a que la producción convencional de cemento Portland está asociado a considerables emisiones de gases de efecto invernadero.

En este estudio se aborda la exploración del reemplazo parcial de cemento en probetas de mortero, utilizando conchas marinas trituradas y tamizadas con malla #175. Los porcentajes de reemplazo evaluados fueron del 5% y 10%, empleando conchas marinas provenientes del puerto de Talcahuano, tanto calcinadas como no calcinadas. La calcinación se realizó a 850 °C en una mufla convencional.

Los porcentajes de sustitución seleccionados fueron cuidadosamente elegidos con base en la revisión del estado del arte, la cual indica resultados favorables en términos de resistencia mecánica. La validez de los resultados se verifica a través de dos pruebas fundamentales: ensayo de flexotracción y compresión, utilizando los métodos previamente empleados en recientes investigaciones y siguiendo las normativas chilenas.

Estas pruebas se ejecutan en 4 edades de ensayo distintas, 3, 7, 14 y 28 días, con el objetivo de evaluar el comportamiento a edades tempranas y comparar con los resultados revisados en el estado del arte.

Los resultados de la resistencia a la compresión para las muestras que incorporan residuo calcinado con reemplazo parcial de cemento del 5% y 10% representan el 83,69% y 78,27%, respectivamente, del promedio de la resistencia alcanzada por la muestra patrón (20,97 [MPa]). En cuanto a la resistencia a la tracción, estas muestras alcanzan resistencias promedio del 104,31% y 104,04% de resistencia obtenida por la muestra patrón (12,12 [MPa]).

Para el caso de las muestras sin calcinar, los reemplazos del 5% y 10% alcanzan un 103,55% y 102,64% de la resistencia a la tracción obtenida por la muestra patrón (15,54 [MPa]), mientras que para la resistencia a la compresión se alcanzan el 92,32% y 80,07% de la resistencia alcanzada por la muestra patrón (27,81 [MPa]).

Para las resistencias a la compresión, las desviaciones estándar rectifican que la muestra patrón tiene una mayor resistencia que las muestras con reemplazo, a excepción de la muestra sin calcinar con 5%, cuyo rango de dispersión de los datos llega a coincidir con los de la muestra patrón. Por otro lado, para los ensayos de flexotracción, aunque el promedio indica una ventaja de los reemplazos, el rango generado con la dispersión de datos coincide en gran parte con los de la muestra patrón.

Este estudio aspira a posicionarse como una investigación relevante al examinar cómo el reemplazo parcial de cemento con conchas marinas afecta las propiedades mecánicas del mortero. Los resultados finales se anticipan como contribuciones valiosas para la industria de la construcción.

**Palabras claves: Mortero, reemplazo parcial de cemento, conchas marinas, resistencia a la compresión, resistencia a la tracción.**

## Abstract

Globally, cement industries are among the main generators of  $CO_2$  and contribute a large percentage of global  $CO_2$  emissions. Therefore, finding a cement replacement that presents a reduced environmental footprint is critical, because conventional Portland cement production is associated with considerable greenhouse gas emissions.

This study explores the exploration of the partial replacement of cement in mortar specimens, using crushed seashells screened with mesh #175. The replacement percentages evaluated were 5% and 10%, using seashells from the port of Talcahuano, both calcined and uncalcined. Calcination was carried out at 850 °C in a conventional muffle.

The substitution percentages selected were carefully chosen based on the review of the state of the art, which indicates favorable results in terms of mechanical strength. The validity of the results is verified through two fundamental tests: flexural and compression tests, using the methods previously used in recent research and following Chilean regulations.

These tests are performed at 4 different test ages, 3, 7, 14 and 28 days, in order to evaluate the behavior at early ages and compare with the results reviewed in the state of the art.

The compressive strength results for the samples incorporating calcined residue with partial cement replacement of 5% and 10% represent 83.69% and 78.27%, respectively, of the average strength achieved by the standard sample (20.97 [MPa]). As for the tensile strength, these samples reach average strengths of 104.31% and 104.04% of the strength obtained by the standard sample (12.12 [MPa]).

In the case of the uncalcined samples, the 5% and 10% replacements reach 103.55% and 102.64% of the tensile strength obtained by the standard sample (15.54 [MPa]), while for the compressive strength they reach 92.32% and 80.07% of the strength achieved by the standard sample (27.81 [MPa]).

For the compressive strengths, the standard deviations rectify that the standard sample has a higher strength than the samples with replacement, except for the uncalcined sample with 5%, whose range of dispersion of the data coincides with those of the standard sample. On the other hand, for the flexural tests, although the average indicates an advantage of the replacements, the range generated with the data dispersion coincides to a large extent with those of the standard sample. This study aims to position itself as a relevant research by examining how the partial replacement of cement with marine shells affects the mechanical properties of the mortar. The final results are anticipated to be valuable contributions to the construction industry.

**Keywords: Mortar, partial replacement of cement, seashells, compressive strength, tensile strength.**

## Tabla de Contenidos

Resumen .....	iv
Abstract .....	v
Tabla de Contenidos .....	vi
Lista de Tablas .....	viii
Lista de Figuras .....	ix
Glosario .....	x
<b>1 CAPÍTULO 1: Introducción.....</b>	<b>1</b>
1.1 Contexto.....	1
1.2 Planteamiento del problema .....	3
1.3 Objetivos.....	3
1.4 Hipótesis .....	4
1.5 Metodología.....	4
1.6 Carta Gantt.....	5
<b>2 Capítulo 2: Marco Teórico .....</b>	<b>6</b>
2.1 Mortero .....	6
2.2 Ensayos y normativa.....	6
2.3 Confección de probetas .....	7
2.4 Curado de probetas .....	7
2.5 Desmolde de probetas.....	7
2.6 Clasificación por grados de resistencia a compresión .....	7
2.7 Ensayo .....	8
<b>3 Capítulo 3: Estado del arte .....</b>	<b>13</b>
3.1 Reemplazo parcial de cemento.....	13
3.2 Reemplazo parcial de cemento con conchas marinas.....	13
<b>4 Capítulo 4: Metodología.....</b>	<b>16</b>
4.1 Materiales .....	16
4.2 Dosificación.....	21
4.3 Confección.....	21
4.4 Ensayos .....	24

5 Capítulo 5: Resultados .....	26
5.1 Cono de Abrams .....	26
5.2 Resistencia a la tracción .....	27
5.3 Resistencia a la compresión.....	29
Con respecto a la resistencia a la compresión: .....	29
6 Capítulo 6: Análisis económico .....	32
7 Capítulo 7: Conclusiones .....	34
Referencias .....	35
Anexo A: Resultados de ensayo de flexo tracción.....	38

## Lista de Tablas

<b>Tabla 1.1: Tipos de conchas marinas utilizados como reemplazo del cemento [8].</b> .....	2
<b>Tabla 1.2: Propiedades físicas de las conchas marinas por estudios previos [8].</b> .....	3
<b>Tabla 1.3: Carta Gantt.</b> .....	5
<b>Tabla 2.1: Referencias normativas [28].</b> .....	6
<b>Tabla 2.2: Grados de morteros según resistencia especificada <math>f_p</math> de compresión a 28 días [28]</b> .....	8
<b>Tabla 2.3 Placas de presión.</b> .....	12
<b>Tabla 3.1 Investigaciones sobre el reemplazo de cemento con conchas marinas.</b> .....	14
<b>Tabla 4.1 Propiedades físicas Arenas BíoBio.</b> .....	16
<b>Tabla 4.2: Dosificación de mortero.</b> .....	21
<b>Tabla 4.3: Dosificación por colada para las conchas, previo a la corrección del árido por el contenido de humedad.</b> .....	21
<b>Tabla 4.4 Dosificación por colada para las conchas sin calcinar, posterior a la corrección del árido por el contenido de humedad.</b> .....	22
<b>Tabla 4.5 Dosificación por colada para las conchas calcinadas, posterior a la corrección del árido por el contenido de humedad.</b> .....	22
<b>Tabla 5.1 Resultados de Cono de Abrams.</b> .....	26
<b>Tabla 5.2 Asentamiento del cono de Abrams para hormigón [37]</b> .....	26
<b>Tabla 5.3 Resultados de ensayos de flexo-tracción.</b> .....	27
<b>Tabla 5.4: Resultados de ensayos de compresión.</b> .....	29
<b>Tabla 6.1: Valores de referencia.</b> .....	32
<b>Tabla 6.2: Valores de dosificación en mezcla de 1 [m3].</b> .....	32

## Lista de Figuras

<b>Figura 2.1 Medida de asentamiento [37]</b> .....	9
<b>Figura 2.2 Formas de asentamiento. [37]</b> .....	9
<b>Figura 2.3 Dispositivo de carga de probetas (dos puntos de carga) [38]</b> .....	10
<b>Figura 2.4 Dispositivo de carga de probetas (punto central de carga) [38]</b> .....	11
<b>Figura 2.5 Disposición de la probeta para el ensayo de compresión. [30]</b> .....	12
<b>Figura 3.1 Resistencia a la compresión v/s porcentaje de reemplazo de cemento.</b> .....	15
<b>Figura 4.1: Proceso de secado de las conchas: a) Conchas en el horno. b) Condiciones de operación del horno.</b> .....	17
<b>Figura 4.2: Condiciones de operación de la molienda.</b> .....	18
<b>Figura 4.3: Imágenes de partículas menores a 90 [μm].</b> .....	18
<b>Figura 4.4 Mufla convencional.</b> .....	19
<b>Figura 4.5 Temperatura de calcinación.</b> .....	19
<b>Figura 4.6 Perfil de temperaturas.</b> .....	20
<b>Figura 4.7 Conchas calcinadas.</b> .....	20
<b>Figura 4.8 Confección de mezcla.</b> .....	22
<b>Figura 4.9 Mesa de vibrado LH 13.00.</b> .....	23
<b>Figura 4.10 Cono de Abrams para mezcla sin reemplazo.</b> .....	23
<b>Figura 4.11 Probetas en cámara de curado</b> .....	24
<b>Figura 4.12 Probeta de 5% de reemplazo ensayada.</b> .....	25
<b>Figura 4.13 Ensayo de compresión a probeta.</b> .....	25
<b>Figura 5.1 Resumen de resultados de la resistencia a la tracción: a) Muestra sin calcinar. b) Muestra calcinada.</b> .....	28
<b>Figura 5.2 Resumen de resultados de resistencia a la compresión: a) Muestra sin calcinar. b) Muestra calcinada.</b> .....	30
<b>Figura 5.3 Resistencias en comparación con la resistencia obtenida por el patrón: a) en tracción b) en compresión.</b> .....	31
<b>Figura 6.1: Ahorro con respecto a mezcla patrón.</b> .....	33

## Glosario

OPC	:	Cemento Portland Ordinario.
DRX	:	Difracción con rayos x.
FRX	:	Fluorescencia con rayos x.
ATG	:	Análisis termogravimétrico
PSD	:	Distribución de tamaño de partícula
BET	:	Teoría de Brunauer-Emmett-Teller
MPa	:	Megapascales
Mm	:	milímetro
Kgf	:	Kilogramos fuerza
kWh	:	Kilowatt hora
MRC - 00	:	Muestra con reemplazo de 0%
MRC - 05	:	Muestra con reemplazo de 5%
MRC - 10	:	Muestra con reemplazo de 10%
MRC - 00	:	Muestra con reemplazo calcinado de 0%
MRC - 05	:	Muestra con reemplazo calcinado de 5%
MRC - 10	:	Muestra con reemplazo calcinado de 10%

símbolos

μ: micra

## CAPÍTULO 1: Introducción

### 1.1 Contexto

Debido al progreso en el área de la construcción y a la constante expansión de la urbanización, el uso de hormigón ha experimentado un incremento notable. Este aumento en su utilización se debe a que el hormigón desempeña un rol esencial en numerosas estructuras que definen el entorno global y dentro de sus componentes, uno fundamental en su fabricación es el cemento [1].

Distintos estudios afirman que para producir 1000 kg de cemento se liberan 900 kg de  $CO_2$  a la atmósfera [2]. Por consiguiente, resulta urgente encontrar un reemplazante del cemento con el propósito de disminuir las emisiones asociadas a su producción. A nivel global, las industrias cementeras se encuentran dentro de las principales generadoras de  $CO_2$  y contribuyen al 8% de las emisiones mundiales de  $CO_2$  [3]. Esta inquietud es uno de los motivos principales que impulsan la búsqueda de alternativas para sustituir este material de construcción tan importante, manteniendo un menor impacto ambiental.

Se han encontrado materiales cementosos suplementarios en los últimos años, los cinco más utilizados son; cenizas volantes de carbón, humo de sílice, escoria granulada molida de alto horno, el polvo de piedra caliza y el metacaolín. La sustitución parcial de cemento por una cantidad adecuada de humo de sílice y metacaolín acelera la hidratación de los materiales a base de cemento. Por otro lado, el polvo de piedra caliza y la escoria granulada molida posee ventajas en características ambientales y económicas, con respecto al metacaolín y el humo de sílice [4].

Z. Syahida Adnan, estudia el uso de ceniza de cáscara de arroz como material de reemplazo parcial de cemento, obteniendo resultados alentadores, debido a que la resistencia aumenta o es equivalente con respecto al concreto normal, con un reemplazo máximo de 5% al 15%, ya que luego de eso, la resistencia del concreto tiende a disminuir [5].

C. Rahul Rollakanti, concluye a partir de resultados experimentales que la resistencia máxima a la compresión de un reemplazo parcial de un 10% de cemento por ceniza de madera y conchas marinas aumenta un 15,26% con respecto al concreto de la misma edad. Además, se alcanza un notable incremento del 12,5% en la resistencia durante la evaluación de tracción dividida. En términos de resistencia a la flexión, se observa un aumento de 7,56%, en comparación con el concreto convencional [1].

Las conchas marinas vacías se encuentran en la orilla y pueden ser utilizadas como reemplazo parcial de agregado grueso y cemento en el concreto. Un estudio centrado en el efecto del polvo y agregado con respecto a la resistencia a la compresión y tracción sugiere que el reemplazo de cemento por 5% de polvo de concha marina y 10% de agregado grueso es la proporción óptima comparada con una muestra de mezcla de control grado M25. La proporción de la mezcla es obtenida del procedimiento de diseño de mezcla según IS 10262: 2009. Las conchas fueron trituradas en polvo de concha marina utilizando una trituradora de piedra para que puedan pasar el tamaño del tamiz de 2,36 [mm]. El polvo

que pasa a través del tamaño de tamiz de 90 [ $\mu\text{m}$ ] fue utilizado para reemplazo de OPC en el concreto [6].

El uso de conchas marinas en la construcción no solo significa ventajas en términos de construcción, sino que también aporta en abordar un problema ambiental urgente. El vertido ilegal de conchas marinas en vertederos y áreas abiertas sin tratamiento conduce a liberación de gases dañinos como  $\text{NH}_3$  y  $\text{H}_2\text{S}$  a la atmósfera [7].

Gracias a esto, la incorporación de conchas marinas en la construcción entrega una solución beneficiosa para ambos problemas. Al darle una segunda vida útil como parte del concreto, se evita el vertido ilegal y sus impactos negativos en el medioambiente. Por otro lado, al reemplazar el cemento con un elemento natural y abundante, puede disminuirse el impacto de  $\text{CO}_2$  que conlleva la producción de cemento.

A continuación, en la Tabla 1.1 se presentan estudios que han investigado sobre conchas marinas que reemplazan de manera parcial el cemento.

**Tabla 1.1: Tipos de conchas marinas utilizados como reemplazo del cemento [8].**

Referencia	Año	País	Tipo de concha
Kong et al., [9]	2022	China	Concha de ostra
Nasaeng et al., [10]	2022	Tailandia	Concha de ostra
Sangeetha et al., [6]	2022	India	Conchas
Hasnaoui et al., [11]	2022	Francia	Vieira reina
Hasnaoui et al., [12]	2021	Francia	Vieira reina
Rollakanti et al., [1]	2021	Omán	Conchas
Bamigboye et al., [13]	2021	Nigeria	Conchas
Uddin et al., [14]	2021	Estados Unidos	Concha de ostra
Wang and Liu [15]	2020	UAE	Conchas
Tayeh et al., [16]	2020	Palestina	Concha
Janković et al., [17]	2020	Serbia	Conchas de moluscos
Wang et al., [18]	2019	UAE	Conchas
Soltanzadeh et al., [19]	2018	Portugal	Conchas
Olivia et al., [20]	2017	Indonesia	Conchas de berberecho
Abinaya and Venkatesh [21]	2016	India	Ostra
Dankwah and Nkrumah [22]	2016	Ghana	Concha de caracol
Nordin et al., [23]	2015	Malasia	Berberecho de sangre
Olivia et al., [24]	2015	Indonesia	Berberecho de sangre

Por otro lado, en la Tabla 1.2, se presenta un resumen de las propiedades físicas de las conchas marinas revisadas de la literatura. Se puede observar que el tamaño de partícula utilizado en estos estudios es menor a los 90 [ $\mu\text{m}$ ].

**Tabla 1.2: Propiedades físicas de las conchas marinas por estudios previos [8].**

<b>Referencia</b>	<b>Tipo de concha marina</b>	<b>Tamaño de partícula <math>\mu\text{m}</math></b>	<b>Gravedad específica</b>	<b>Superficie específica (<math>\text{cm}^2/\text{g}</math>)</b>
Sangeetha et al., [6]	Polvo de concha marina	<90	2,27	3870
Tayeh et al, [16]	Ceniza de concha marina	7,96	2,18	4870
Nguyen et al., [25]	Vieira reina	80	2,49	1190
Nguyen et al., [25]	Vieira	80	2,52	1078
Lertwattanakul et al., [26]	Mejillón verde	<75	2,86	6186
Lertwattanakul et al., [26]	Concha de berberecho	<75	2,82	8299
Rollakanti et al., [1]	Conchas	<75	2,82	---

## **1.2 Planteamiento del problema**

Este desafío surge principalmente de la necesidad de encontrar alternativas de cemento más amigables con el medio ambiente, en vista del constante aumento de la urbanización y la actividad constructiva. A esto se suma la oportunidad de aprovechar las conchas marinas (residuo marino).

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo general**

El objetivo principal es realizar una caracterización de las propiedades mecánicas del concreto con conchas marinas calcinadas y sin calcinar, como sustituto parcial del cemento.

### **1.3.2 Objetivos específicos**

Diseñar distintas mezclas de concreto con incorporación de conchas marinas calcinadas y sin calcinar, en distintas proporciones como reemplazo parcial de cemento.

Caracterizar las propiedades físicas de las conchas marinas calcinadas y sin calcinar.

Realizar pruebas de resistencia mecánica, incluyendo compresión y flexotracción, a muestras de concreto con diferentes porcentajes de reemplazo de cemento por conchas marinas, comparando los resultados con un concreto de referencia sin reemplazo.

Analizar el comportamiento mecánico de las conchas marinas como un potencial reemplazo de cemento.

## **1.4 Hipótesis**

La sustitución parcial del cemento por conchas marinas se ve reflejado en cambios significativos en las propiedades mecánicas del cemento.

## **1.5 Metodología**

Revisión bibliográfica: Se realizará una revisión bibliográfica con el fin de recopilar información de investigaciones basadas en el remplazo parcial del cemento. Se centrará en estudios del comportamiento de las conchas marinas.

Determinar el tamaño de partícula y proporción de las conchas como reemplazo parcial de cemento: En base a lo estudiado en la revisión bibliográfica se determinará el tamaño de partícula y las proporciones de reemplazo parcial de cemento que han tenido éxito en estudios e investigaciones anteriores.

Cono de Abrams: Se realiza en estado fresco de la mezcla, este parámetro es utilizado en la industria de la construcción para medir el efecto de la incorporación de esta mezcla en la reología de la mezcla.

Fabricación de las probetas: Para realizar los ensayos se deben fabricar las probetas, las cuales se fabricarán en el laboratorio de hormigones de la Universidad de Concepción.

Realizar ensayos de compresión y flexotracción del concreto con las proporciones de materiales de reemplazo parcial de cemento: Se realizarán ensayos para caracterizar mecánicamente el concreto con reemplazo parcial de cemento.

Análisis de los resultados experimentales: Se analizará el comportamiento mecánico de las probetas y se compararán con las investigaciones anteriormente estudiadas, además de la muestra de control.

## 1.6 Carta Gantt

Se presenta en la Tabla 1.3 se presenta la planificación de la investigación.

**Tabla 1.3: Carta Gantt**

RESULTADO	OBJETIVOS	ACTIVIDADES	HITO	INICIO DE LA ACTIVIDAD	DURACIÓN DE LA ACTIVIDAD (semanas)	LOGRO DE HITO	SEMANAS																		
							1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
<b>Resultado 1: Definir alcance del proyecto</b>	Objetivo 1.- Diseñar distintas mezclas de concreto con incorporación de conchas marinas y arcilla en distintas proporciones como reemplazo parcial de cemento.	1.- Planteamiento del problema	Hito 1 - Elección de porcentajes de material de reemplazo parcial de concreto	1	4	5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
		2.- Revisión bibliográfica		1	4		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
		3.- Comparación de resultados de estudios anteriores		4	1		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
		4.- Selección de porcentajes de los reemplazos parciales de cemento		4	2		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
<b>Resultado 2: Conocer los elementos predominantes</b>	Objetivo 2.- Caracterización de las propiedades físicas y químicas de las conchas marinas y arcilla agotada del proceso de extracción de tierras raras.	1.- Determinar composición química	Hito 2 - Caracterizar las propiedades de los reemplazantes	5	2	8	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
		2.- Medición del tamaño de partícula de las conchas marinas y la arcilla calcinada		5	3		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
		3.- Composición química del cemento		5	1		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
<b>Resultado 3: Conocer el comportamiento de la arcilla y conchas marinas como reemplazo de cemento</b>	Objetivo 3.- Realizar pruebas de resistencia mecánica, incluyendo compresión, flexo-tracción, y trabajabilidad a muestras de concreto con diferentes porcentajes de reemplazo de cemento por conchas marinas y arcilla, comparando los resultados con un concreto de referencia sin reemplazo.	1.- Preparación de las conchas marinas y arcilla	Hito 3 - Preparación de las probetas	5	3	13	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
		2.- Fabricación de las probetas		8	2		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
		3.- Realizar ensayos a los 7 días	Hito 4 - Realización de ensayos	9	2	17	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
		3.- Realizar ensayos a los 28 días		11	2		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
<b>Resultado 4: Verificación de la hipótesis</b>	Objetivo 4.- Analizar el comportamiento mecánico de la arcilla y las conchas marinas como un potencial reemplazo de cemento	1.- Análisis de resultados experimentales	Hito 5 - Verificación de hipótesis	10	5	18	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
		2.- Comparación con concreto puro y con el comportamiento de reemplazos existentes		15	2		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19

## Capítulo 2: Marco Teórico

### 2.1 Mortero

El mortero es una mezcla constituida por cemento, arena y eventualmente otro material conglomerante que con adición de agua reacciona y adquiere resistencia. También puede tener algún otro producto para mejorar sus propiedades siempre que cumpla los requisitos según su uso [28].

### 2.2 Ensayos y normativa

Dentro del marco teórico, es esencial sumergirse en un elemento fundamental de la evaluación de materiales de construcción, específicamente la caracterización de las propiedades mecánicas de los morteros de cemento. Este capítulo se centra en un aspecto crítico de esta caracterización: los ensayos de compresión y flexotracción en las probetas y explora las normas que rigen estos procedimientos.

Este apartado del marco teórico se enfoca en la descripción de ensayos y en una revisión minuciosa de normas que instruyen su ejecución. Estas normativas ofrecen lineamientos específicos que aseguran la coherencia y precisión de los datos recolectados, lo que facilita la comparación y el análisis con diversas investigaciones.

Es importante destacar que los morteros pueden ser clasificados por grados de resistencia a compresión, tipos de consistencia, por retentividad y por otras características. Cada uno de estos aspectos es relevante al momento de evaluar y aplicar estos materiales de construcción [28].

#### 2.2.1 Requisitos generales para morteros

La norma chilena NCh 2256 fija los requisitos generales que todos los morteros deben cumplir, cuyo conglomerante básico es el cemento, además de los requisitos específicos según su uso en la construcción. Un resumen de las referencias normativas encontradas se presenta en la Tabla 2.1:

**Tabla 2.1: Referencias normativas [28]**

Material	Norma	Aplicación
Cemento	NCh 148	Terminología, clasificación y especificaciones generales [29].
	NCh 158	Ensayo de flexión y de compresión de morteros de cemento [30].
Áridos	NCh 163	Requisitos generales [31].
	NCh 165	Tamizado y determinación de la granulometría [32].
	NCh1116	Determinación de la densidad aparente [33].
	NCh1239	Determinación de las densidades real y neta y de la absorción de agua de las arenas [34].
Agua	NCh 1498	Requisitos [35].

### 2.3 Confección de probetas

Para la preparación de las probetas es necesario indicar las dimensiones de los moldes. Estos moldes deben ser de un material que no sea atacado por el mortero. Cada molde se encuentra dividido en tres compartimientos prismáticos, que permitan confeccionar tres probetas, y debe poseer dimensiones de 40 [mm] x 40 [mm] x 160 [mm]. [36].

El procedimiento para el llenado de los moldes consta en dos capas de aproximadamente igual tamaño. Cada capa se compacta con 25 golpes de pisón. Posteriormente, se enrasa la superficie con regla, alisando e identificando las probetas de manera permanente, cuidando que no se altere su tamaño, forma o características físicas.

### 2.4 Curado de probetas

Una vez moldeadas, enrasadas y alisadas, deben recibir protección y el curado inicial en el mismo lugar, o eventualmente pueden ser desplazadas de manera inmediata a un lugar cercano para ser sometidas al curado inicial. Se debe evitar siempre la pérdida de agua por evaporación y se debe mantener la temperatura en un rango de 16°C y 27°C, desde el momento del moldeado [28].

Existen los siguientes procedimientos para mantener la humedad y evitar la evaporación:

- a) Inmediatamente después de ser moldeadas, enrasadas y alisadas, las probetas deben mantenerse dentro de un recipiente con agua tranquila saturada de cal, de forma que siempre permanezcan sumergidas.
- b) Proteger el conjunto de probetas y moldes por todos lados con láminas plásticas, arena, aserrín o arpilleras constantemente húmedas, dentro de un envase o recinto protegido hasta el momento del transporte.
- c) Cualquier otro método que permita evitar la evaporación del agua de las probetas.

### 2.5 Desmolde de probetas

Siempre y cuando las condiciones de endurecimiento permitan su desmolde, realizarlo no antes de 48 horas desde su confección. Posteriormente se deben almacenar las probetas desmoldadas a temperatura de 23 °C  $\pm$  2°C, en agua saturada de cal o colocadas dentro de una cámara con una humedad relativa mayor o igual a 95%.

### 2.6 Clasificación por grados de resistencia a compresión

Los morteros se clasifican con respecto a su resistencia especificada a compresión ( $f_p$ ), medida en los trozos resultantes del ensayo por flexión a la edad de 28 días, como se indica en la Tabla 2.2. [28]

**Tabla 2.2: Grados de morteros según resistencia especificada  $f_p$  de compresión a 28 días [28]**

<b>Grado del mortero</b>	<b>[MPa]</b>
M 0,5	0,5
M 2,5	2,5
M 5,0	5,0
M 7,5	7,5
M 10,0	10,0
M 12,5	12,5
M 15,0	15,0
M 20,0	20,0
M 25,0	25,0
M 30,0	30,0

## **2.7 Ensayo**

Los ensayos de compresión y flexotracción representan herramientas valiosas para evaluar el comportamiento de los materiales sometidos a carga. En esta sección se profundiza en la exploración de los ensayos de compresión y flexotracción, y su relevancia en la evaluación de los morteros de cemento.

Es de importancia mantener las probetas bajo protección, y para ello, es imperativo retirarlas del proceso de curado inmediatamente antes de ensayar, protegiéndolas con arpilleras húmedas o similares hasta el momento en que se deben colocar en la máquina de ensayos.

La determinación de la resistencia mecánica requiere que los ensayos deben realizarse según la norma NCh158. Cumplir con estas directrices garantiza la consistencia y confiabilidad de los resultados.

### **2.7.1 Cono de Abrams**

La norma chilena NCh 2257 establece la determinación de la consistencia de los morteros en laboratorio y en obra. Esta norma determina la consistencia de los morteros utilizando el método del Cono de Abrams según NCh 1019 [37].

El procedimiento consta en colocar un cono sobre una placa de tal manera que permanezca inmóvil durante el llenado. Se coloca la mezcla de mortero en el cono en dos capas de aproximadamente igual volumen y se debe compactar con 20 golpes de la varilla pisón. Posteriormente se enrasa sin compactar la superficie, seguido de levantar el molde cuidadosamente de manera vertical. Una vez quitado el molde, se debe medir de inmediato la disminución de altura, como muestra la Figura 2.1. El procedimiento completo, considerando el llenado, el enrase y la medición deben realizarse en un tiempo máximo de 3 minutos.

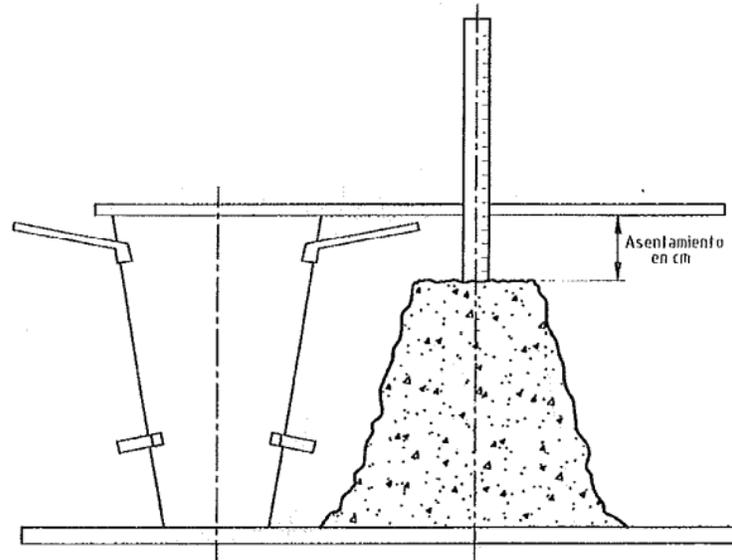


Figura 2.1 Medida de asentamiento [37]

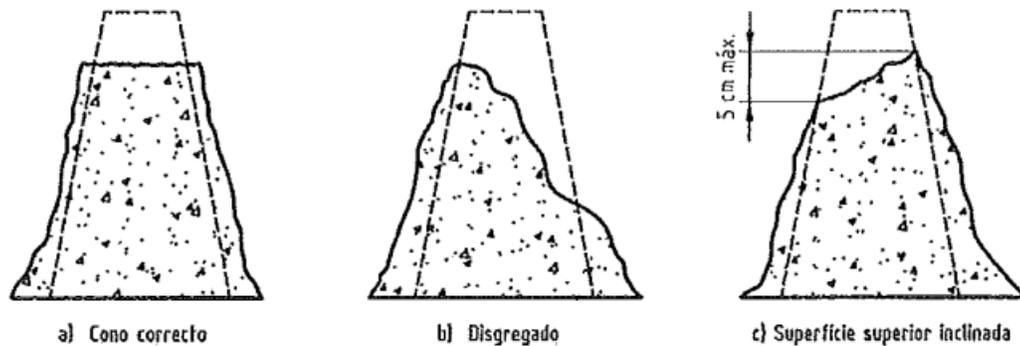


Figura 2.2 Formas de asentamiento. [37]

### 2.7.2 Ensayo de flexotracción

La máquina debe contar con dos rodillos de 10 [mm] situados a una distancia de 100 [mm] o de 106,7 [mm]. Debe tener, además, un rodillo equidistante de los de apoyo y de igual diámetro que ellos. Según la norma NCh1038, el proceso se puede separar según la forma de aplicación de la carga.

- a) Carga  $P/2$ , aplicada en límites del tercio central.

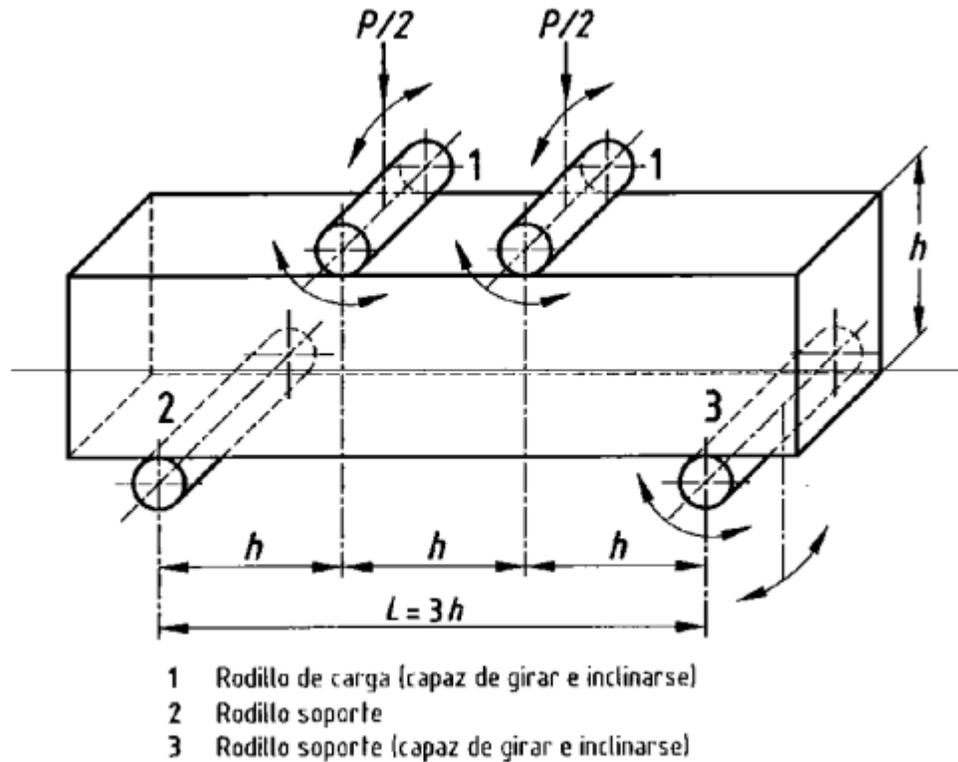


Figura 2.3 Dispositivo de carga de probetas (dos puntos de carga) [38]

En este caso, si la fractura se produce dentro del tercio central de la luz de ensayo, la resistencia a la tracción por flexión se calcula según:

$$R = \frac{P \times L}{b \times h^2} \quad (1)$$

Donde:

R= Tensión de rotura, expresado en megapascales [MPa];

P= Carga máxima aplicada, expresada en newton [N];

L= Luz de ensayo de la probeta, expresada en milímetros [mm];

b= Ancho promedio de la probeta en la sección de rotura, expresado en milímetros [mm];

h= Altura promedio de la probeta en la sección de la rotura, expresado en milímetros [mm].

Por otro lado, si la fractura se produce fuera del tercio central de la luz de la probeta, en la zona comprendida entre la línea de aplicación de la carga y una distancia 0,05 [L] de esta línea, se calcula la resistencia a la tracción por flexión según:

$$R = \frac{3P \times a}{b \times h^2} \quad (2)$$

Donde:

a= distancia entre la sección de rotura y el apoyo más próximo, medida a lo largo de la línea central de la superficie inferior de la probeta, expresada en milímetros [mm].

Si la fractura se produce fuera del tercio central y más allá de la zona indicada anteriormente, se deben desechar los resultados del ensayo.

b) Carga P centrada.

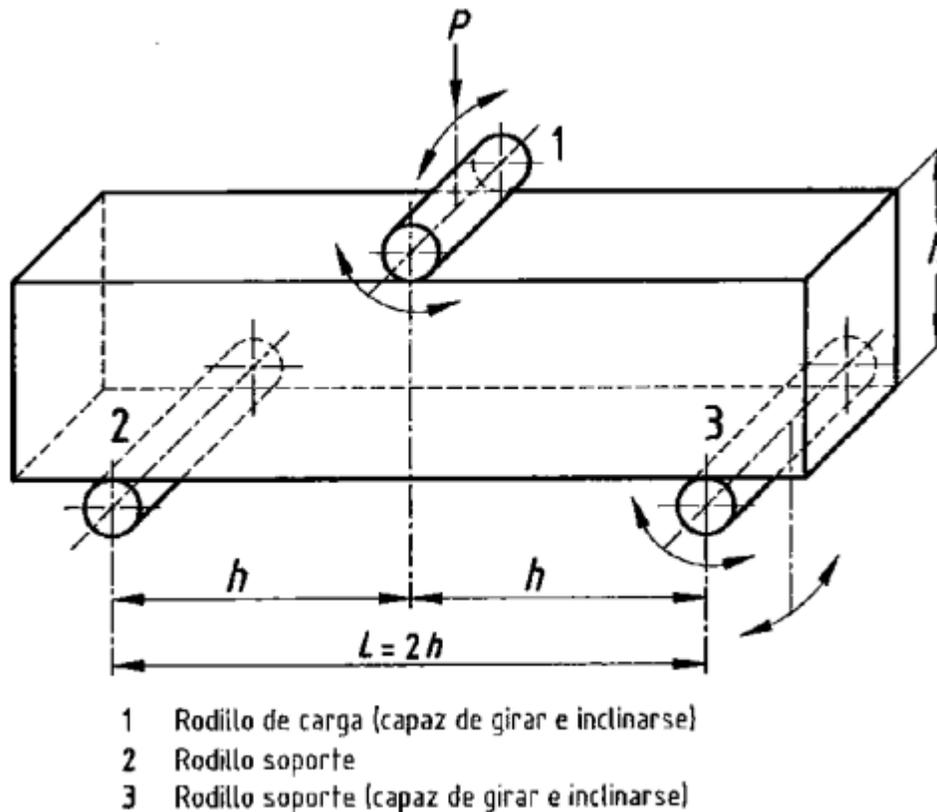


Figura 2.4 Dispositivo de carga de probetas (punto central de carga) [38]

En este caso, se debe calcular la resistencia a la tracción por flexión según:

$$R = \frac{3 \times P \times L}{2 \times b \times h^2} \quad (3)$$

Los resultados deben expresarse en Megapascales, aproximando a 0,05 [MPa].

### 2.7.3 Ensayo de compresión

La máquina debe tener un sistema de placas donde se puedan colocar las probetas provenientes del ensayo de flexotracción. Este sistema se coloca entre los platillos de la máquina de ensayo a compresión, que consta con 2 placas de presión rectangulares, de dimensiones:

Tabla 2.3 Placas de presión.

Sección	Longitud
Espesor	$\geq 10$ [mm]
Ancho	$40 \pm 0,1$ [mm]
Longitud superior	$\geq 40$ [mm]

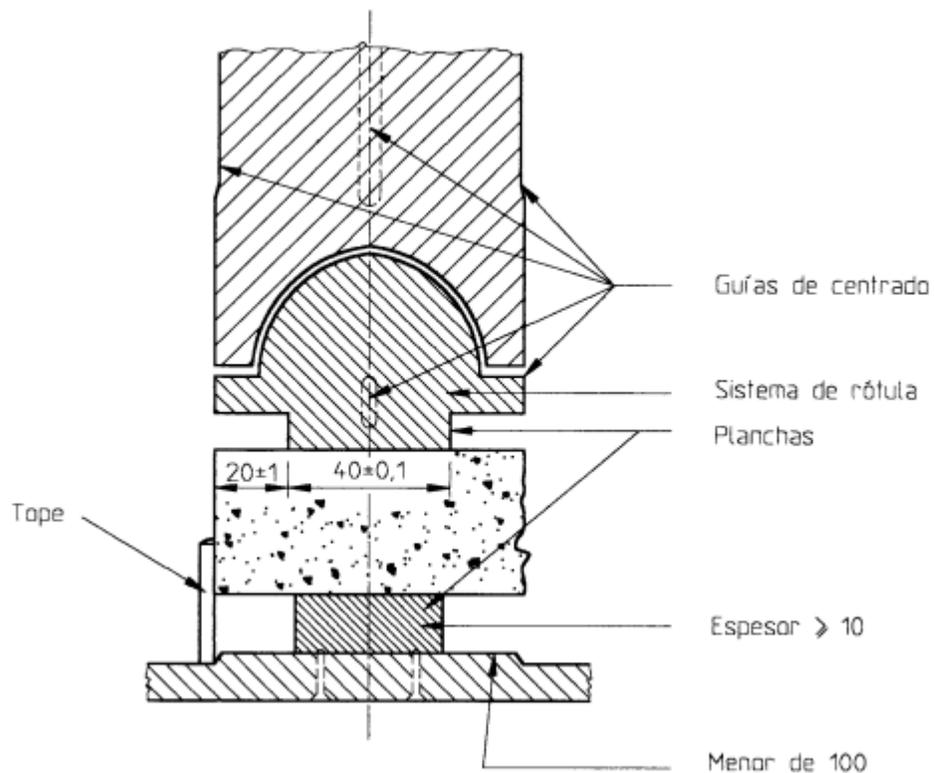


Figura 2.5 Disposición de la probeta para el ensayo de compresión. [30]

Los trozos obtenidos del ensayo de flexión se ensayarán a la compresión en una sección de 40 [mm] x 40 [mm], aplicándose la carga a las dos caras provenientes de las laterales del moldaje, colocándose entre las placas de la máquina de compresión.

Las placas del dispositivo de compresión deben ser de acero, de dureza Vickers superior o igual a 600. Una de ellas será solidaria con un sistema de rótula y podrá inclinarse ligeramente [30].

## Capítulo 3: Estado del arte

### 3.1 Reemplazo parcial de cemento

La industria de la construcción ha sido testigo de una constante evolución en la búsqueda de materiales más sostenibles y amigables con el medio ambiente. La atención se ha ido incrementando en el cemento Portland, el cual es un componente esencial en la fabricación de hormigón y responsable de un alto porcentaje de las emisiones de  $CO_2$  a nivel global [3].

Uno de los caminos para enfrentar este desafío es la práctica de reemplazo parcial de cemento en mezclas de hormigón o mortero. Este enfoque tiene un doble propósito: por una parte, reduce las emisiones de  $CO_2$ , y por otro lado aprovecha la abundancia de materiales secundarios, que podrían considerarse desechos. Entre estos materiales se incluyen las cenizas volantes, escoria de alto horno, humo de sílice, cáscaras de arroz, y en el contexto de esta investigación, las conchas marinas.

### 3.2 Reemplazo parcial de cemento con conchas marinas

Se ha abordado la gestión de residuos de conchas marinas en una serie de investigaciones, utilizando diversos procedimientos que engloban la recolección, limpieza, secado y calcinación de estos desechos. En cuanto al proceso de limpieza, se lleva a cabo mediante un lavado de las conchas marinas con agua, seguido de su posterior secado al sol o al aire. Para su posterior utilización, las conchas marinas son sometidas a temperaturas elevadas mediante el proceso de calcinación, posteriormente son trituradas hasta alcanzar un tamaño de partícula reducido y, finalmente, se someten a un tamizado #200 para lograr una granulometría adecuada [8].

Según diversos estudios, la molienda de las conchas marinas antes de quemarlas reduce la temperatura requerida, la cual oscila entre 500 y 1000 grados Celsius. Por otro lado, debido a las altas temperaturas de calcinación, el  $CaCO_3$  se transforma para convertirse en  $CaO$  y  $CO_2$  [13]. Según [26] los porcentajes de conchas marinas quemadas exceden el rango de 52% - 57%, que son los rangos que generalmente se informan. Además, se ha confirmado que las distintas temperaturas aplicadas antes de la composición química son los responsables de los distintos contenidos de  $CaO$  [39]. De esta manera, se confirma que las altas temperaturas de combustión conducen a mayores cantidades de contenido de  $CaO$  [40].

Wang y Liu [15] recolectaron conchas marinas de desecho de la industria alimentaria y realizaron el proceso de limpieza con agua de grifo, en el cual se eliminaron las impurezas y desechos. Posterior al secado se trituraron manualmente en pequeñas partículas de aproximadamente 1 cm con un martillo. A continuación, las conchas marinas fueron trituradas durante 8 horas por un molino de rodillos de bolas para obtener un tamaño de partícula más pequeño, específicamente uno que pase a través de un tamiz de 150  $\mu m$ .

En [13] se revisan estudios recientes del efecto de las conchas marinas recicladas en las propiedades del hormigón. Dentro de ellos se muestra que, para el desarrollo de la fuerza y densidad necesaria, el carbonato de calcio estuvo expuesto a quemaduras a temperaturas de más de 600 °C. Por otro lado, con conchas de ostras residuales se realizó un proceso de limpieza con agua, posteriormente un secado a 105 °C aproximadamente, con una duración de 1 día para obtener la muestra sin humedad. Finalmente se calcinaron durante 120 minutos a temperaturas de hasta 950 °C. En la Tabla 3.1 se

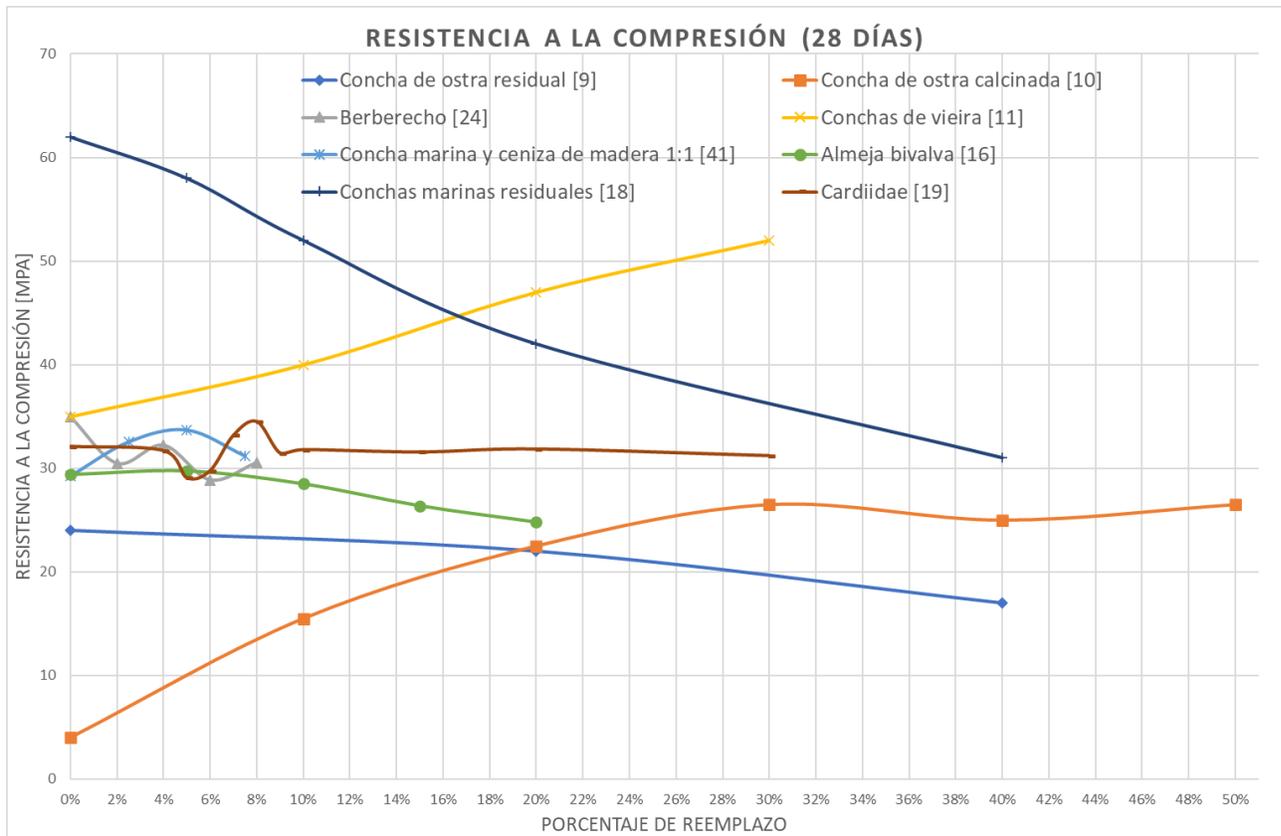
presenta un resumen de distintas investigaciones sobre el reemplazo parcial de cemento con conchas marinas y sus características principales.

**Tabla 3.1 Investigaciones sobre el reemplazo de cemento con conchas marinas.**

<b>Autor principal (año)</b>	<b>Espécimen</b>	<b>Porcentajes</b>	<b>Tamaño de partículas</b>	<b>Edad de ensayo</b>	<b>Sustituto/agregado</b>	<b>Resistencia (MPa)</b>
Kong et al., (2022) [9]	Concha de Ostra Residual	20% - 40%	5-20 mm	28 días	Concreto poroso agregado reciclado	Control: 35 20%: 22 40%: 16
Nasaeng et al., (2022) [10]	Concha de ostra calcinada	0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%	-	7 y 28 días	Reemplazo del polvo de piedra pómez	26 MPa (30% y 50%)
Olivia et al., (2015) [24]	Berberecho	2%, 4%, 6%, 8%	75 $\mu$ m	7 y 28 días	Reemplazo parcial de cemento	Compresión esperada 35 MPa, 4%: 32.34 MPa
Olivia et al., (2017)[20]	Berberecho de sangre, almeja de pantano	4%	75 $\mu$ m	7 y 28 días	Reemplazo parcial de cemento	Compresión esperada 35 MPa, Berberecho:32 MPa, Almeja de pantano 38 MPa
Hasnaoui et al., (2022) [11]	Conchas de Vieira	0%, 10%, 20%, 30%	63 $\mu$ m	3, 28 y 90 días	Reemplazo de metacaolín en la preparación de morteros geopolímeros	Compresión con 0%: 35 MPa. 30%: 50 MPa
Rollakanti et al., (2021) [41]	Concha marina	2.5%, 5%, 7.5%	75 $\mu$ m	7 y 28 días	Sustitución parcial del cemento con ceniza de madera y polvo fino de concha marina	Con 0%: 30 MPa Con 5% y 5% de madera y conchas: 34 MPa
Tayeh et al., (2020) [16]	Almeja bivalva	5%, 10%, 15% y 20%	75 $\mu$ m	3, 7, 28 y 90 días	Reemplazo parcial de cemento	0%: 29.38 MPa 5%: 29.73% MPa
Wang et al., (2019) [18]	Conchas marinas residuales	5%, 10%, 20%, 40%	60 $\mu$ m	1, 3, 7, 14, 28 y 56 días	Reemplazo parcial de cemento	Aumento fue de 353-473% para la mezcla de

						40% con respecto al día 1.
Soltanzadeh et al., (2018) [19]	Cardiidae	4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 15, 20 y 30%	-	3, 7, 28 días	Reemplazo parcial de cemento	0%: 32,1 MPa 7%: 33,18 MPa 8% :34,5 MPa

En la Figura 3.1 se presentan los resultados de la resistencia a la compresión a la edad de ensayo de 28 días, en los distintos porcentajes de reemplazos realizados. Como se puede observar, gran parte de los porcentajes de reemplazo de cemento se encuentran entre el rango de 5% y 10%.



**Figura 3.1 Resistencia a la compresión v/s porcentaje de reemplazo de cemento.**

## Capítulo 4: Metodología

### 4.1 Materiales

#### 4.1.1 Cemento

Se utilizó cemento Bio Bio especial, disponible en el laboratorio de hormigones del Departamento de Ingeniería Civil. Las especificaciones del cemento son: Cemento especial de clase puzolánico de grado corriente, el cual fue adquirido en el comercio local en su formato de 25 kg. Respecto a sus características técnicas, el fabricante indica que cumple con los requisitos expuestos en la NCh 148.

#### 4.1.2 Agua

Se utilizó agua potable para la confección del hormigón. Esta agua cumple con la normativa NCh409 debido a que viene de la red pública.

#### 4.1.3 Áridos

Las características de los áridos disponibles para la confección se presentan en la Tabla 4.1.

**Tabla 4.1 Propiedades físicas Arenas Bíobio.**

<b>Propiedades físicas</b>	<b>Valor</b>
Densidad real árido saturado seco [ $\frac{kg}{m^3}$ ]	2732,58
Densidad real árido seco [ $\frac{kg}{m^3}$ ]	2674,24
Densidad neta [ $\frac{kg}{m^3}$ ]	2839,9
Absorción de agua [%]	2,18

#### 4.1.4 Conchas marinas

Obtenidas las conchas marinas, cuyo tipo corresponde a almejas provenientes del mercado de Talcahuano, comienza el proceso de secado. Se secan las conchas en un horno a una temperatura de  $100^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$  durante 1 hora, como se puede ver en la Figura 4.1.



a)

b)

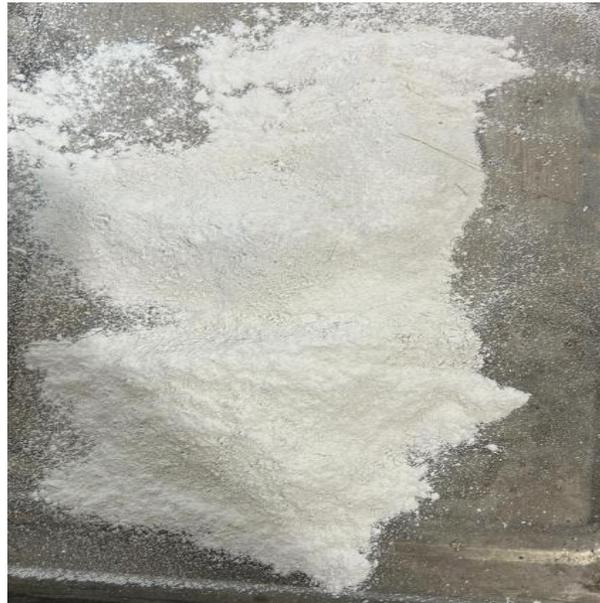
**Figura 4.1: Proceso de secado de las conchas: a) Conchas en el horno. b) Condiciones de operación del horno.**

Posteriormente, comienza el proceso de molienda del material, el cual se realiza mediante el molino de bolas tipo Marcy, fabricado por EDEMET, construido en acero inoxidable AISI 316, con capacidad de 5,2 litros. Este molino se encuentra ubicado en el laboratorio de flotación del Departamento de Ingeniería Metalúrgica (DIMET). Además, en la Figura 4.2 se puede observar las condiciones de operación del molino de bolas, el cual es un roller de laboratorio, de la marca EDEMET, con un motor trifásico de 0,37 kW.



**Figura 4.2: Condiciones de operación de la molienda.**

En la Figura 4.3 se puede observar el material luego de ser pasado por el tamiz de malla #170, la cual corresponde a una apertura de 90 micrómetros ( $\mu\text{m}$ ).



**Figura 4.3: Imágenes de partículas menores a 90 [ $\mu\text{m}$ ].**

#### **4.1.5 Concha calcinada**

Se utilizaron las mismas muestras de la molienda realizada, y se sometieron a una calcinación en una mufla convencional ubicada en el Laboratorio de Piro-Hidrometalurgia del Departamento de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad de Concepción. El equipo corresponde a una mufla de la marca Nabertherm, modelo N50 con una capacidad máxima de 1280 [°C] y una potencia de 3,3 [kW]. La mufla y su temperatura de calcinación se observan en la Figura 4.4 y Figura 4.5, respectivamente.

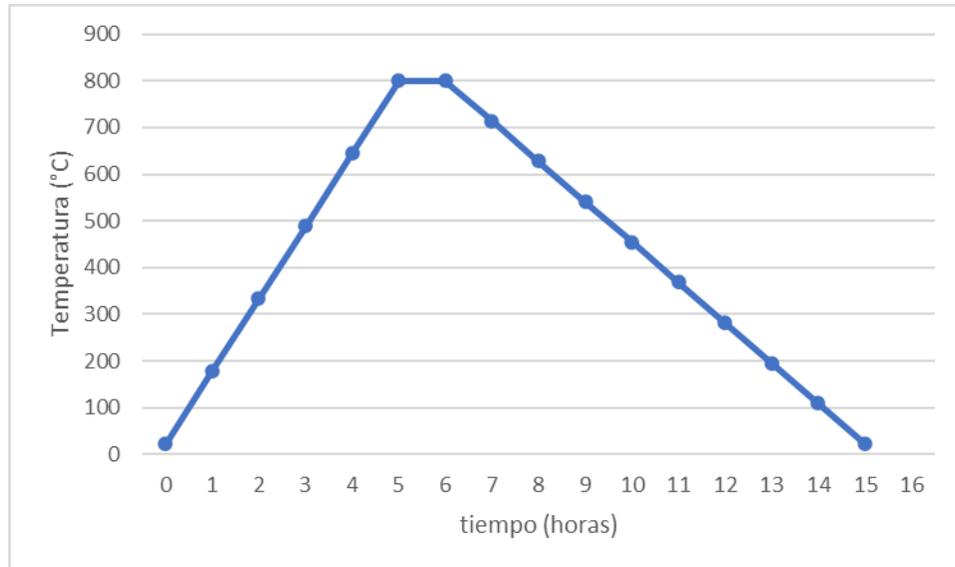


**Figura 4.4 Mufla convencional.**



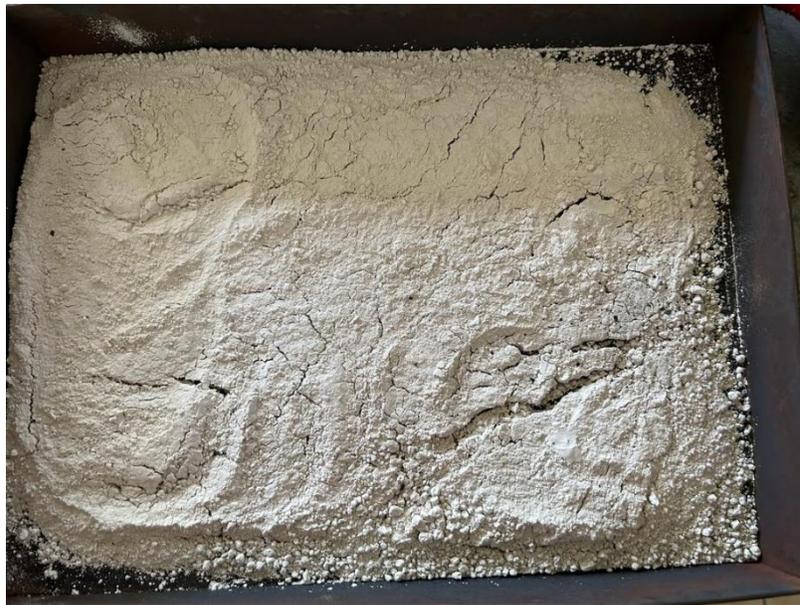
**Figura 4.5 Temperatura de calcinación.**

Previo a comenzar el proceso, se mide el peso inicial de las conchas para poder conocer el porcentaje de pérdida debido a la calcinación. Posteriormente se esparce el material en una capa delgada, con tal de obtener una calcinación homogénea. Se registra el tiempo que demora en llegar a la temperatura deseada, luego se mantiene a 800 [°C] de manera constante durante una hora. Finalmente se apaga esperando que enfríe en un lapso de 6 a 8 horas. En la Figura 4.6 se presenta de manera esquemática la curva de temperatura correspondiente al tratamiento térmico aplicado.



**Figura 4.6 Perfil de temperaturas.**

La masa de la muestra previo a la calcinación es de 722,3 [g] y luego de la calcinación el resultado es 584,6 [g], lo cual significa un porcentaje de pérdida de 19,06 %, porcentaje menor al 45% registrado en [10]. Se estima que la diferencia se genera debido a que en ese estudio la calcinación se realiza sin una previa limpieza de las impurezas ni de un secado, en contraste al presente trabajo. Las conchas calcinadas pueden observarse en la Figura 4.7:



**Figura 4.7 Conchas calcinadas.**

## 4.2 Dosificación

Para realizar las diferentes probetas para los ensayos mecánicos se utilizó la dosificación que se presenta en la Tabla 4.2:

**Tabla 4.2: Dosificación de mortero.**

<b>Material</b>	<b>[kg]</b>
Cementante	1,502
Agua	0,751
Arena	4,506

Este cálculo se realiza en base a que por colada se utilizaran 4 moldes, por lo tanto, se confeccionan 12 probetas por colada. La razón utilizada en el laboratorio de hormigones de Departamento de Ingeniería Civil es 1:3:0.5 de cemento:arena:agua. Cabe destacar que se realiza una estimación de error de 15% en el cálculo, este error es una determinación empírica de parte del laboratorio de hormigones, que se atribuye a la pérdida debido al proceso de mezcla. De esta manera el resumen de la dosificación se puede observar en la Tabla 4.3.

**Tabla 4.3: Dosificación por colada para las conchas, previo a la corrección del árido por el contenido de humedad.**

<b>Nomenclatura</b>	<b>MR-00</b>	<b>MR-05</b>	<b>MR-10</b>
<b>Cemento [g]</b>	1501,87	1426,77	1351,68
<b>Concha [g]</b>	0	75,09	150,19
<b>Agua [g]</b>	750,93	750,93	750,93
<b>Arena [g]</b>	4505,6	4505,6	4505,6

## 4.3 Confección

La confección se realiza en el laboratorio de hormigones de la Universidad de Concepción. En primer lugar, se confeccionaron las probetas patrón MR-00, luego las probetas con reemplazo MR-05 y MR-10.

La corrección del árido se realiza para conocer la cantidad de agua presente debido a la humedad calculada.

$$\text{Contenido de humedad} = \frac{\text{Masa húmeda} - \text{Masa seca}}{\text{Masa seca}} * 100\% \quad (4)$$

Conociendo el porcentaje de humedad (2,2%) se realiza la corrección en la dosificación y se comienza a realizar la mezcla. Las dosificaciones corregidas debido al contenido de humedad se presentan a continuación, en la Tabla 4.4.

**Tabla 4.4 Dosificación por colada para las conchas sin calcinar, posterior a la corrección del árido por el contenido de humedad.**

<b>Nomenclatura</b>	<b>MR-00</b>	<b>MR-05</b>	<b>MR-10</b>
<b>Cemento [g]</b>	1727,15	1640,79	1554,43
<b>Concha [g]</b>	0	86,36	172,71
<b>Agua [g]</b>	863,57	863,57	863,57
<b>Arena [g]</b>	5295,15	5295,15	5295,15

**Tabla 4.5 Dosificación por colada para las conchas calcinadas, posterior a la corrección del árido por el contenido de humedad.**

<b>Nomenclatura</b>	<b>MRC-00</b>	<b>MRC-05</b>	<b>MRC-10</b>
<b>Cemento [g]</b>	1727,15	1640,79	1554,43
<b>Concha [g]</b>	0	86,36	172,71
<b>Agua [g]</b>	949,93	949,93	949,93
<b>Arena [g]</b>	5295,15	5295,15	5295,15

Nótese que la diferencia de las dosificaciones una vez corregida, recae únicamente en la cantidad de agua a mezclar, por ende la relación agua:cementante cambia de 0,5 a 0,55. Esto debido a que en la fabricación se añade un 10% más de agua para mejorar la trabajabilidad detectada en la primera confección.

El amasado comienza con realizar una mezcla homogénea entre la arena y el cemento, posteriormente se continúa mezclando con el porcentaje de reemplazo correspondiente. Esta mezcla se realiza con una mezcladora manual eléctrica, como se puede observar en la Figura 4.8. Luego de eso, se añade el agua en pequeñas cantidades, asegurándose de que la mezcla cuente con el agua vertida en su totalidad.



**Figura 4.8 Confección de mezcla.**

Una vez finalizada la etapa de preparación de la mezcla, se mide su trabajabilidad mediante el cono de Abrams (Figura 4.10). Finalmente comienza con el llenado de los moldes y posterior compactación en la mesa vibradora LH 13.00, que se puede apreciar en la Figura 4.9, culminando esta confección enrasando y dejando fraguar durante 3 días a temperatura ambiente y protegidas con un plástico.



**Figura 4.9 Mesa de vibrado LH 13.00.**



**Figura 4.10 Cono de Abrams para mezcla sin reemplazo.**

Pasados los tres días se separan 3 probetas de cada espécimen para realizar el ensayo de temprana edad y el resto se lleva a la cámara de curado para volver a ensayar a los 7, 14 y 28 días correspondientes. La cámara de curado cuenta con una temperatura ente un rango de 17 y 23 °C y una humedad del 90%. Las probetas ubicadas en la cámara de curado pueden observarse en la Figura 4.11.



Figura 4.11 Probetas en cámara de curado

## 4.4 Ensayos

### 4.4.1 Ensayo de flexotracción

El ensayo se realiza en un equipo de compresión simple, adaptado con el dispositivo de flexión de mortero, ubicada en el laboratorio de hormigones de la Universidad de Concepción. El dispositivo de ensayo puede apreciarse en la Figura 4.12. La aplicación de la carga se realiza en la mitad de la probeta, y la lectura indica el desplazamiento. Mediante la fórmula (5) se transforma el desplazamiento en una carga medida en kgf. Esta fórmula se extrae de la norma NCh 158, la cual es determinada empíricamente debido a que no existe una conversión de desplazamiento a kilogramos fuerza ([kgf]).

$$P \text{ [kgf]} = \text{lectura} * 3,4 + 15,25 \quad (5)$$

Obtenido este valor, puede introducirse en la fórmula (3) para obtener el valor de la resistencia a la tracción.



**Figura 4.12** Probeta de 5% de reemplazo ensayada.

#### **4.4.2 Ensayo de compresión**

El ensayo de compresión se realizó en el laboratorio de hormigones de la Universidad de Concepción, en la máquina de ensayo universal Controls Sercomp 7 LH 01.00.B, cuya velocidad de aplicación de la carga es de 0,3 [MPa/s], la cual es menor a la velocidad especificada en la norma chilena (0,35 [MPa/s]). El ensayo se realizó en las mitades resultantes del ensayo de flexotracción, inmediatamente finalizado este.



**Figura 4.13** Ensayo de compresión a probeta.

## Capítulo 5: Resultados

### 5.1 Cono de Abrams

Siguiendo el procedimiento detallado en 2.7.1 se realizan las mediciones del Cono de Abrams, dando como resultados:

**Tabla 5.1 Resultados de Cono de Abrams.**

<b>Código espécimen</b>	<b>Asentamiento del cono [cm]</b>
<b>MR – 00</b>	1
<b>MR – 05</b>	2
<b>MR – 10</b>	2
<b>MRC – 00</b>	3,5
<b>MRC – 05</b>	2,5
<b>MRC – 10</b>	2,5

En la Tabla 5.1 se observa de manera clara el efecto del cambio de la dosificación de agua en la trabajabilidad. Teniendo que para una misma dosificación árido:cementante, al añadir un porcentaje de agua mayor se consigue una mayor trabajabilidad.

Si bien para las probetas de mortero no existe una guía para describir el asentamiento con respecto a una norma, sí lo existe para el hormigón, la cual se presenta en la Tabla 5.2. La altura del cono para el hormigón es de 30 [cm], mientras que para el cono de mortero es de 15 [cm]. Se puede estimar los parámetros obteniendo una relación entre las alturas.

**Tabla 5.2 Asentamiento del cono de Abrams para hormigón [37]**

<b>Consistencia</b>	<b>Asentamiento en [cm]</b>
Seca	0 a 2
Plástica	3 a 5
Blanda	6 a 9
Fluida	10 a 15
Líquida	≥ 16

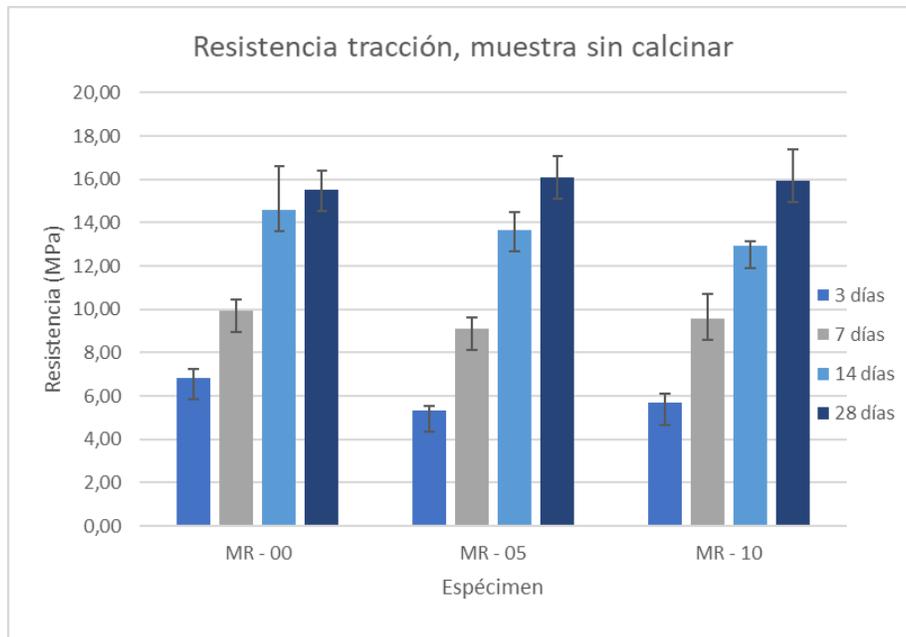
## 5.2 Resistencia a la tracción

Los resultados de la resistencia a la tracción se presentan en la Tabla 5.3 a modo de resumen. Para conocer en mayor detalle los resultados obtenidos se sugiere visitar el Anexo A en la página 38.

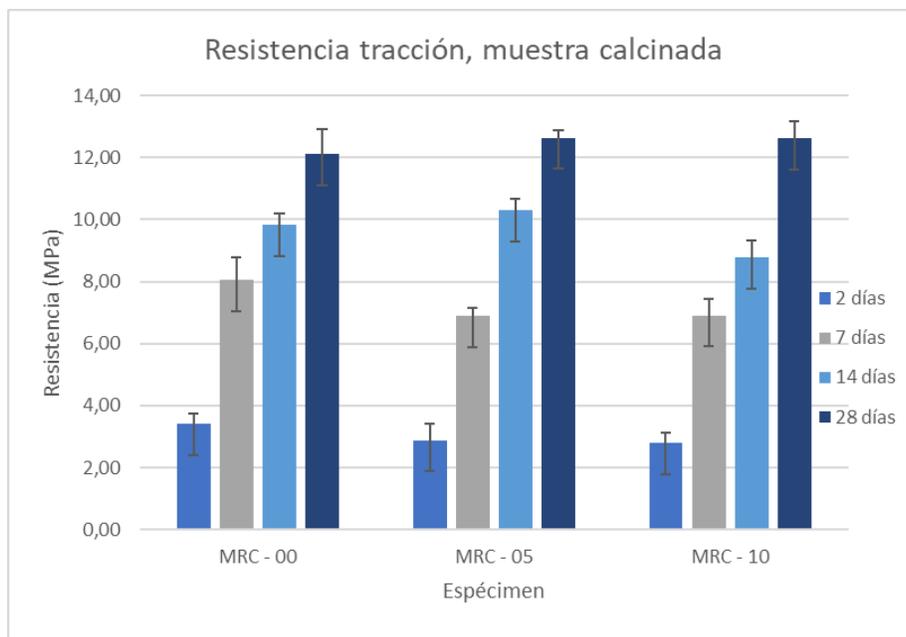
**Tabla 5.3 Resultados de ensayos de flexo-tracción.**

Código espécimen	Número de probeta	Resistencia a la tracción [MPa] ensayada a la edad de:				Desviación estándar a los 28 días
		3 días <sup>1</sup>	7 días	14 días	28 días	
MR – 00	1	7,10	10,29	13,74	15,03	0,87
	2	7,05	10,20	16,92	16,55	
	3	6,41	9,36	13,14	15,03	
MR – 05	1	5,21	8,72	13,93	15,59	0,97
	2	5,53	9,68	14,33	15,47	
	3	5,31	8,98	12,76	17,21	
MR – 10	1	5,91	8,62	12,79	17,53	1,44
	2	5,21	9,39	12,79	15,58	
	3	5,94	10,78	13,19	14,72	
MRC – 00	1	3,75	8,14	9,55	11,25	0,81
	2	3,41	7,28	10,24	12,26	
	3	3,07	8,72	9,68	12,84	
MRC – 05	1	3,15	6,57	10,51	12,92	0,25
	2	3,23	7,10	9,87	12,45	
	3	2,25	6,99	10,53	12,55	
MRC – 10	1	3,09	6,28	9,28	13,22	0,57
	2	2,83	7,22	8,16	12,08	
	3	2,47	7,22	8,87	12,53	

<sup>1</sup> Para la muestra calcinada (MRC) corresponde a 2 días.



a)



b)

**Figura 5.1 Resumen de resultados de la resistencia a la tracción: a) Muestra sin calcinar. b) Muestra calcinada.**

Se puede observar en la Figura 5.1.a que el promedio de la resistencia a la tracción de la muestra sin calcinar a los 28 días mejora con el porcentaje de reemplazo del 5% y 10%, con 16,09 y 15,95 [MPa], por sobre los 15,54 [MPa] alcanzados por el patrón. Cabe destacar que la desviación estándar de los resultados son 0,87 [MPa], 0,97 [MPa] y 1,43 [MPa] para los niveles de reemplazo de 0%, 5% y 10% respectivamente. La dispersión de datos sugiere que, a pesar de esta ventaja evidente del promedio, no se garantiza que las muestras con reemplazo presenten una resistencia superior.

Para las muestras calcinadas, a los 28 días también supera lo alcanzado por la muestra patrón, con 12,64 y 12,66 [MPa] en contraste con los 12,12 [MPa] de la muestra sin reemplazo, pero se repite que la dispersión calculada en base a los resultados de los ensayos, no asegura que la magnitud de la resistencia sea mayor en los reemplazos.

La tendencia de estos resultados son similares a los observados en [16], la resistencia a la tracción a los 28 días presenta los mejores resultados en reemplazos de cemento por almeja bivalva en 5% y 10%, con 2,92 y 2,97 [MPa] respectivamente, por sobre los 2,22 [MPa] que presenta el patrón. El trabajo realizado con la especie *Cardiidae* [19] con reemplazos de 5% y 10% no alcanza la resistencia de 9,9 [MPa] alcanzadas por la muestra patrón, obteniendo solo 8,72 y 8,70 [MPa] respectivamente.

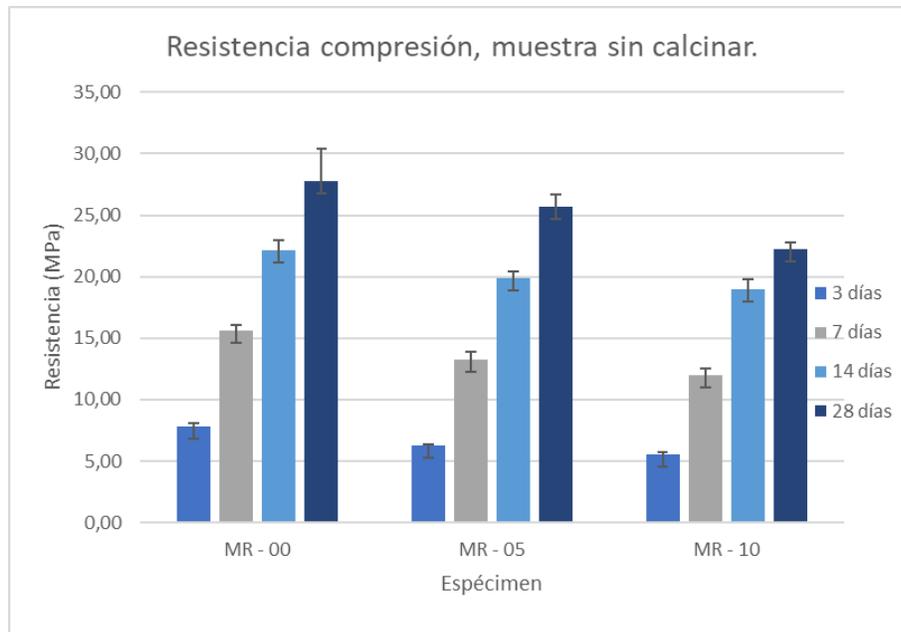
### 5.3 Resistencia a la compresión

Con respecto a la resistencia a la compresión:

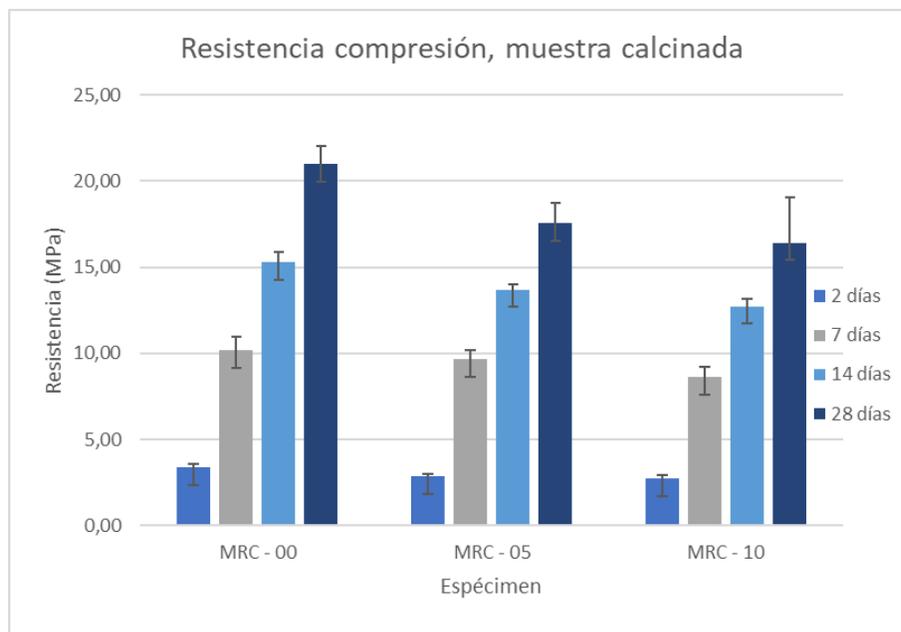
**Tabla 5.4: Resultados de ensayos de compresión.**

Código espécimen	Número de probeta	Resistencia a la compresión [MPa] ensayada a la edad de:								Desv. Estándar 28 días
		3 días <sup>2</sup>		7 días		14 días		28 días		
		P1	P2	P1	P2	P1	P2	P1	P2	
MR – 00	1	7,54	7,80	14,79	15,98	22,85	22,54	22,72	27,99	2,61
	2	8,03	7,85	15,63	16,02	22,97	22,32	29,61	29,86	
	3	7,57	8,08	15,42	15,64	21,34	20,87	28,50	28,18	
MR – 05	1	6,10	6,20	14,29	13,91	19,59	19,83	25,78	26,25	0,98
	2	6,23	6,27	12,81	12,97	20,90	20,14	26,98	25,91	
	3	6,18	6,37	12,63	12,86	19,38	19,33	24,22	24,90	
MR – 10	1	5,54	5,57	11,65	11,38	19,11	19,24	21,95	22,00	0,5
	2	5,61	5,59	12,03	11,84	20,25	17,71	22,99	22,53	
	3	5,34	5,79	12,19	12,92	18,98	18,40	22,53	21,61	
MRC – 00	1	3,34	3,18	9,67	11,40	15,52	15,37	19,36	20,46	1,03
	2	3,42	3,29	9,36	10,02	15,44	14,72	21,31	20,83	
	3	3,73	3,31	9,82	10,80	16,11	14,53	22,44	21,41	
MRC – 05	1	2,88	2,93	9,02	10,41	13,64	13,66	17,76	18,32	1,17
	2	2,64	2,97	9,55	9,40	13,34	14,30	18,74	17,71	
	3	2,80	2,98	10,03	9,56	13,58	13,53	17,40	15,36	
MRC – 10	1	2,91	2,88	7,73	8,64	13,46	13,08	16,64	18,10	2,66
	2	2,69	2,78	9,28	9,25	12,36	12,53	12,80	13,49	
	3	2,82	2,31	8,17	8,61	12,48	12,48	19,07	18,37	

<sup>2</sup> Para la muestra calcinada (MRC) corresponde a 2 días



a)



b)

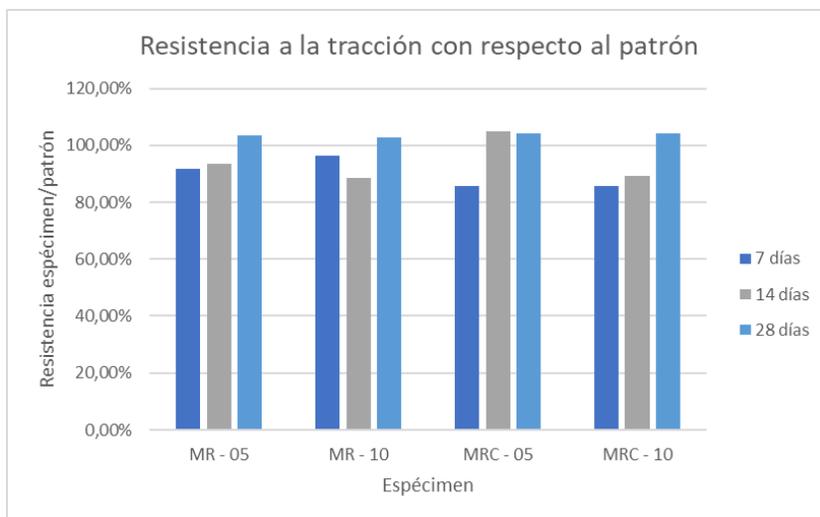
**Figura 5.2 Resumen de resultados de resistencia a la compresión: a) Muestra sin calcinar. b) Muestra calcinada.**

En la Figura 5.2 se presenta de manera gráfica el resultado de los promedios de los ensayos realizados a las distintas edades medidas. Se observa que el promedio de la resistencia a la compresión baja un 7,68% y 19,93% con respecto al patrón a los 28 días, en las muestras MR – 05 y MR – 10 respectivamente. Considerando la dispersión de los datos, los resultados de la muestra patrón arrojan una clara ventaja sobre las muestras con reemplazo del 10%, mientras que para la muestra con 5% de reemplazo, los rangos generados con la dispersión logran coincidir en parte.

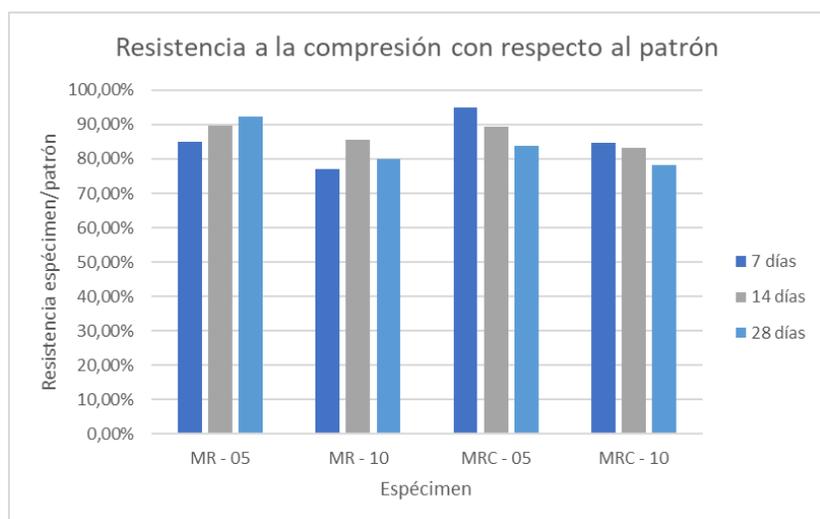
Por otro lado, las muestras calcinadas MRC – 05 y MRC – 10 no logran superar el 83,69% y 78,27% de la resistencia alcanzada por su respectivo patrón y al considerar la dispersión de los datos, la muestra patrón sigue teniendo una mayor resistencia que los reemplazos parciales.

Por el contrario a lo observado en los ensayos, en [16] se observa que la resistencia a la compresión, con un reemplazo de 5% por almejas bivalvas, supera ligeramente la magnitud registrada por la muestra patrón, alcanzando hasta un 101% de esta medida. En contraste, el resultado obtenido con un reemplazo parcial de 5% de Cardiidae [19] alcanza un 91% de la resistencia de la muestra patrón.

A modo de resumen, se presentan las Figura 5.3 a) y b) donde se ilustran las resistencias obtenidas por las muestras con reemplazo parcial de cemento con respecto a la resistencia obtenida por la muestra patrón. Se puede observar que la mayor resistencia a la tracción es la obtenida por la MRC – 05 mientras que, para la resistencia a la compresión, la MR – 05 es quien obtiene el mejor resultado.



a)



b)

**Figura 5.3 Resistencias en comparación con la resistencia obtenida por el patrón: a) en tracción b) en compresión**

## Capítulo 6: Análisis económico

En este segmento se ejecuta un análisis económico con el propósito de comparar el costo por metro cúbico entre el mortero convencional sin reemplazo y las variantes que incorporan materiales de reemplazo. Dicho análisis considera tanto el valor directo de los materiales en el mercado como la obtención del residuo, considerando el tiempo que toma requerido para llevar a cabo los procesos de calcinación y molienda, los cuales se expresan en términos de kilowatt-hora ([kWh]). Para la evaluación del valor de los [kWh] se considera un uso mensual superior a 1000 [kWh]. En la Tabla 6.1 se presenta un resumen de los valores de referencia utilizado en la estimación del ahorro económico que se presenta en las mezclas con reemplazo parcial de cemento.

**Tabla 6.1: Valores de referencia.**

	<b>Formato</b>	<b>Unidad</b>	<b>Precio (\$)</b>	<b>Precio unitario (\$/unidad)</b>
<b>Cemento</b>	25	kg	3780 [42]	151,20
<b>Agua</b>	1	L	1,4 [43]	1,40
<b>Arena</b>	25	kg	1570 [44]	62,80
<b>Conchas sin calcinar</b>	1	kg	4,63	4,63
<b>Conchas calcinadas</b>	1	kg	89,30	89,30
<b>Energía</b>	1	kWh	2,5 [45]	2,5

Para trasladar estos costos unitarios a valores proporcionales a 1 [ $m^3$ ] se determina que el peso promedio de las probetas de mortero obtenidas en este estudio es de 0,5632 [kg], lo que equivale a un total de 2200 [kg] de mezcla por cada [ $m^3$ ] de mortero. En la Tabla 6.2 presentan los resultados para una mezcla de 1 [ $m^3$ ].

**Tabla 6.2: Valores de dosificación en mezcla de 1 [ $m^3$ ].**

<b>Espécimen</b>	<b>MR-00</b>	<b>MR-05</b>	<b>MR-10</b>	<b>MRC-00</b>	<b>MRC-05</b>	<b>MRC-10</b>
<b>Porcentaje de reemplazo</b>	0%	5%	10%	0%	5%	10%
<b>Arena</b>	\$92.107	\$92.107	\$92.107	\$91.095	\$91.095	\$91.095
<b>Agua</b>	\$342	\$342	\$342	\$372	\$372	\$372
<b>Cemento</b>	\$73.920	\$70.224	\$66.528	\$73.108	\$69.452	\$65.797
<b>Residuo</b>	\$0	\$113	\$226	\$0	\$2.271	\$4.541
<b>Total</b>	\$166.369	\$162.786	\$159.203	\$164.575	\$163.190	\$161.805

<b>Ahorro con respecto a mezcla patrón</b>	0,00%	2,15%	4,31%	0,00%	0,84%	1,68%
--	-------	-------	-------	-------	-------	-------

En la Figura 6.1 se presentan de manera gráfica los resultados obtenidos en la Tabla 6.2, donde se puede observar que la mezcla que presenta un mayor ahorro corresponde a la muestra con un reemplazo parcial de 10% con conchas marinas sin calcinar. La muestra MR-05 es quien la sigue, con un ahorro de 2,15%, siendo por otro lado, la muestra que tuvo una mejor resistencia a la compresión.



**Figura 6.1: Ahorro con respecto a mezcla patrón.**

## Capítulo 7: Conclusiones

Se lograron diseñar y desarrollar diversas mezclas que incorporan conchas marinas, tanto calcinadas como sin calcinar, en distintas proporciones como reemplazo parcial de cemento. La revisión exhaustiva estado del arte determinó que un reemplazo parcial de cemento por conchas marinas del 5% y 10%, en términos de peso, representa el valor óptimo para comparar con la literatura. Esta elección fue crucial para evaluar el impacto en las propiedades mecánicas de las probetas de mortero.

Se llevó a cabo una revisión de las propiedades físicas de las conchas marinas utilizado en distintos estudios, para la determinación del tamaño de partícula. Este análisis proporcionó, fundamentalmente, que se utilizara la malla de tamiz con una apertura de 90  $\mu\text{m}$ .

Las pruebas de resistencia mecánica, incluyendo compresión y flexotracción, se realizaron en diferentes porcentajes de reemplazo de cemento, específicamente del 5% y 10%. Los resultados obtenidos fueron comparados con una muestra patrón sin reemplazo parcial de cemento. Aunque se observaron variaciones significativas de las propiedades mecánicas del mortero, con una disminución de su resistencia a la compresión, estas aún siguen teniendo una magnitud más que aceptable para la función de los morteros. Estas pruebas se llevaron a cabo conforme a las especificaciones de la norma NCh158.

Este estudio permitió analizar en profundidad el comportamiento mecánico de las conchas marinas como un potencial reemplazo de cemento. Los datos recopilados ofrecen información clave sobre la capacidad de las conchas marinas para contribuir a las propiedades mecánicas del concreto, resaltando su viabilidad como material de reemplazo.

Considerando que la muestra MR – 05 es quien produce el segundo mayor ahorro económico, y por otro lado es quién tiene una mayor cercanía a la resistencia a la compresión obtenida por la muestra patrón, se concluye que es la muestra recomendada para continuar con su investigación.

Los resultados obtenidos a partir de los objetivos establecidos generan una base sólida para considerar la incorporación de conchas marinas en la producción de mortero como una alternativa viable y sostenible. La variedad de pruebas y análisis realizados aporta a la comprensión del impacto de dicho reemplazo en las propiedades mecánicas del concreto, generando posibles aplicaciones en la industria de la construcción.

## Referencias

- [1] C. Rahul Rollakanti, C. Venkata Siva Rama Prasad, K. K. Poloju, N. M. Juma Al Muharbi, y Y. Venkat Arun, «An experimental investigation on mechanical properties of concrete by partial replacement of cement with wood ash and fine sea shell powder», *Int. Conf. Adv. Mater. Behav. Charact. ICAMBC 2020*, vol. 43, pp. 1325-1330, ene. 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2020.09.164.
- [2] E. Benhelal, G. Zahedi, E. Shamsaei, y A. Bahadori, «Global strategies and potentials to curb CO2 emissions in cement industry», *J. Clean. Prod.*, vol. 51, pp. 142-161, jul. 2013, doi: 10.1016/j.jclepro.2012.10.049.
- [3] F. Farooq *et al.*, «Geopolymer concrete as sustainable material: A state of the art review», *Constr. Build. Mater.*, vol. 306, p. 124762, nov. 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124762.
- [4] D. Ndahirwa, H. Zmamou, H. Lenormand, y N. Leblanc, «The role of supplementary cementitious materials in hydration, durability and shrinkage of cement-based materials, their environmental and economic benefits: A review», *Clean. Mater.*, vol. 5, p. 100123, sep. 2022, doi: 10.1016/j.clema.2022.100123.
- [5] Z. Syahida Adnan, N. F. Ariffin, S. M. Syed Mohsin, y N. H. Abdul Shukor Lim, «Review paper: Performance of rice husk ash as a material for partial cement replacement in concrete», *Mater. Today Proc.*, vol. 48, pp. 842-848, ene. 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2021.02.400.
- [6] P. Sangeetha, M. Shanmugapriya, K. Santhosh Saravanan, P. Prabhakaran, y V. Shashankar, «Mechanical properties of concrete with seashell waste as partial replacement of cement and aggregate», *Mater. Today Proc.*, vol. 61, pp. 320-326, ene. 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2021.09.501.
- [7] H. Elbasiouny *et al.*, «Agricultural Waste Management for Climate Change Mitigation: Some Implications to Egypt», en *Waste Management in MENA Regions*, A. M. Negm y N. Shareef, Eds., en Springer Water. , Cham: Springer International Publishing, 2020, pp. 149-169. doi: 10.1007/978-3-030-18350-9\_8.
- [8] H. M. Hamada, F. Abed, B. Tayeh, M. S. Al Jawahery, A. Majdi, y S. T. Yousif, «Effect of recycled seashells on concrete properties: A comprehensive review of the recent studies», *Constr. Build. Mater.*, vol. 376, p. 131036, may 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131036.
- [9] «Materials | Free Full-Text | Impacts from Waste Oyster Shell on the Durability and Biological Attachment of Recycled Aggregate Porous Concrete for Artificial Reef». Accedido: 25 de agosto de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.mdpi.com/1996-1944/15/17/6117>
- [10] P. Nasaeng, A. Wongsas, R. Cheerarot, V. Sata, y P. Chindapasirt, «Strength enhancement of pumice-based geopolymer paste by incorporating recycled concrete and calcined oyster shell powders», *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 17, p. e01307, dic. 2022, doi: 10.1016/j.cscm.2022.e01307.
- [11] A. Hasnaoui, A. Bourguiba, N. Sebaibi, y M. Boutouil, «Valorization of queen scallop shells in the preparation of metakaolin-based geopolymer mortars», *J. Build. Eng.*, vol. 53, p. 104578, ago. 2022, doi: 10.1016/j.jobe.2022.104578.
- [12] A. Hasnaoui, A. Bourguiba, Y. El Mendili, N. Sebaibi, y M. Boutouil, «A preliminary investigation of a novel mortar based on alkali-activated seashell waste powder», *Powder Technol.*, vol. 389, pp. 471-481, sep. 2021, doi: 10.1016/j.powtec.2021.05.069.
- [13] G. O. Bamigboye, A. T. Nworgu, A. O. Odetoyan, M. Kareem, D. O. Enabulele, y D. E. Basse, «Sustainable use of seashells as binder in concrete production: Prospect and challenges», *J. Build. Eng.*, vol. 34, p. 101864, feb. 2021, doi: 10.1016/j.jobe.2020.101864.
- [14] M. J. Uddin, K. J. Smith, y C. W. Hargis, «Development of pervious oyster shell habitat (POSH) concrete for reef restoration and living shorelines», *Constr. Build. Mater.*, vol. 295, p. 123685, ago. 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123685.

- [15] J. Wang y E. Liu, «Upcycling waste seashells with cement: Rheology and early-age properties of Portland cement paste», *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 155, p. 104680, abr. 2020, doi: 10.1016/j.resconrec.2020.104680.
- [16] B. A. Tayeh *et al.*, «Durability and mechanical properties of seashell partially-replaced cement», *J. Build. Eng.*, vol. 31, p. 101328, sep. 2020, doi: 10.1016/j.jobbe.2020.101328.
- [17] B. Janković *et al.*, «Thermo-oxidative evolution and physico-chemical characterization of seashell waste for application in commercial sectors», *Thermochim. Acta*, vol. 686, p. 178568, abr. 2020, doi: 10.1016/j.tca.2020.178568.
- [18] J. Wang, E. Liu, y L. Li, «Characterization on the recycling of waste seashells with Portland cement towards sustainable cementitious materials», *J. Clean. Prod.*, vol. 220, pp. 235-252, may 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.02.122.
- [19] F. Soltanzadeh, M. Emam-Jomeh, A. Edalat-Behbahani, y Z. Soltan-Zadeh, «Development and characterization of blended cements containing seashell powder», *Constr. Build. Mater.*, vol. 161, pp. 292-304, feb. 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.111.
- [20] M. Olivia, R. Oktaviani, y Ismeddiyanto, «Properties of Concrete Containing Ground Waste Cockle and Clam Seashells», *Procedia Eng.*, vol. 171, pp. 658-663, ene. 2017, doi: 10.1016/j.proeng.2017.01.404.
- [21] «Improving the strength performance of high volume periwinkle shell ash blended cement concrete with sodium nitrate as accelerator | Journal of Civil Engineering, Science and Technology», may 2016, Accedido: 25 de agosto de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://publisher.unimas.my/ojs/index.php/JCEST/article/view/147>
- [22] J. R. Dankwah y E. Nkrumah, «Recycling Blends of Rice Husk Ash and Snail Shells as Partial Replacement for Portland Cement in Building Block Production», *Ghana J. Technol.*, vol. 1, n.º 1, Art. n.º 1, sep. 2016.
- [23] N. Nordin, Z. Hamzah, O. Hashim, F. H. Kasim, y R. Abdullah, «Effect of temperature in calcination process of seashells», *Malays. J. Anal. Sci.*, vol. 19, n.º 1, pp. 65-70, 2015.
- [24] M. Olivia, A. A. Mifshella, y L. Darmayanti, «Mechanical Properties of Seashell Concrete», *Procedia Eng.*, vol. 125, pp. 760-764, ene. 2015, doi: 10.1016/j.proeng.2015.11.127.
- [25] D. H. Nguyen, M. Boutouil, N. Sebaibi, F. Baraud, y L. Leleyter, «Durability of pervious concrete using crushed seashells», *Constr. Build. Mater.*, vol. 135, pp. 137-150, mar. 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.12.219.
- [26] P. Lertwattanaruk, N. Makul, y C. Siripattaraprat, «Utilization of ground waste seashells in cement mortars for masonry and plastering», *J. Environ. Manage.*, vol. 111, pp. 133-141, nov. 2012, doi: 10.1016/j.jenvman.2012.06.032.
- [27] J. F. A. Muñoz, «CÁLCULO DE LA HUELLA DE CARBONO ASOCIADA A LA ELABORACIÓN DE HORMIGONES GEOPOLIMÉRICOS EN CHILE.».
- [28] Instituto Nacional de Normalización, «Norma Chilena Oficial Nch 2256/1.Of2001 Morteros - Parte 1: Requisitos generales». Chile, 2001.
- [29] Instituto Nacional de Normalización, «Norma Chilena Oficial Nch 148 Cemento - Terminología, clasificación y especificaciones generales.» Chile, 1968.
- [30] Instituto Nacional de Normalización, «Norma Chilena Oficial Nch 158 Cementos - Ensayo de flexión y compresión de morteros de cemento». Chile, 1967.
- [31] Instituto Nacional de Normalización, «Norma Chilena Oficial Nch 163 Áridos para morteros y hormigones - Requisitos generales». Chile, 1979.
- [32] Instituto Nacional de Normalización, «Norma Chilena Oficial Nch 165 Áridos para morteros y hormigones - Tamizado y determinación de la granulometría». Chile, 2009.
- [33] Instituto Nacional de Normalización, «Norma Chilena Oficial Nch 1116 Áridos para morteros y hormigones - Determinación de la densidad aparente.» Chile, 1977.

- [34] Instituto Nacional de Normalización, «Norma Chilena Oficial Nch 1239 Áridos para morteros y hormigones - Determinación de las densidades real y neta y de la absorción de agua de las arenas.» Chile, 2009.
- [35] Instituto Nacional de Normalización, «Norma Chilena Oficial Nch 1498 Hormigón y mortero - Agua de amasado - Clasificación y requisitos». Chile, 2012.
- [36] Instituto Nacional de Normalización, «Norma Chilena Oficial Nch 2261 Morteros - Confección de probetas en obra y determinación de la resistencia a compresión». Chile, 2010.
- [37] Instituto Nacional de Normalización, «Norma Chilena Oficial Nch 2257/3.Of96 Morteros - Determinación de la consistencia - Parte 3: Métodos del asentamiento del cono». Chile, 1995.
- [38] Instituto Nacional de Normalización, «Norma Chilena Oficial Nch 1038 Hormigón - Ensayo de tracción por flexión». Chile, 2009.
- [39] G. Li, X. Xu, E. Chen, J. Fan, y G. Xiong, «Properties of cement-based bricks with oyster-shells ash», *J. Clean. Prod.*, vol. 91, pp. 279-287, mar. 2015, doi: 10.1016/j.jclepro.2014.12.023.
- [40] B. A. Tayeh, M. W. Hasaniyah, A. M. Zeyad, y M. O. Yusuf, «Properties of concrete containing recycled seashells as cement partial replacement: A review», *J. Clean. Prod.*, vol. 237, p. 117723, nov. 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.117723.
- [41] C. Rahul Rollakanti, C. Venkata Siva Rama Prasad, K. K. Poloju, N. M. Juma Al Muharbi, y Y. Venkat Arun, «An experimental investigation on mechanical properties of concrete by partial replacement of cement with wood ash and fine sea shell powder», *Mater. Today Proc.*, vol. 43, pp. 1325-1330, ene. 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2020.09.164.
- [42] SODIMAC, «Cemento CBB 25 kilos», Sodimac.cl. [En línea]. Disponible en: [https://sodimac.falabella.com/sodimac-cl/product/110308912/Cementos-Cbb-25-Kilos/110308931?gclid=Cj0KCQjw1aOpBhCOARIsACXYv-e55P3942k56ODDNn2gJap91R\\_rEcrR7mK6NFai0c73hgYmxU\\_Os5IaAnx9EALw\\_wcB&kid=shopp365fc&pid=Google\\_w2a](https://sodimac.falabella.com/sodimac-cl/product/110308912/Cementos-Cbb-25-Kilos/110308931?gclid=Cj0KCQjw1aOpBhCOARIsACXYv-e55P3942k56ODDNn2gJap91R_rEcrR7mK6NFai0c73hgYmxU_Os5IaAnx9EALw_wcB&kid=shopp365fc&pid=Google_w2a)
- [43] ESSBIO, «Tarifas agua potable», Tarifas de agua potable. [En línea]. Disponible en: [https://www.essbio.cl/pdf/banners/Despeje\\_Cobro\\_Boleta\\_Essbio.pdf](https://www.essbio.cl/pdf/banners/Despeje_Cobro_Boleta_Essbio.pdf)
- [44] ACBB, «Arena ACBB», Arenas Costanera Bio-Bío. [En línea]. Disponible en: <https://www.mercantil.com/empresa/abastecedora-arenas-costanera-bio-bio/hualpen/300061532/esp/>
- [45] Ministerio de Energía, «Tarifa de electricidad 2023», energia.gob.cl. [En línea]. Disponible en: <https://energia.gob.cl/noticias/libertador-general-bernardo-ohiggins/seremi-de-energia-informa-sobre-los-alcances-del-proyecto-de-ley-que-estabiliza-la-tarifa-de-electricidad#:~:text=Usuarios%20que%20registren%20un%20consumo%20mensual%20mayor%20a%20250%20y,2%20C5%20pesos%20por%20kWh.>

### Anexo A: Resultados de ensayo de flexo tracción.

En esta sección se presenta en detalle los resultados y mediciones del ensayo de flexo-tracción realizado en el Laboratorio de Hormigones del departamento de Ingeniería Civil. Los resultados para las edades de ensayo de 3, 7, 14 y 28 días se presentan en Tabla Anexo A. 1, Tabla Anexo A. 2, Tabla Anexo A. 3, Tabla Anexo A. 4.

**Tabla Anexo A. 1: Ensayos de flexo – tracción a la edad de 3 días.**

Código espécimen	Número de probeta	P (Lectura)	Ancho promedio [cm]	Alto promedio [cm]	Carga P [kgf]	Resistencia a la tracción [ $kgf/cm^2$ ]	Resistencia a la tracción [MPa]
<b>MR – 00</b>	1	34	3,93	4,07	130,85	72,42	7,10
	2	35	4,00	4,10	134,25	71,88	7,05
	3	32	4,00	4,13	124,05	65,35	6,41
<b>MR – 05</b>	1	24	3,97	4,07	96,85	53,15	5,21
	2	26	4,00	4,07	103,65	56,41	5,53
	3	25	3,97	4,10	100,25	54,12	5,31
<b>MR – 10</b>	1	27	4,00	4,00	107,05	60,22	5,91
	2	24	4,03	4,03	96,85	53,14	5,21
	3	28	4,03	4,03	110,45	60,60	5,94
<b>MRC – 00</b>	1	16	3,97	4,07	69,65	38,22	3,75
	2	14	4,00	4,03	62,85	34,77	3,41
	3	13	4,00	4,13	59,45	31,32	3,07
<b>MRC – 05</b>	1	13	3,97	4,10	59,45	32,10	3,15
	2	13	3,93	4,07	59,45	32,90	3,23
	3	8	3,97	4,10	42,45	22,92	2,25
<b>MRC – 10</b>	1	12	4,00	4,00	56,05	31,53	3,09
	2	11	4,03	4,03	52,65	28,89	2,83
	3	9	4,03	4,03	45,85	25,16	2,47

Tabla Anexo A. 2: Ensayos de flexo – tracción a la edad de 7 días.

Código espécimen	Número de probeta	P (Lectura)	Ancho promedio [cm]	Alto promedio [cm]	Carga P [kgf]	Resistencia a la tracción [ $kgf/cm^2$ ]	Resistencia a la tracción [MPa]
<b>MR – 00</b>	1	49	3,97	3,97	181,85	104,89	10,29
	2	49	3,93	4,00	181,85	104,02	10,20
	3	45	3,97	4,00	168,25	95,44	9,36
<b>MR – 05</b>	1	42	4,07	3,97	158,05	88,92	8,72
	2	45	3,97	3,93	168,25	98,70	9,68
	3	43	4,03	3,97	161,45	91,59	8,98
<b>MR – 10</b>	1	43	4,00	4,07	161,45	87,86	8,62
	2	49	4,00	4,13	181,85	95,80	9,39
	3	53	3,93	4,03	195,45	109,96	10,78
<b>MRC – 00</b>	1	40	3,97	4,07	151,25	83,00	8,14
	2	35	4,00	4,03	134,25	74,27	7,28
	3	42	4,00	4,00	158,05	88,90	8,72
<b>MRC – 05</b>	1	32	3,97	4,10	124,05	66,97	6,57
	2	34	3,93	4,07	130,85	72,42	7,10
	3	35	4,03	4,10	134,25	71,28	6,99
<b>MRC – 10</b>	1	29	4,00	4,00	113,85	64,04	6,28
	2	35	4,03	4,03	134,25	73,66	7,22
	3	35	4,03	4,03	134,25	73,66	7,22

Tabla Anexo A. 3: Ensayos de flexo – tracción a la edad de 14 días.

<b>Código espécimen</b>	<b>Número de probeta</b>	<b>P (Lectura)</b>	<b>Ancho promedio [cm]</b>	<b>Alto promedio [cm]</b>	<b>Carga P [kgf]</b>	<b>Resistencia a la tracción [<i>kgf/cm</i><sup>2</sup>]</b>	<b>Resistencia a la tracción [<i>MPa</i>]</b>
<b>MR – 00</b>	1	70	4,00	4,03	253,25	140,11	13,74
	2	85	3,97	4,00	304,25	172,58	16,92
	3	65	3,97	4,00	236,25	134,01	13,14
<b>MR – 05</b>	1	71	4,07	4,00	256,65	142,00	13,93
	2	70	3,97	3,97	253,25	146,07	14,33
	3	63	4,03	3,97	229,45	130,16	12,76
<b>MR – 10</b>	1	66	4,00	4,07	239,65	130,42	12,79
	2	66	4,00	4,07	239,65	130,42	12,79
	3	67	4,00	4,03	243,05	134,47	13,19
<b>MRC – 00</b>	1	46	3,97	4,00	171,65	97,36	9,55
	2	51	4,00	4,03	188,65	104,37	10,24
	3	48	4,00	4,03	178,45	98,73	9,68
<b>MRC – 05</b>	1	52	4,03	4,00	192,05	107,14	10,51
	2	49	3,93	4,07	181,85	100,64	9,87
	3	55	4,03	4,10	202,25	107,39	10,53
<b>MRC – 10</b>	1	45	4,00	4,00	168,25	94,64	9,28
	2	39	3,93	4,03	147,85	83,18	8,16
	3	44	4,03	4,03	164,85	90,45	8,87

Tabla Anexo A. 4: Ensayos de flexo – tracción a la edad de 28 días.

Código espécimen	Número de probeta	P (Lectura)	Ancho promedio [cm]	Alto promedio [cm]	Carga P [kgf]	Resistencia a la tracción [ $kgf/cm^2$ ]	Resistencia a la tracción [MPa]
MR – 00	1	77	4,00	4,03	277,05	153,28	15,03
	2	83	3,97	4,00	297,45	168,72	16,55
	3	75	3,97	4,00	270,25	153,29	15,03
MR – 05	1	80	4,07	4,00	287,25	158,93	15,59
	2	78	4,00	4,00	280,45	157,75	15,47
	3	85	3,97	3,97	304,25	175,49	17,21
MR – 10	1	89	4,00	4,00	317,85	178,79	17,53
	2	80	4,00	4,03	287,25	158,92	15,58
	3	76	4,03	4,03	273,65	150,14	14,72
MRC – 00	1	55	3,97	4,00	202,25	114,72	11,25
	2	62	4,00	4,03	226,05	125,06	12,26
	3	64	4,00	4,00	232,85	130,98	12,84
MRC – 05	1	65	4,03	4,00	236,25	131,79	12,92
	2	63	4,00	4,03	229,45	126,94	12,45
	3	63	4,03	4,00	229,45	128,00	12,55
MRC – 10	1	66	4,00	4,00	239,65	134,80	13,22
	2	61	4,00	4,03	222,65	123,18	12,08
	3	64	4,03	4,03	232,85	127,76	12,53