



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO INGENIERÍA MECÁNICA



**INFLUENCIA DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA DE FILLER CÁLCICO
DERIVADO DE CONCHAS DE ALMEJA EN MEZCLA CEMENTICIAS DE
MORTERO**

POR

Benjamín Antonio García Montecinos

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

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

diciembre 2024
Concepción (Chile)

© 2024 Benjamín Antonio García Montecinos

© 2024 Benjamín Antonio García Montecinos

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, quiero agradecer a mi profesora guía, la Doctora Meylí Valin, por su buena disposición cuando le consulté sobre temas de PIM y Memoria y por siempre ayudarme a aclarar mis dudas. También al profesor Luis Merino, quien me apoyó durante todo este último año con excelente disposición, siempre estuvo disponible cuando lo necesité y me brindó todas las herramientas necesarias para poder llevar a cabo este proyecto.

A las personas que conocí en el DIMET durante el período en que trabajé allí, especialmente a Erick, quien compartió todos sus conocimientos conmigo; a Meli, por su buena disposición para permitirme usar el laboratorio; y a don Patricio, quien fue la primera persona con la que hablé y siempre mostró su disposición a ayudarme, a pesar de no pertenecer a ese departamento.

A quienes me asistieron en el laboratorio de hormigones, Iván y don Carlos, por su buena actitud y por explicarme todo con detalle. Aprendí muchas cosas de áreas de la ingeniería que no se ven en mi carrera.

A los profesores del DIM, quienes me brindaron los conocimientos necesarios para llegar hasta aquí.

A todos mis amigos que me han acompañado durante toda la vida, desde el colegio: Mati, Seba, Santi y Joaqui. Aunque no siempre pudimos vernos durante estos años de estudio, siempre estuvieron para mí de alguna manera.

A todos los amigos que hice en la universidad, principalmente a Haidar, Vale, Nico, JP y Agustín, con quienes siempre nos ayudamos a estudiar, a hacer los trabajos y compartimos innumerables vivencias. A mis amigos de Civil Eléctrica, Nando y Gálvez, con quienes compartí muchos momentos al inicio de la carrera y con quienes sigo en contacto. Por último, a Lukas, a quien conocí mejor en los últimos años de carrera y fue un gran aporte, y a Gonzalo, con quien forjé una linda amistad recientemente. A todos los amigos que hice en el camino, les deseo mucho éxito. Todos fueron importantes en mi camino y espero que siempre mantengamos el contacto.

A mis padres, quienes siempre me brindaron su apoyo en todo lo que necesité; sin su esfuerzo y cariño, no habría podido llegar hasta aquí. No podría haber pedido unos padres mejores.

A mi abuela Ana, mi abuela Carmen, mi tío Pool, mi abuelo Luis y mi gata Domitila, quienes siempre me dieron cariño y apoyo.

A mi abuelo Armando (Q.E.P.D.), quien no pudo acompañarme físicamente en este camino universitario, pero sí en todo lo anterior. Siempre estaré agradecido por todo lo que me brindó y llevaré su recuerdo conmigo por siempre.

A mi pareja Antonia, con quien nos apoyamos mutuamente durante gran parte de nuestras carreras y que finalmente estamos culminando este proceso juntos para luego comenzar otro. Ha sido uno de los pilares fundamentales en mi vida desde que estamos juntos, y agradezco infinitamente su compañía.

Esta memoria está dedicada a mis amigos, a Antonia, a Domitila y sobre todo a mis padres, quienes me dieron todas las herramientas y amor que necesité y más.

Los amo

Resumen

Este estudio se enfocó en evaluar el uso de polvo de conchas de almeja como filler en mezclas de mortero, considerando diferentes granulometrías y tiempos de molienda para determinar su influencia en la resistencia a la compresión y a la flexo-tracción. Los resultados obtenidos destacaron que el tiempo de molienda es un factor crucial en el comportamiento mecánico de las mezclas, identificando que una molienda de 1,5 horas ofrece un balance óptimo entre la homogeneidad del material y la eficiencia energética.

En cuanto a la resistencia a la compresión, se observó que las mezclas con un 2,5% y 5% de agregado de polvo de conchas de almeja presentaron incrementos en algunos casos, mientras que en otros hubo disminuciones, dependiendo de las condiciones de molienda. La dosificación MAF-1,5h-2,5% fue la que logró la mejor resistencia a la compresión a los 28 días, destacándose por encima de las otras mezclas y del patrón. Por otro lado, la mezcla MAF-1,0h-2,5% también mostró un buen rendimiento, alcanzando un aumento en la resistencia en las 3 edades, siendo este el mejor resultado del estudio.

En términos de resistencia a la flexo-tracción se identifica que al usar una molienda de 1 h en ambos porcentajes de agregados la resistencia a la flexión por tracción mejora a partir de los 14 días

Desde una perspectiva medioambiental, el uso de conchas de almeja contribuye positivamente al manejo de residuos marinos y promueve prácticas de construcción más sostenibles. El aprovechamiento de este recurso natural no solo reduce la cantidad de desechos, sino que también disminuye la presión sobre los recursos no renovables y las emisiones derivadas de la extracción y procesamiento de materiales tradicionales.

El análisis económico de la producción de polvo de conchas de almeja reveló que, al usar esta alternativa como filler, es posible reducir costos en comparación con el uso de agregados plastificantes. Se estimó que el costo total de producción incluye los procesos de secado, chancado y molienda, y se demostró que la opción más económica es la molienda durante 30 minutos, seguido de la molienda de 1 h, lo que permite un ahorro en tiempo de uso de maquinaria y costos energéticos.

En conclusión, el uso de polvo de conchas de almeja como filler en morteros presenta ventajas económicas y medioambientales, y, con una correcta optimización de la granulometría y tiempo de molienda, es posible obtener un mortero con buen rendimiento mecánico. Este estudio sienta las bases para futuras investigaciones y aplicaciones, resaltando el potencial de los residuos marinos como componentes funcionales y sostenibles en la industria de la construcción.

Palabras claves: Mortero, conchas de almejas, resistencia a la compresión, resistencia a la flexotracción, granulometría.

Abstract

This study focused on evaluating the use of clam shell powder as a filler in mortar mixtures, considering different grain sizes and grinding times to determine its influence on compressive strength and flexural-tensile strength. The results highlighted that grinding time is a crucial factor in the mechanical behavior of the mixtures, with a 1.5-hour grinding period identified as providing an optimal balance between material homogeneity and energy efficiency.

Regarding compressive strength, mixtures with 2.5% and 5% additions of clam shell powder showed increases in some cases, while in others there were decreases, depending on grinding conditions. The MAF-1.5h-2.5% dosage achieved the highest compressive strength at 28 days, outperforming other mixtures and the control sample. The MAF-1.0h-2.5% mixture also demonstrated good performance, achieving increased strength at all three test ages, making it the best result in the study.

In terms of flexural-tensile strength, it was observed that using a 1-hour grinding time for both aggregate percentages improved flexural-tensile strength after 14 days.

From an environmental perspective, the use of clam shells contributes positively to marine waste management and promotes more sustainable construction practices. Utilizing this natural resource not only reduces waste but also lessens the demand for non-renewable resources and emissions associated with the extraction and processing of traditional materials.

The economic analysis of clam shell powder production revealed that using this alternative as a filler can reduce costs compared to plasticizing additives. The total production cost was estimated to include drying, crushing, and grinding processes, with 30-minute grinding being the most economical option, followed by a 1-hour grind, allowing for savings in machine usage time and energy costs.

In conclusion, the use of clam shell powder as a filler in mortars presents economic and environmental benefits, and with proper optimization of grain size and grinding time, it is possible to achieve a mortar with good mechanical performance. This study lays the foundation for future research and applications, emphasizing the potential of marine waste as a functional and sustainable component in the construction industry.

Keywords: Mortar, clam shells, compressive strength, flexural-tensile strength, granulometry.

Tabla de Contenidos

Tabla de Contenidos.....	iii
Lista de Tablas	v
Lista de Figuras	vi
Glosario	viii
1 CAPÍTULO 1: Introducción.....	1
1.1 Contexto.....	1
1.2 Planteamiento del problema	3
1.3 Objetivos.....	3
1.4 Hipótesis	3
1.5 Metodología.....	4
1.6 Resumen	4
2 CAPÍTULO 2: Marco teórico	5
2.1 Análisis granulométrico.....	5
2.2 Mortero	9
2.3 Ensayo	13
2.4 Resumen	19
3 CAPÍTULO 3: Estado del Arte	20
3.1 Mortero y agregados.....	20
3.2 Investigaciones de aditivos en la construcción.....	20
3.3 Uso de moluscos en la construcción.....	22
3.4 Resumen	26
4 CAPÍTULO 4: Metodología.....	27
4.1 Materiales	27
4.2 Análisis granulométrico.....	30
4.3 Dosificación.....	32
4.4 Confección.....	33
4.5 Ensayos	35
4.6 Resumen	36
5 Capítulo 5: Resultados	37
5.1 Granulometría.....	37
5.2 Cono de Abrams	40
5.3 Resistencia a la compresión.....	42

5.4 Resistencia a la flexión por tracción.....	44
5.5 Análisis económico.....	46
5.6 Resumen	47
6 Capítulo 6: Conclusiones	49
Referencias	50
1. Anexo A: Carta Gantt	55
2 Anexo B: Resultados de resistencia a la compresión.....	55
3 Anexo C: Resultados de resistencia a la flexión por tracción	62

Lista de Tablas

Tabla 1 Referencias normativas.....	10
Tabla 2 Granulometría filler del árido [21].....	11
Tabla 3 Grado de morteros según la resistencia especificada <i>f_m</i> , de compresión a 28 días[27].....	13
Tabla 4 Efecto del agregado de conchas marinas sobre una muestra de control (0%)	23
Tabla 5 Propiedades físicas de algunos moluscos usados en estudios (Adaptado de López [44]). ...	25
Tabla 6 Propiedades de la arena Bio Bio.	29
Tabla 7 Dosificación de mortero.....	33
Tabla 8 Dosificación final.....	35
Tabla 9 Asentamiento del Cono de Abrams para hormigón [58].	41
Tabla 10 Valores de referencia.....	46
Tabla 11 Valores de la dosificación para 1 [<i>m</i>³] de mortero.....	47
Tabla 12 Anexo B.1 Resistencia a la compresión de mortero patrón para agregado de 5%.....	55
Tabla 13 Anexo B.2 Resistencia a la compresión de mortero patrón para agregado de 2,5%.....	56
Tabla 14 Anexo B.3 Resistencia a la compresión de mortero con agregado MAF-0,5h.....	57
Tabla 15 Anexo B.4 Resistencia a la compresión de mortero con agregado MAF-1,0h.....	58
Tabla 16 Anexo B.5 Resistencia a la compresión de mortero con agregado MAF-1,5h.....	59
Tabla 17 Anexo B.6 Resistencia a la compresión de mortero con agregado MAF-2,0h.....	60
Tabla 18 Anexo B.7 Resistencia a la compresión de mortero con agregado MAF-2,5h.....	61
Tabla 19 Anexo C.1 Resistencia a la flexotracción de mortero patrón para mezcla de 5%.	62
Tabla 20 Anexo C.2 Resistencia a la flexotracción de mortero patrón para mezcla de 2,5%.	63
Tabla 21 Anexo C.3 Resistencia a la flexotracción de mortero con agregado MAF-0,5h.....	64
Tabla 22 Anexo C.4 Resistencia a la flexotracción de mortero con agregado MAF-1,0h.....	65
Tabla 23 Anexo C.5 Resistencia a la flexotracción de mortero con agregado MAF-1,5h.....	66
Tabla 24 Anexo C.6 Resistencia a la flexo tracción de mortero con agregado MAF-2,0h.....	67
Tabla 25 Anexo C.7 Resistencia a la flexotracción de mortero con agregado MAF-2,5h.....	68

Lista de Figuras

Figura 1 Lona para roleo [12].	5
Figura 2 Proceso de cuarteo [12].	6
Figura 3 Serie de tamices estándar [14].	7
Figura 4 Medida de asentamiento [28].	14
Figura 5 Formas de asentamiento [28].	15
Figura 6 Dispositivo de carga de probetas con dos puntos de carga [29].	16
Figura 7 Dispositivo de carga de probetas con punto central de carga [29].	17
Figura 8 Ensayo de compresión a la probeta [20].	18
Figura 9 Resistencia a la compresión a los 28 días de estudios con distintos tipos de filler. (Referencias: Acero[35], Arena de coral y escoria [36], Polvo reciclado[37], Piedra caliza [37], Concha de abanico[10], Concha de abanico + yeso[9]).	22
Figura 10 Edades de ensayo usadas en los estudios (adaptado de López et al.[44]).	25
Figura 11 Chancador de mandíbula General Electric.	27
Figura 12 Horno de secado Labtech Hebro.	28
Figura 13 Molino de bolas tipo Marcy.	28
Figura 14 Análisis granulométrico de la arena según normativa NCh165.	30
Figura 15 Paño para rolear.	31
Figura 16 Regleta para cuarteo.	31
Figura 17 Tamizadora Ro-Tap y serie de tamices.	32
Figura 18 Mezcladora de mortero.	34
Figura 19 Cono de Abrams.	34
Figura 20 Ensayo de compresión	36
Figura 21 Comparación de bandas granulométricas de polvo de conchas de almeja a 2,5 h de molienda.	38
Figura 22 Comparación de bandas granulométricas de polvo de conchas de almeja a 1,5 h de molienda.	38
Figura 23 Comparación de bandas granulométricas de polvo de conchas de almeja a 1,0 h de molienda.	38
Figura 24 Bandas granulométricas de polvo de conchas de almeja.	38
Figura 25 Comparación de bandas granulométricas de polvo de conchas de almeja a 0,5 h de molienda.	38
Figura 26 Comparación de bandas granulométricas de polvo de conchas de almeja a 2,0 h de molienda.	38
Figura 27 Comparación de bandas granulométricas de polvo de conchas de almeja a 4,0 h de molienda.	39
Figura 28 Comparación de bandas granulométricas de polvo de conchas de almeja a 3,0 h de molienda.	39
Figura 29 Bandas granulométricas del filler de conchas de almeja a usar en el estudio.	40
Figura 30 Resultados del Cono de Abrams.	40

Figura 31 Resistencia a la compresión a los a) 7 días b) 14 días y c) 28 días.....	42
Figura 32 Variación de la resistencia a la compresión respecto a la muestra patrón según el agregado de concha: a) 5% de agregado y b) 2.5% de agregado.....	43
Figura 33 Resultados de resistencia a la flexión por tracción a los a) 7 días b) 14 días c) 28 días....	45
Figura 34 Variación de la resistencia a la flexión por tracción respecto al patrón con a) 5% de agregado b)2,5% de agregado.....	45
Figura 35 Carta Gantt.....	55

Glosario

MAF-0,5h	:	Mortero con agregado de filler de conchas de almejas molidas por 0,5 h
MAF-1,0h	:	Mortero con agregado de filler de conchas de almejas molidas por 1,0 h
MAF-1,5h	:	Mortero con agregado de filler de conchas de almejas molidas por 1,5 h
MAF-2,0h	:	Mortero con agregado de filler de conchas de almejas molidas por 2,0 h
MAF-2,5h	:	Mortero con agregado de filler de conchas de almejas molidas por 2,5 h
Mpa	:	Megapascales
h	:	horas
CLP	:	peso chileno
kWh	:	kilowatt hora
ODS	:	Objetivos de desarrollo sostenible
mm	:	milímetros
kgf	:	kilogramos fuerza
cm	:	centímetros
g	:	gramos
L	:	litros
N	:	Newton
m^3	:	metro cúbico

CAPÍTULO 1: Introducción

Este capítulo introduce la problemática ambiental asociada con la extracción de recursos no renovables, como la arena y la caliza, utilizados en la elaboración de morteros, y la acumulación de desechos de conchas de moluscos provenientes de la industria pesquera. Se destaca la necesidad de reutilizar estos residuos ricos en carbonato de calcio como una alternativa sostenible en la construcción, contribuyendo a la reducción del impacto ambiental y promoviendo prácticas más responsables. Asimismo, se plantea la importancia de investigar las propiedades mecánicas de los morteros al incorporar este tipo de filler, dada la limitada información existente sobre su uso.

1.1 Contexto

La sostenibilidad, como desafío global, está profundamente integrada en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), demandando un equilibrio entre el bienestar social, el crecimiento económico y la protección ambiental. El progreso simultáneo en ciencia y tecnología, junto con el deterioro ambiental a nivel mundial, subraya la urgente necesidad de investigar formas de reutilizar materiales, incluyendo desechos industriales y agroindustriales, como recursos en la construcción civil. Recientemente, este concepto ha planteado un desafío significativo en la ingeniería, especialmente en lo que respecta a su aplicación efectiva en el diseño de nuevos materiales y en la creación de infraestructuras viales[1].

A lo largo de los siglos, el mortero ha sido un elemento recurrente en la construcción, desempeñando múltiples roles como revestimiento, adherencia en la unión de piezas prefabricadas y como material para reparaciones, entre otros usos. La elaboración de este material requiere la combinación de áridos, agua, cemento y, en ocasiones, agregados y complementos adicionales [2]. Los agregados se utilizan con el fin de mejorar las propiedades según las condiciones en las que se vaya a utilizar.

En la actualidad, los agregados usados en la construcción como filler más comunes son plastificantes y se han llevado a cabo estudios con polvo de piedra caliza, cal hidratada, etc. Dentro de estos, el uso del polvo de piedra caliza ha demostrado tener un rendimiento satisfactorio. Sin embargo, estos agregados son materiales naturales y no renovables. El continuo crecimiento de la urbanización incrementa la demanda de recursos naturales. A su vez, la extracción minera y el transporte masivo de minerales generan emisiones de gases de efecto invernadero de manera considerable y en aumento, alineándose con el actual modelo de desarrollo [3].

Por esta razón, existen estudios que emplean materiales reciclados como filler. Por ejemplo, Camargo-Pérez et al [1]. realizaron una investigación sobre el rendimiento mecánico al utilizar cenizas de cáscara de arroz recicladas como filler en mezclas asfálticas. Concluyeron que la dosis óptima de este agregado, para mantener las propiedades mecánicas y el rendimiento del mortero asfáltico, no debe exceder el 13,5% del peso total del mortero, bajo las condiciones de prueba y con los materiales utilizados.

Wei Wang et al [3]. Utilizó polvo de escoria pesada con alto contenido de titanio como filler sostenible e investigó su influencia en el rendimiento del mortero asfáltico comparándolo con el uso de piedra caliza. Dentro de las conclusiones del estudio está que los morteros con polvo de escoria, en comparación con el polvo de piedra caliza, presentó una superficie más rugosa y porosa, con partículas más pequeñas y mayor área superficial, favoreciendo un asfalto más estructurado. A pesar de su compleja composición química, no liberó elementos tóxicos y cumplió con los estándares de estabilidad y radiactividad.

Chile, con su extensa zona exclusiva de 200 millas náuticas, se destaca como un importante productor de recursos marinos, situándose entre los diez principales países en capturas pesqueras [4]. En 2016, el país registró una descarga de casi 2,9 millones de toneladas de recursos marinos, de los cuales el 37% provino de la acuicultura, destacando los moluscos que representan el 29% de esta cifra[5]. Las conchas de moluscos, ricas en óxido de calcio similar al de la cal, tienen aplicaciones en la construcción, pero son mayormente desechadas en vertederos o devueltas al mar, lo que genera impactos ambientales significativos, como la contaminación de aguas subterráneas por lixiviación y la alta mortalidad de la vida marina [6].

Dado su alto contenido mineral, las conchas de moluscos poseen dureza y rigidez, características que las hacen valiosas para estudios y aplicaciones en el campo de la construcción. Sin embargo, el desaprovechamiento de este recurso plantea problemas ambientales, como malos olores, proliferación de microorganismos, y contaminación marina, lo que subraya la necesidad de encontrar usos sostenibles para estos desechos [6].

Las conchas marinas han sido utilizadas de diferentes formas en investigaciones. Por ejemplo, John Martínez-Agurto [7] empleó residuos de concha de abanico como reemplazo de la arena en morteros, mientras que Ez-Zaki et al [8]. usaron sedimentos marinos y conchas de ostra como sustituto del cemento en morteros.

Sleyther A. De La Cruz Vega et al [9]. utilizaron conchas de abanico y yeso como agregado en mezclas de hormigón, de manera similar a García Ramírez et al [10]., quienes emplearon el mismo tipo de conchas como filler en mezclas de hormigón.

El aprovechamiento de conchas marinas en obras de construcción ofrece una solución práctica y ecológica. Reutilizar estas conchas como agregado en la construcción evita su disposición ilegal, mitigando el impacto ambiental negativo. Además, al sustituir fillers convencionales, se colabora a la disminución del impacto ambiental generado en la minería para la obtención de piedra caliza. Por otra parte, no existe gran cantidad de información acerca del uso de conchas marinas como filler en mortero.

1.2 Planteamiento del problema

La acumulación de residuos provenientes de la industria pesquera, como las conchas marinas, representa un desafío ambiental significativo. Estos desechos son frecuentemente descartados en vertederos, donde su degradación contribuye a la contaminación ambiental y a la emisión de gases de efecto invernadero. Además, la creciente demanda de materiales de construcción, como el mortero, ha intensificado la extracción de recursos naturales no renovables, como la arena y la caliza, lo que genera un impacto ambiental considerable. Esta situación plantea la necesidad de encontrar alternativas sostenibles que permitan reducir tanto la acumulación de estos residuos como la explotación indiscriminada de recursos naturales, abriendo camino a soluciones innovadoras en la industria de la construcción.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Determinar la influencia en la resistencia mecánica de un mortero al usar conchas de almeja como filler.

1.3.2 Objetivos específicos

OE1: Determinar los tamaños de partículas y porcentajes de agregado basado en el estado del arte.

OE2: Determinar las propiedades físicas de distintos tipos de grano.

OE3: Determinar las propiedades en estado fresco y en estado endurecido de probetas confeccionadas con el filler cálcico.

OE4: Analizar económicamente la viabilidad del uso de estos recursos.

1.4 Hipótesis

El uso de conchas de almeja como filler produce cambios en las propiedades mecánicas de la mezcla de mortero.

1.5 Metodología

Revisión de Literatura: Se llevará a cabo una revisión exhaustiva de la literatura para recabar datos de investigaciones previas que hayan explorado el uso de conchas marinas como agregado en mezcla de mortero. El foco estará en los efectos observados en las propiedades del mortero.

Molienda: Utilizando un molino de bolas, se realizarán distintos tipos de molienda variando el tiempo, para luego realizar los respectivos análisis granulométricos y ver como varían las propiedades mecánicas con distintos tamaños de grano agregados en la mezcla.

Evaluación Reológica: Utilizando el Cono de Abrams, se medirá la trabajabilidad de la mezcla fresca para entender cómo la adición de conchas afecta la reología del mortero.

Ensayos Mecánicos: Se realizarán pruebas de compresión y flexotracción para evaluar las propiedades mecánicas de las probetas con los distintos agregados.

Análisis de Resultados: Finalmente, se analizarán los datos obtenidos de los ensayos mecánicos, comparándolos con los resultados de estudios anteriores y una muestra de control para determinar la viabilidad del uso de conchas en mortero.

1.6 Resumen

En este capítulo se destaca que la sostenibilidad es un desafío global que requiere equilibrar el bienestar social, el desarrollo económico y la protección ambiental. Se plantea la necesidad de reutilizar materiales, incluidos los desechos industriales y agroindustriales, en la construcción para reducir el impacto ambiental de la explotación de recursos naturales como la arena y la caliza, que son esenciales en la elaboración de morteros. Además, se señala que las actividades mineras y el transporte de estos materiales generan emisiones de gases de efecto invernadero que contribuyen al deterioro ambiental.

Por otro lado, se identifica que Chile, como importante productor de recursos marinos, enfrenta un desafío con los desechos de conchas de moluscos, los cuales son desechados en vertederos o devueltos al mar, ocasionando contaminación y problemas ambientales. Dado su alto contenido de carbonato de calcio, las conchas poseen propiedades que podrían ser aprovechadas como filler en morteros, ofreciendo una alternativa sostenible. Sin embargo, se enfatiza la escasez de información sobre el uso de este material en la construcción, lo que subraya la importancia de investigaciones enfocadas en su viabilidad técnica y ambiental.

CAPÍTULO 2: Marco teórico

Dentro del marco teórico se definen los conceptos claves para llevar a cabo el proyecto. Además, se profundiza en ciertos aspectos como lo son las propiedades mecánicas de los morteros de cemento. Se presta atención a un aspecto crucial de dicha caracterización: los ensayos de compresión y flexotracción en las probetas, con un análisis de las normativas que rigen estos procedimientos. Estas normativas ofrecen directrices específicas que garantizan la coherencia y precisión de los datos obtenidos, facilitando así la comparación y el análisis con diversos estudios.

Es relevante señalar que los morteros pueden ser clasificados según su resistencia a la compresión, su consistencia, retención y otras características. Cada uno de estos aspectos resulta importante al evaluar y aplicar estos materiales de construcción.

2.1 Análisis granulométrico

La granulometría se ocupa de estudiar y medir los tamaños variados de las partículas que constituyen un material, como el suelo o un agregado. Este método se utiliza para examinar tanto el origen como las características mecánicas de los materiales sedimentarios. El proceso implica hacer pasar el material por una serie de tamices con aberturas de diferentes dimensiones para clasificar y cuantificar las partículas según su tamaño [11].

2.1.1 Cuarteo

El proceso de cuarteo inicia con el roleo el cual implica colocar la muestra sobre una lona y, posteriormente, tomar las esquinas opuestas de la lona de forma alternada para "mezclar" las partículas (ver Figura 1).

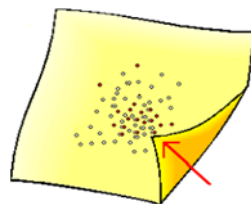


Figura 1 Lona para roleo [12].

En primer lugar, se deposita el material sobre la lona y se mezcla levantando dos esquinas opuestas al mismo tiempo, haciendo rodar la muestra sin que se deslice y evitando que el material se salga de la

lona. Este procedimiento se repite con las otras dos esquinas hasta lograr una mezcla homogénea del material.

Una vez homogeneizada la muestra, se forma un cono depositando el material en su vértice con una pala, permitiendo que se acomode de manera uniforme. A continuación, se crea un cono truncado insertando la pala en el vértice del cono original y girándola alrededor de su eje para desplazar el material hacia la periferia, hasta que la altura del cono sea de 15 a 20 cm. Luego, el cono truncado se divide en cuadrantes aproximadamente iguales, utilizando una regla adecuada al volumen de la muestra [13]. El proceso descrito anteriormente se visualiza en la Figura 2.

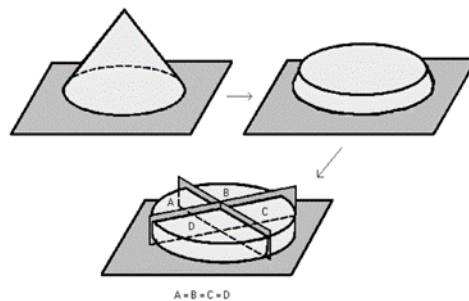


Figura 2 Proceso de cuarteo [12].

2.1.2 Serie de tamices

El método más habitual para llevar a cabo un análisis granulométrico consiste en exponer el sistema de partículas a la acción de la gravedad a través de una serie de tamices dispuestos en forma vertical. El tamiz con mayor apertura se sitúa en la parte superior y cada tamiz subsiguiente posee una malla con aperturas progresivamente más pequeñas. Las partículas atraviesan o quedan retenidas en los tamices dependiendo de su tamaño. Con el uso de "n" tamices, el sistema de partículas se divide en "n" categorías de tamaño. La Figura 3 muestra dicha descripción.

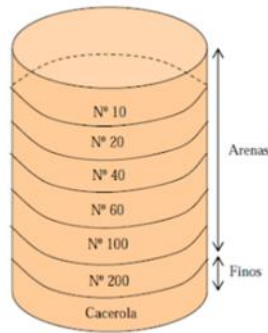


Figura 3 Serie de tamices estándar [14].

Los tamices empleados en el análisis granulométrico están estandarizados en relación con las aberturas de cada tamiz consecutivo. La Serie Normal se refiere a la serie de tamices donde el área de la abertura de un tamiz es el doble del área del tamiz siguiente. Dado que las aberturas de estos tamices son cuadradas, la distancia entre los alambres que conforman una abertura está en proporción de $\sqrt{2}$ respecto a la distancia en el tamiz siguiente. Debido a esta relación geométrica entre las distancias lineales de las aberturas de los tamices consecutivos, el tamaño medio de las partículas retenidas entre dos tamices se determina como el promedio geométrico de estas distancias.

$$\bar{x}_i = \sqrt{x_i \cdot x_{i+1}} \quad (1)$$

En una serie normal de tamices se cumple que $x_i = \sqrt{2}x_{i+1}$ el tamaño promedio es entonces,

$$\bar{x}_i = \frac{1}{\sqrt[4]{2}} x_i = 0,841x_i \quad (2)$$

Una serie doble se cumple $x_i = \sqrt[3]{2}x_{i+1}$ por lo tanto,

$$\bar{x}_i = \frac{1}{\sqrt[6]{2}} x_i = 0,917x_i \quad (3)$$

El x_i tamaño puede indicarse en milímetros, micrones o cualquier otra unidad. Es usual emplear el "tamaño de la malla" como referencia para la apertura de un tamiz. El tamaño de la malla se define por la cantidad de aberturas presentes en una pulgada lineal de tamiz. Dado que este número varía según el grosor del alambre con el que se fabrica el tamiz, la designación está estandarizada según normas internacionales como ISO, ASTM, Tyler, entre otras.

Normalmente, el tamizado se realiza durante 20 minutos. Al concluir este período, se cambia el fondo y se continúa tamizando por intervalos adicionales de 10 minutos, hasta que el material que atraviesa sea inferior al 0.5% del peso de la carga inicial. Este procedimiento está en conformidad con la norma ASTM D452 [15]. Si las pérdidas de material superan el 0.5% del peso original, el ensayo debe ser desechado.

2.1.3 Curva granulométrica

La representación gráfica del proceso de tamizado se conoce como curva granulométrica. En esta, se presenta el porcentaje de material que pasa por los tamices en el eje vertical, con una escala lineal, mientras que en el eje horizontal se muestra el tamaño de las partículas utilizando una escala logarítmica. Esta gráfica es un recurso visual clave para determinar si un suelo tiene una distribución de partículas adecuada o no [16].

2.1.4 Cálculo de los valores D10, D30 y D60

Los valores D_{60} , D_{30} y D_{10} corresponden a los tamaños de las partículas cuando el porcentaje pasante es 60%, 30% y 10% respectivamente[16]. Estos valores pueden ser calculados con una fórmula general para todo tipo de diámetro,

$$D_x = \frac{D_1 - D_2}{\log\%_1 - \log\%_2} * (\log\%_x - \log\%_1) + D_1 \quad (4)$$

Donde D_1 y D_2 corresponden al límite inferior y superior respectivamente de tamaños de abertura donde se encuentra el porcentaje pasante a calcular y D_x la abertura del tamiz por la que pasa el x% de la muestra. Esto también puede ser calculado gráficamente una vez obtenida la curva granulométrica, simplemente trazando líneas rectas que calcen con el tamaño de las partículas del porcentaje pasante y la curva mencionada anteriormente.

2.1.5 Coeficiente de uniformidad

El coeficiente de uniformidad mientras menor es, mayor uniformidad. Valores del coeficiente de uniformidad por debajo de 5 indican muestras uniformes, mientras que valores menores de 2.5 corresponden a muestras muy uniformes. Por ejemplo, las arenas de playa o las arenas eólicas suelen tener coeficientes de uniformidad menores de 2 [17]. En contraste, los suelos no uniformes, como los de origen glaciario, pueden presentar coeficientes de uniformidad superiores a 200. Este valor se calcula de la siguiente manera,

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (5)$$

2.1.6 Coeficiente de curvatura

El coeficiente de curvatura de la granulometría indica qué tan bien graduado está un material. Un material bien graduado tendrá menos porcentaje de huecos, lo que se traduce en una mayor densidad. Estos materiales son menos compresibles, más impermeables y fáciles de trabajar en la construcción [17]. Para que una muestra esté bien graduada, este coeficiente debe estar entre 1 y 3. Lo anterior se calcula,

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} * D_{60}} \quad (6)$$

2.2 Mortero

Un mortero es un material que se utiliza en la construcción y que consiste en una mezcla de cemento, arena y agua. Se emplea para unir bloques de construcción como ladrillos y piedras, y para rellenar los espacios entre ellos. Además, el mortero puede contener otros aditivos para mejorar sus propiedades, como incrementar de la resistencia a la compresión y la flexión a la tracción [18].

2.2.1 Requisitos para la fabricación de morteros

Los requisitos generales que deben cumplir todos los morteros, cuyo ingrediente principal es el cemento, están establecidos en la norma chilena NCh 2256. Además, esta normativa incluye requisitos específicos según el uso previsto en la construcción. En la Tabla 1 se visualiza un resumen de las normas.

Tabla 1 Referencias normativas.

Material	Norma	Título de norma
Cemento	NCh 148	Cemento – Terminología, clasificación y especificaciones generales[19]
	NCh 158	Cementos – Ensayo de flexión y compresión para morteros de cemento[20]
Áridos	NCh 163	Áridos para morteros y hormigones – Requisitos generales[21]
	NCh 164	Áridos para morteros y hormigones – Extracción y preparación de muestras[22]
	NCh 165	Áridos para morteros y hormigones – Tamizado y determinación de la granulometría [23]
	NCh 166	Áridos para morteros y hormigones – Determinación de las impurezas orgánicas en las arenas[24]

Agua	NCh 1498	Hormigón y mortero - Agua de amasado - Requisitos[25]
------	----------	---

2.2.2 Requisitos para el uso de filler en la construcción

La norma NCh 163 define al filler como un árido cuya mayor parte pasa por el tamiz de 0,075 mm y que se puede añadir a morteros y hormigones para obtener ciertas propiedades. Los requisitos se visualizan en la Tabla 2.

Tabla 2 Granulometría filler del árido [21].

Abertura del tamiz [mm]	% acumulado que pasa
2	100
0,125	85-100
0,075	70-100

2.2.3 Materiales para la confección de probetas

La preparación de probetas se rige por la norma NCh 2261[26] en la que se usan los siguientes materiales:

-Moldes prismáticos de 40 mm x 40 mm x 160 mm.

-Pisón, compuesto por una barra rígida de material no absorbente de sección cuadrada y de 12 mm \pm 1 mm de lado. La cara de apisonar es plana y perpendicular al eje del pisón y su masa es de 50 g \pm 1 g.

2.2.4 Curado inicial de las probetas

Una vez moldeadas, enrasadas y alisadas, las probetas deben recibir protección y el curado inicial en el mismo lugar o eventualmente pueden ser desplazadas inmediatamente, en forma cuidadosa y por el mismo personal que las ha moldeado, a un lugar cercano para ser sometidas al curado inicial, con la precaución de volver a alisar la superficie si esta ha sido alterada por el movimiento.

Durante el curado inicial de las probetas en obra se debe evitar siempre la pérdida de agua por evaporación y se debe mantener la temperatura de ellas entre 16°C y 27°C, desde el momento mismo del moldeado.

Para mantener la humedad y evitar la evaporación se debe usar, entre otros, alguno de los procedimientos siguientes o una combinación de ellos:

a) Inmediatamente después de ser moldeadas, enrasadas y alisadas, las probetas se deben mantener dentro de un recipiente con agua tranquila saturada de cal, de forma que siempre permanezcan sumergidas.

NOTA - En algunos casos, como por ejemplo morteros con cal aérea o morteros retardados, este método puede ser no recomendado.

b) Proteger el conjunto de probetas y moldes por todos sus 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.

2.2.5 Transporte, desmolde y curado en el laboratorio

Las probetas deben ser transportadas al laboratorio dentro de su molde, entre las 24 y 72 horas después de haber sido elaboradas, siempre que las condiciones de fraguado permitan su traslado sin daños. Es importante tomar las precauciones necesarias para mantener la temperatura de curado original y evitar impactos o vibraciones durante el transporte.

Una vez en el laboratorio, y siempre que el estado de fraguado lo permita, se deben desmoldar las probetas con cuidado para no dañarlas, no antes de 48 horas desde su fabricación. Mientras permanezcan en el molde, deben curarse a una temperatura de $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$, ya sea sumergidas en agua saturada de cal o en una cámara con una humedad relativa de al menos 95%.

Después del desmolde, las probetas deben almacenarse en las mismas condiciones de temperatura y humedad. Para saturar el agua con cal, se recomienda agregar 3 g/L de hidróxido de calcio.

2.2.6 Clasificación por grado de resistencia a la 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 de la probeta de 40 mm x 40 mm x 160 mm (RILEM), como se indica en la Tabla 3.

Tabla 3 Grado de morteros según la resistencia especificada f_m , de compresión a 28 días[27].

Grado del mortero	MPa
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

2.3 Ensayo

Las pruebas de flexo tracción y compresión son fundamentales para analizar las características mecánicas de un material. Ambos ensayos ofrecen información valiosa para el diseño de estructuras, permitiendo asegurar que los elementos construidos resistan las cargas previstas a lo largo de su vida útil, evitando fallos estructurales.

Las probetas deben ser extraídas del proceso de curado conforme a lo indicado en la norma NCh 1017, justo antes de ser sometidas a ensayo. Deben mantenerse cubiertas con material húmedo, como arpilleras, hasta el momento de su colocación en la máquina de pruebas.

Es importante que las pruebas se realicen siguiendo la norma NCh 158 para asegurar la precisión y validez de los resultados.

2.3.1 Cono de Abrams

La norma NCh1019 establece la metodología de ensayo que permite determinar la docilidad del hormigón o mortero fresco por el método de asentamiento de Cono de Abrams en laboratorio y en terreno[28].

El procedimiento indica que, inicialmente, se debe colocar el molde limpio y ligeramente humedecido sobre una superficie nivelada y estable, asegurándolo de manera firme durante el proceso de llenado. A continuación, se llena el molde en tres capas de igual espesor, compactando cada una con 25 golpes uniformes de la varilla de compactación. Después de compactar la última capa, se alisa la superficie y se retira el molde en posición vertical en un lapso de 5 segundos, procurando no generar alteraciones. Seguidamente, se mide el asentamiento, que es la distancia vertical entre la altura inicial y la posición final del centro del mortero, con una precisión de 0,5 cm. Todo el proceso, desde el inicio del llenado hasta la extracción del molde, debe realizarse de manera continua y completarse en menos de 2,5 minutos.

En caso de que el mortero se disgregue o la parte superior presente una inclinación considerable (≥ 5 cm de diferencia entre puntos), el ensayo deberá ser descartado y repetido con otra porción de la misma muestra. Si el problema persiste, se concluye que el mortero no tiene la plasticidad ni cohesión adecuadas para la prueba de asentamiento. Al finalizar el ensayo, toda muestra utilizada debe ser desechada.

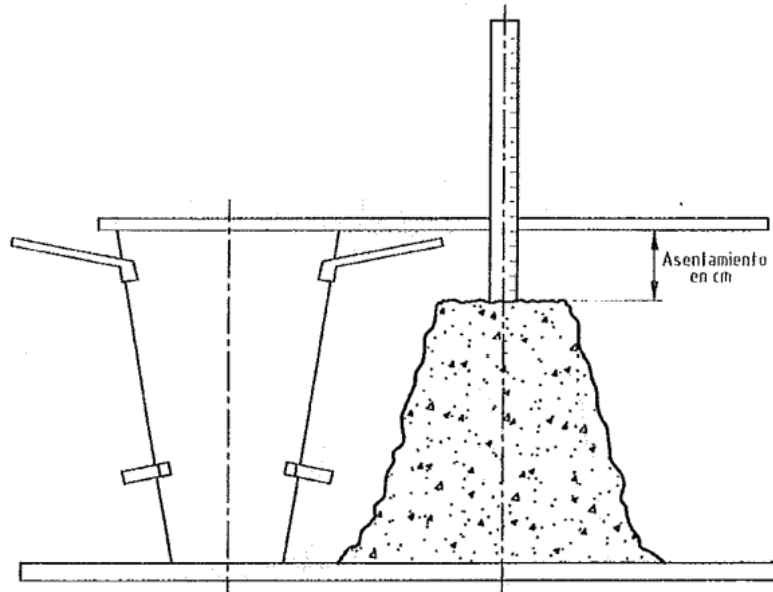


Figura 4 Medida de asentamiento [28].

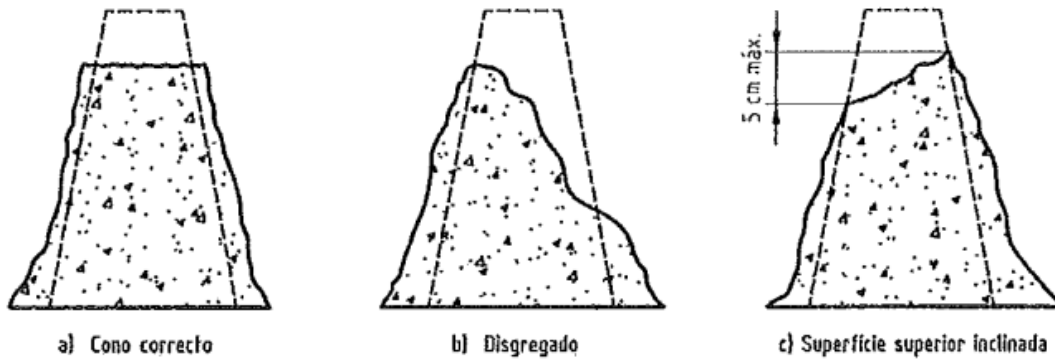


Figura 5 Formas de asentamiento [28].

2.3.2 Ensayo de tracción por flexión

La norma NCh 1038 establece los procedimientos para llevar a cabo el ensayo de tracción por flexión a la rotura de probetas prismáticas [29].

La máquina de ensayo deberá tener una precisión superior o igual al 1%. Contará con dos rodillos de 10 mm situados a una distancia de 100 mm ó 106,7 mm. Además, tendrá un rodillo equidistante de los de apoyo y del mismo diámetro que ellos. Los rodillos serán móviles alrededor de su centro para permitir una repartición uniforme de las cargas.

El ensayo se separa según la forma de aplicación de la carga.

- Ensayo con cargas $P/2$ en los límites del tercio central de la luz de ensayo

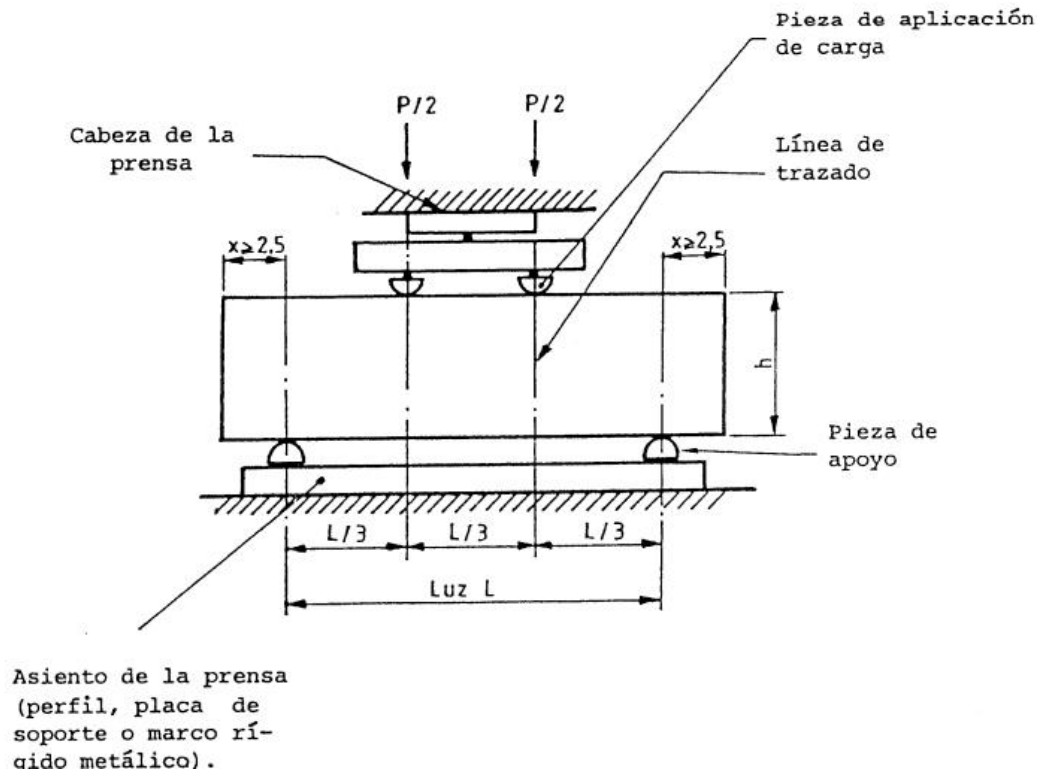


Figura 6 Dispositivo de carga de probetas con dos puntos de carga [29]

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

$$R = \frac{P * L}{b * h^2} \quad (7)$$

En que:

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:

$$R = \frac{3 * P * a}{b * h^2} \quad (8)$$

En que:

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, 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.

- Ensayo con carga P en el punto medio de la luz de ensayo.

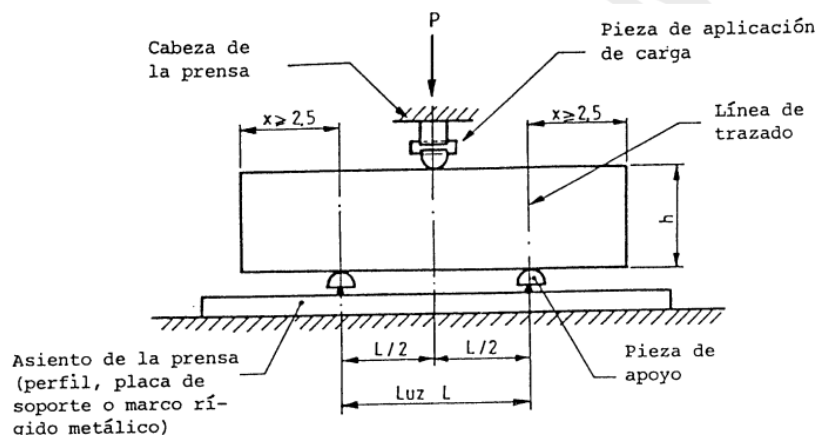


Figura 7 Dispositivo de carga de probetas con punto central de carga [29].

Esquema de ensayo de tracción por flexión con carga P aplicada en el centro de la luz

En este caso se utiliza la siguiente fórmula:

$$R = \frac{3 * P * L}{2 * b * h^2} \quad (9)$$

Se deben expresar los resultados en Megapascales, aproximado a 0,05 [MPa].

2.3.3 Ensayo de compresión

Según la norma NCh 158 [20] la máquina de ensayo deberá tener una precisión superior o igual al 1,5% en todo el intervalo de cargas utilizado en los ensayos. El dispositivo para colocar las probetas deberá contar con un sistema de placas, el cual se coloca entre los platillos de la máquina de ensayo a compresión y que constará de dos placas de presión, rectangulares, con las siguientes dimensiones:

- a) Espesor superior o igual a 10 mm;
- b) Ancho de $40 \pm 0,1$ mm;
- c) Longitud superior a 40 mm.

Las placas deberán ser de acero, con una dureza Vickers superior o igual a 600, o de carburo de tungsteno. Estarán guiadas sin frotamiento y una de ellas estará solidaria con un sistema de rótula y podrá inclinarse ligeramente (ver Figura 8).

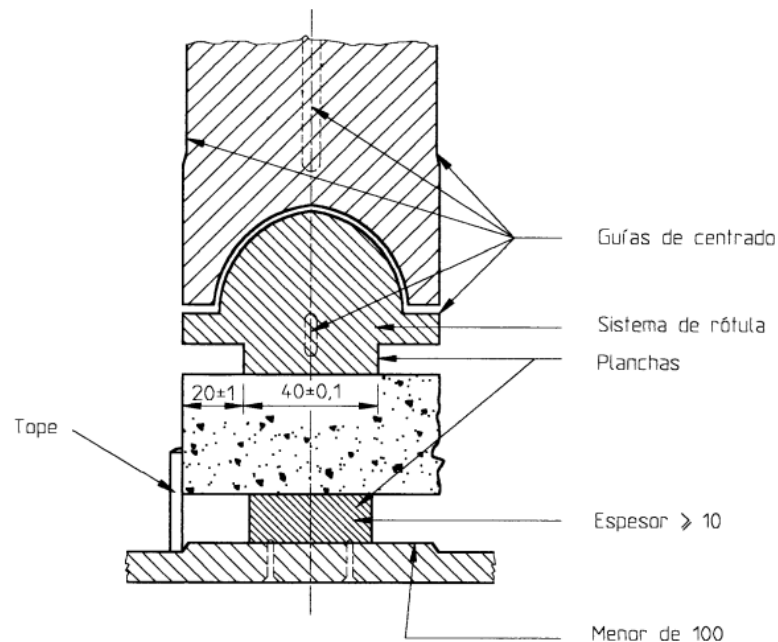


Figura 8 Ensayo de compresión a la probeta [20].

Las caras de las placas deberán ser planas con una tolerancia de 0,01 mm en la superficie de contacto. Cada trozo obtenido del ensayo a flexión se ensayará a la compresión en una sección de 40 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.

2.4 Resumen

En este capítulo, se concluye que el análisis granulométrico y las propiedades mecánicas del mortero son aspectos fundamentales para evaluar su desempeño y optimizar su composición. Se resalta que la distribución del tamaño de partículas del filler influye directamente en características como la resistencia y la trabajabilidad del material. Asimismo, se establece que los ensayos de compresión y flexión por tracción son herramientas esenciales para determinar la calidad del mortero y garantizar su capacidad para cumplir con los estándares normativos.

Se enfatiza que el cumplimiento de las normativas asociadas al uso de materiales como el filler es clave para garantizar la fiabilidad y sostenibilidad de los morteros. En particular, se subraya la importancia de un proceso adecuado de preparación, curado y ensayo de probetas para obtener resultados consistentes. Este marco teórico proporciona una base sólida para justificar la incorporación de materiales reciclados, como las conchas de almeja, en la construcción, promoviendo prácticas más sostenibles y alineadas con los desafíos actuales de la ingeniería civil.

CAPÍTULO 3: Estado del Arte

En este capítulo se presenta una revisión del estado del arte que aborda investigaciones previas sobre el uso de materiales reciclados en la construcción, con énfasis en los residuos marinos como las conchas de moluscos. Se exploran los beneficios mecánicos y ambientales asociados al empleo de estos residuos como filler o reemplazo parcial de componentes tradicionales en morteros y hormigones. También se analizan estudios que destacan las propiedades físicas, químicas y mecánicas de las conchas marinas, resaltando su potencial para mejorar la sostenibilidad en la construcción, a pesar de las variaciones en los resultados según el tipo de concha, el tamaño de las partículas y el porcentaje de incorporación utilizado.

3.1 Mortero y agregados

Hoy en día, y desde hace siglos, el mortero ha sido ampliamente empleado en la construcción. Entre sus principales usos se encuentran: el mortero para estuco, el mortero para unir elementos prefabricados y su función como material de reparación, entre otros. En su elaboración, los componentes clave son los áridos, el agua, el cemento, y en ocasiones, se incluyen aditivos o adiciones.

Dentro de los aditivos, se encuentran los de tipo filler, el cual corresponde a un material en polvo inerte que se incorpora a una base, como pintura, pigmento, adhesivo, plástico, papel, tela, cera hormigón o mortero. Los aditivos tienen varias funciones, como ampliar la matriz, suavizar el color, reducir costos, agregar volumen, incrementar la resistencia, optimizar la trabajabilidad o mejorar el desempeño general. Algunos ejemplos de materiales empleados como rellenos incluyen acrílico, carbonato de calcio, sulfato de bario, arcilla, tierra de diatomeas, fibras de vidrio, esferas de vidrio, yeso, arena, almidón, talco y dióxido de titanio [30].

Varios de estos agregados son extraídos por explotación minera, como la arena, gravilla y la piedra caliza. Esto genera un gran impacto ambiental en las geoformas, suelo, paisaje, calidad del aire, flora y fauna. Es por esto, que existen estudios que aprovechan distintos tipos de desechos y los usan como agregados para así, mejorar las propiedades mecánicas de los materiales de construcción y fomentar una economía circular.

3.2 Investigaciones de aditivos en la construcción

Haijun Tang [31] realizó un estudio sobre el uso de rocas volcánicas naturales (NVR) activadas mecánicamente como aditivo en compuestos cementicios. Descubrió que una activación mecánica de 45 minutos mejora las propiedades mecánicas de los compuestos cementicios, aumentando la actividad de la ceniza volcánica.

Khaoula Doughmi [32] investigó sobre la utilización de puzolana natural y residuos de mármol para mejorar la resistencia a la compresión, evidenciando un efecto sinérgico que optimiza el rendimiento mecánico. La densidad y los valores de velocidad de pulso ultrasónico (UPV) presentaron una correlación directa con esta resistencia, sugiriendo que una mayor densidad y UPV resultan en un mortero más robusto. Además, la incorporación de fibras plásticas mejoró significativamente las propiedades mecánicas, actuando como un refuerzo que incrementa la resistencia y durabilidad.

Md Azree Othuman Mydin [33] estudió el hormigón espumado ligero (LWF) con sustitución parcial de cemento por residuos industriales y agrícolas como escoria de alto horno granulada (GGBS), ceniza volante (FA), ceniza de cáscara de arroz (RHA) y ceniza de combustible de aceite de palma (POFA). La inclusión de estos materiales mejoró las propiedades del LWF, como la porosidad, la densidad aparente, la resistencia a la compresión, la resistencia a la flexión, la resistencia a la tracción por división, entre otros.

P. Krammart [34] investigó el uso de cenizas de incineradores de residuos sólidos municipales (MSWI) y residuos de carburo de calcio (CCW) como sustitutos parciales en las materias primas del cemento. Ambos tipos de cemento tienen una composición química similar al convencional, pero con algunas diferencias. La resistencia a la compresión de los morteros de cemento CCW es comparable al control, mientras que la de los morteros de cemento MSWI es menor, especialmente con un aumento del porcentaje de MSWI. Ambos cementos tienen una expansión menor en solución de sulfato de sodio que el convencional.

A continuación, se presenta una la Figura 9 con resultados del uso de filler de distintos tipos de materiales reciclados, en la que se puede apreciar que con agregados muy altos disminuye la resistencia a la compresión. Cabe destacar que todos los resultados están en megapascales y son con probetas a los 28 días de curado.

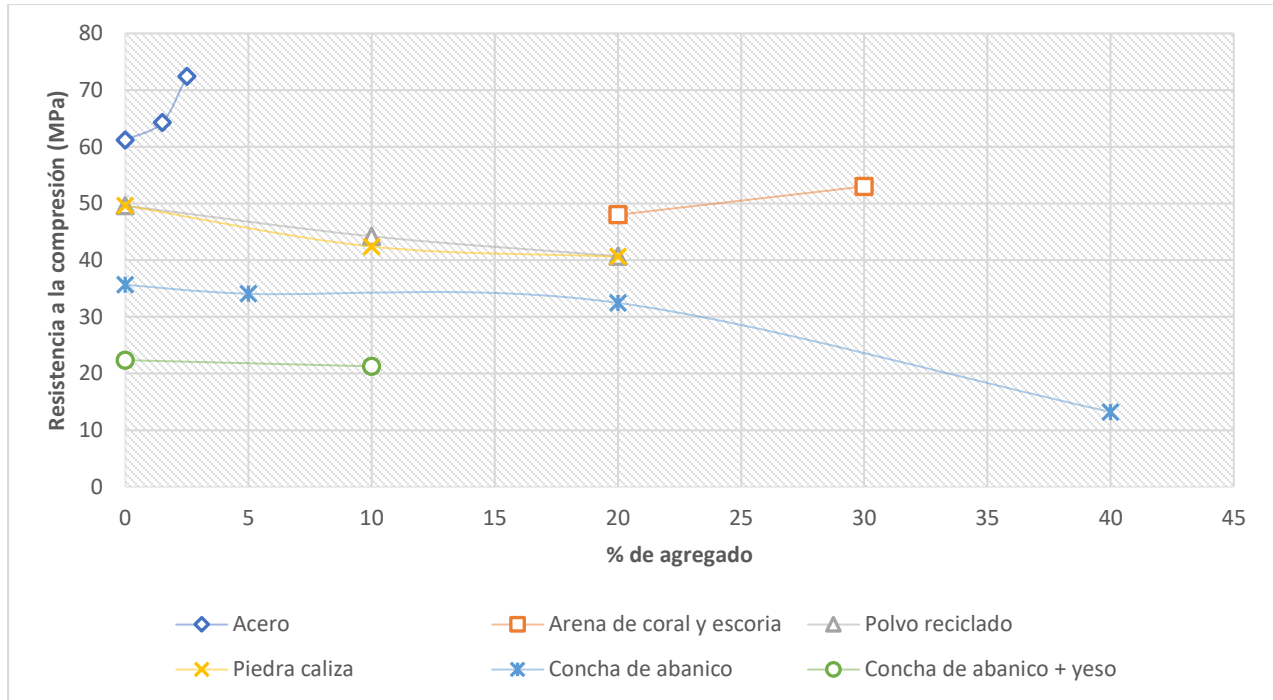


Figura 9 Resistencia a la compresión a los 28 días de estudios con distintos tipos de filler. (Referencias: Acero[35], Arena de coral y escoria [36], Polvo reciclado[37], Piedra caliza [37], Concha de abanico[10], Concha de abanico + yeso[9]).

3.3 Uso de moluscos en la construcción

Los moluscos han comenzado a ser utilizados como recurso en distintas partes del mundo, sobre todo en zonas costeras con intensa actividad pesquera. Esto se debe a que, a pesar de ser frágiles o semi frágiles y susceptibles a imperfecciones como porosidades y grietas, su alta dureza evita que dichos defectos se propaguen fácilmente.

Las conchas de moluscos están compuestas principalmente por material inorgánico, representando aproximadamente un 95% de su estructura, mayormente en forma de carbonato de calcio ($CaCO_3$), y un 5% de componentes orgánicos, en su mayoría proteínas [38]. De acuerdo con los ensayos de fluorescencia de rayos X realizados por Martínez et al. [39], se ha demostrado que la composición química de las conchas es similar, independientemente de la especie de molusco.

Chile, con una extensa zona económica exclusiva de 200 millas náuticas, se encuentra entre los diez principales países con abundantes recursos pesqueros. Durante el año 2023, se registró una extracción aproximada de 531.362 toneladas de moluscos en el país siendo la segunda especie con mayor extracción después de los peces [40]. Lamentablemente, este material está siendo desaprovechado, siendo arrojado en vertederos o devuelto al mar como desechos, lo que conlleva un significativo impacto ambiental. Estos residuos contienen restos de materia orgánica que se descomponen, generando malos olores y favoreciendo el crecimiento de microorganismos e insectos.

P. Sargent et al. [41] investigaron el uso de suelo excavado y conchas de vieira como materiales para fabricar morteros cementosos de bajo carbono. Dentro de las conclusiones cuenta que las conchas de vieira, cuando se usan en cantidades del 10%, produjeron resistencias a la compresión solo un 8% menores en comparación con mezclas equivalentes que contienen un 10% de cemento Portland tipo 1. Esto indica un potencial significativo para su uso en materiales de construcción sostenibles.

Abdelaziz Hasnaoui et al. [42] investigaron el efecto de incorporar residuos de conchas (SW) como reemplazo parcial del metacaolín (MK) en morteros geopoliméricos. Se demostró que la sustitución parcial de metacaolín (MK) por residuos de conchas de vieira (SW) en la fabricación de morteros geopoliméricos no solo es viable, sino que también conlleva mejoras significativas en las propiedades del material. La demanda de agua se reduce, lo que a su vez mejora la resistencia mecánica y disminuye la porosidad y la contracción.

Las conchas marinas se también se han usado como reemplazo de arena en morteros, esto lo explica el estudio de Brahim Safi et al. [43] en el que se usaron distintos porcentajes de reemplazo y se concluyó que las conchas marinas trituradas pueden reemplazar la arena como agregado fino en mortero autocompactante, sin comprometer sus propiedades esenciales. La fluidez mejora significativamente en morteros con 100% de conchas, aunque la resistencia a la compresión y el módulo elástico disminuyen ligeramente. El estudio macroestructural revela una buena adherencia entre las conchas y la pasta de cemento, con una distribución mejorada gracias a su forma angular.

López [44] realizó una publicación de un compilado de estudios con conchas marinas como reemplazo de cemento. De esta publicación se extraen datos relevantes como el de que la resistencia a la compresión fue la propiedad más estudiada, la cual disminuye a medida que aumenta el reemplazo en la mayoría de los casos, sin embargo, en algunos estudios esta aumentaba. Otro punto fundamental es el tamaño de grano que se utiliza, influye en las propiedades del hormigón, observándose menores disminuciones con reemplazos de 20-25% para agregado fino y 10-20% para agregado grueso. Una sustitución de hasta el 12.5% de agregados mixtos por conchas no afecta significativamente la resistencia, logrando resultados aceptables en comparación con los áridos convencionales.

En la Tabla 4 se visualiza los distintos tipos de conchas usados en los estudios, el tipo de agregado y la resistencia a la compresión a los 28 días. En la mayoría de los casos, cuando se utiliza un porcentaje de agregado muy alto, disminuye la resistencia a la compresión, por otra parte, cuando se utiliza un agregado fino, por lo general se obtienen mejores resultados que con agregado grueso.

Tabla 4 Efecto del agregado de conchas marinas sobre una muestra de control (0%)

Tipo de concha	Tipo de reemplazo	Porcentaje de reemplazo	Variación de la resistencia a la compresión (28 días)	Referencia
Vieira	Agregado fino	20%	0 a -7%	Varhen et al.[45]
		40%	-7 a -8%	
		60%	-3 a -10%	

Bígaro	Agregado grueso	25% 50% 100%	-19% -37% -67%	Ekop et al. [46]
Ostra	Agregado fino	5% 10% 20%	+13 a -8% +5 a -15% +2 a +1%	Yang et al. [47]
Vieira	Agregado fino y grueso	20% 40% 60%	-10% -20% -27%	Cuadrado-Rica et al. [48]
Bígaro	Agregado grueso	25% 50% 75%	-5 a -14% -12 a -27% -21 a -28%	Ettu et al.[49]
Bígaro	Agregado grueso	25% 50% 100%	-14 a -16% -32 a -38% -65 a -72%	Adewuyi [50]
Bígaro	Agregado grueso	10% 20% 30% 50%	-9 a -27% -25 a -60% -32 a -48% -63%	Falade et al. [51]
Bígaro	Agregado grueso	25% 50% 100%	- - -	Agbede & Joel [52]
Mejillón	Agregado grueso	25%	-17 a -23%	Martínez-García et al.[53]
		50%	-46%	
	Agregado fino	25% 50%	-32 a -37% -36 a 68%	
	Agregado fino y grueso	5% 12,5%	-8 a -18% -27 a -35%	
Crepidula	Agregado grueso	20% 40% 60%	+4 a -1% -13 a -15% -21 a -29%	Nguyen et al. [54]
Berberecho	Agregado grueso	25% 50% 75%	-14 a -20% -18 a -25% -30 a -38%	Khankhaje et al.[55]
Almeja	Agregado fino	10%	+7%	Raju et al. [56]
		20%	+3%	
		30%	-16%	

Las edades de ensayo más utilizadas en los estudios con conchas marinas se pueden ver en la Figura 10, en la cual, se revisaron 13 estudios y se tomó en cuenta las veces que se repetían las edades de ensayo. Se puede notar que las edades que más se repiten en los estudios son las de 7, 14 y 28 días, siendo esta última la edad final.

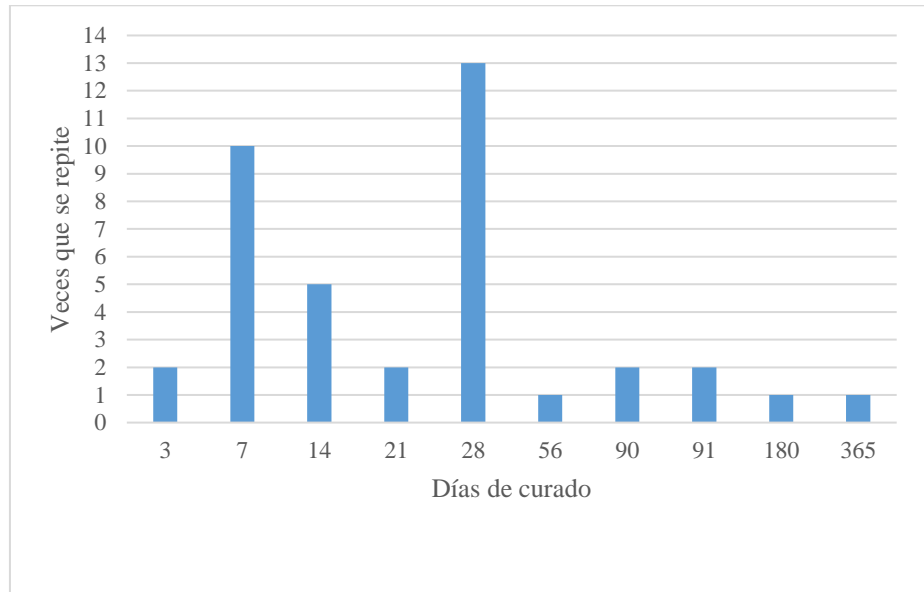


Figura 10 Edades de ensayo usadas en los estudios (adaptado de López et al.[44]).

Las propiedades físicas y mecánicas de las conchas usadas en estudios se visualizan en la Tabla 5.

Tabla 5 Propiedades físicas de algunos moluscos usados en estudios (Adaptado de López [44]).

Especie de molusco	Módulo de finura	Gravedad específica (kg/m^3)	Densidad aparente suelta (kg/m^3)	Densidad aparente compactada (kg/m^3)	Contenido de humedad	Absorción de agua
Bígaro	-	2.05 – 2.07	514	515 - 1353	1.1 – 8.32	9.03 – 12.99
Berberecho	-	2.09 – 2.64	-	1408 - 1420	-	0.1 – 2.5
Ostra	2.0 – 6.5	1.85 – 2.48	-	-	-	2.9 – 9.2
Mejillon	1.9 – 5.38	2.62 – 2.73	-	-	-	2.17 – 4.12
Vieira	4.4 – 4.57	2.5 – 2.64	1015	1224	0.3	1.88 – 3.65

Las conchas principalmente se obtienen de vertederos o del consumo después de extraer la parte comestible, luego se limpian, principalmente usando agua, cepillos y sin químicos adicionales para remover la suciedad y materia orgánica, tal como lo hicieron Varhen et al. [45]

Después de la limpieza, las conchas se secan al sol o, si es necesario, se someten a un tratamiento térmico para eliminar bacterias, como indica Martínez-García et al. [53], quienes recomiendan un secado en horno a 135 °C durante 32 minutos. Alternativamente, el secado al sol puede tomar de 5 a 10 días, o en horno a 50 °C durante 24 horas (H. Nguyen et al.[54]). Una vez secas, las conchas se trituran para alcanzar el tamaño adecuado como agregado fino o grava.

Según datos de Sernapesca, en 2023 en Chile se extrajeron 9.414 toneladas de almejas, siendo la tercera especie de moluscos más extraída a nivel país[40]. Sumado a lo anterior, la reciente actualización de la normativa NCh163 incluirá el uso de áridos reciclados y artificiales para reducir los pasivos ambientales, como los desechos que terminan en vertederos, y disminuir la extracción de áridos naturales debido a su escasez en las regiones más industrializadas, el uso adecuado de áridos alternativos contribuiría a aliviar la presión sobre este recurso natural[57].

Debido a lo anteriormente mencionado, este trabajo usará conchas de almeja, por a su abundancia en el país y el poco uso que se les ha dado en investigaciones. El agregado para analizar en mortero será de tipo filler, ya que, prácticamente no hay gran cantidad de estudios que usen conchas marinas como este tipo de agregado y es un tema que se trata en la actualización de la normativa NCh163. Por otra parte, la importancia del tamaño de grano es fundamental, por lo que este trabajo analizará distintas granulometrías de agregado fino, debido a que es el tipo de agregado que por lo general muestra mejores resultados en aplicaciones similares.

3.4 Resumen

En este capítulo, se concluye que el uso de materiales reciclados como aditivos o reemplazos parciales en morteros y hormigones ha sido ampliamente investigado, mostrando beneficios tanto en el desempeño mecánico como en la sostenibilidad ambiental. Se destaca que los estudios han evaluado diversos residuos, como cenizas, escorias y conchas de moluscos, los cuales han demostrado mejorar propiedades específicas del material, como la resistencia a la compresión y la densidad, dependiendo de la composición y la granulometría del agregado. Además, se señala que el uso de conchas marinas es una alternativa prometedora debido a su abundancia y su contenido mineral, lo que las convierte en un recurso sostenible para la industria de la construcción.

Sin embargo, se resalta que los resultados pueden variar significativamente según el tipo de concha, el porcentaje de reemplazo y el tamaño de las partículas. Aunque algunas investigaciones han demostrado una disminución en la resistencia a medida que aumenta el porcentaje de agregado, otras han encontrado mejoras en propiedades específicas, especialmente cuando se emplea como agregado fino. Este análisis del estado del arte confirma el potencial de las conchas marinas como filler en morteros y subraya la necesidad de optimizar su aplicación para maximizar los beneficios mecánicos y ambientales.

CAPÍTULO 4: Metodología

En el capítulo 4 se describe la metodología empleada para evaluar el uso de conchas de almeja como filler en morteros, siguiendo un enfoque experimental que asegura la reproducibilidad de los resultados. Se detalla el proceso de preparación de las conchas, que incluye limpieza, secado, chancado y molienda en diferentes tiempos para obtener granulometrías variadas. Además, se explican los procedimientos para la confección de probetas, el ajuste de la trabajabilidad mediante el Cono de Abrams y la realización de ensayos mecánicos de compresión y flexión por tracción. Todo el trabajo se lleva a cabo respetando normativas específicas para garantizar la validez de los resultados y analizar el impacto técnico y económico de esta alternativa sostenible.

4.1 Materiales

4.1.1 Conchas de almeja

Las conchas marinas corresponden a conchas de almejas conseguidas en el mercado municipal “La Poza” de Talcahuano. Dichas conchas se lavaron con agua y escobilla, para luego ser colocadas en un horno de secado fabricado en acero inoxidable AISI 304 por Labtech Hebro, modelo DO0.8ME de 9kW. Posterior al secado, se pasan por un chancador marca General Electric, modelo 5K182AG2 de 440 RPM una cantidad de 3 veces para obtener un tamaño apto para la molienda.



Figura 11 Chancador de mandíbula General Electric.



Figura 12 Horno de secado Labtech Hebro.

Las conchas ya secas, se muelen en un molino de bolas tipo Marcy, fabricado por EDEMET en acero AISI 316, con una capacidad de 5,4 litros y una velocidad de 130 rpm.



Figura 13 Molino de bolas tipo Marcy.

Este molino soporta 1 kg de material, por lo que se realizaron distintos tipos de moliendas, partiendo desde 30 minutos, hasta moliendas de 4 horas, diferenciando cada molienda por 30 minutos. Esto se

repetió 2 veces para obtener 2 kg de cada tiempo y comparar cuánto varía entre sí los granos para finalmente ser homogeneizados ambos kilos de cada hora.

4.1.2 Cemento

Se empleó un cemento especial de la marca BioBío, disponible en el laboratorio de hormigones del Departamento de Ingeniería Civil. Este cemento es de tipo puzolánico y de uso general, presentado en sacos de 25 kg y adquirido en el comercio local. Según el fabricante, sus especificaciones cumplen con los estándares establecidos en la norma NCh 148.

4.1.3 Agua

Para la preparación del mortero se usó agua potable proveniente de la red pública, la cual cumple con los requisitos de la norma NCh409. Cabe destacar que la confección se realizó en el mes de septiembre, ya que, al realizar la misma confección, pero en otra estación del año, el agua podría variar de temperatura y con esto las propiedades mecánicas del mortero.

4.1.4 Áridos

Para la confección se utiliza arena BioBío, la cual cumple con la normativa NCh 1239. Las propiedades físicas se visualizan en la Tabla 6.

Tabla 6 Propiedades de la arena Bio Bio.

Propiedades físicas	Valor
Densidad real árido saturado seco (kg/m ³)	2723,5
Densidad real árido seco (kg/m ³)	2676,2
Densidad neta (kg/m ³)	2808,9
Peso unitario suelto (kg/m ³)	1596,7

Peso unitario compactado (kg/m ³)	1672,7
Absorción de agua (%)	1,8%
Módulo de finura	2,1
Humedad en el día de confección	0,7%

La arena cumple con la normativa NCh 165 respecto a las bandas granulométricas. El análisis granulométrico se puede visualizar en la Figura 14.

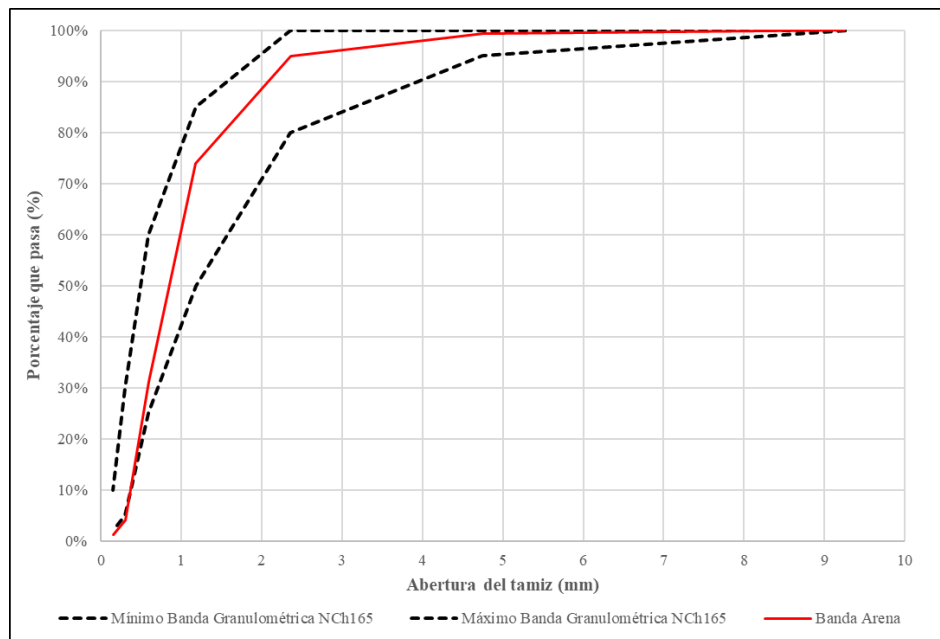


Figura 14 Análisis granulométrico de la arena según normativa NCh165.

4.2 Análisis granulométrico

Para realizar el análisis granulométrico en primer lugar realiza un proceso de cuarteo de la muestra, para lo cual, se utiliza una lona o paño para rolear la muestra y que esta se mezcle (ver Figura 15).



Figura 15 Paño para rolear.

Después del proceso de roleo, se forma un cono con la muestra y este se trunca con una regleta, como la que se puede ver en la Figura 16.



Figura 16 Regleta para cuarteo.

Se separa la muestra en cuatro cuadrantes y se quita el material de los cuadrantes opuestos utilizando una pala para muestreo. Este proceso se inició en unos casos con 1 o 2 kg de muestra para luego finalizar con una muestra representativa de aproximadamente 125 g para no saturar las mallas de los tamices al ser estas muy finas. Finalmente, la muestra se coloca en el tamiz superior en una serie de 7 tamices que comienza desde el tamiz número 08 hasta el 270 y se utiliza el tamizador Tyler Ro-Tap (ver Figura 17) que combina un movimiento giratorio horizontal de 270 a 300 rotaciones por minuto con 140 a 160 golpes en la tapa superior por minuto (Norma ASTM B-214). Cabe destacar que la

elección de tamices se basa en la norma NCh 163, para tenerla como referencia, pero dicha norma solo habla de filler pétreos, no cálcicos.



Figura 17 Tamizadora Ro-Tap y serie de tamices.

4.3 Dosificación

Para realizar las probetas se usó la dosificación que lleva incluida la corrección de árido por humedad que se calcula como,

$$\text{Contenido de humedad} = \frac{\text{Masa húmeda} - \text{Masa seca}}{\text{Masa seca}} * 100 \quad (10)$$

La dosificación obtenida se puede ver en la Tabla 7.

Tabla 7 Dosificación de mortero.

Material	Cantidad en kg
Cemento	1,295
Arena	3,910
Agua	0,690

Este cálculo es en base a que se pueden confeccionar 9 probetas por colada en 3 moldes. En el Departamento de Ingeniería Civil se usa una razón de 1:3:0.5 de cemento: arena: agua. Esta estimación incluye un error en el 15% del cálculo determinado empíricamente por el laboratorio de hormigones que se atribuye a la pérdida del material en el proceso de mezcla.

4.4 Confección

La confección comienza por el mortero patrón con la dosificación estipulada. Dicha confección está calculada para obtener un cono de Abrams de 2 cm aproximadamente, por lo que se le debe agregar un porcentaje de agua para que el cono aumente a 5 cm para poder tener un mejor rango para comparar con los morteros con agregado.

Luego de tener todo dosificado, comienza la mezcla en una mezcladora de mortero manual marca COTEST, en la cual se trabaja a una velocidad de 140 rpm. En primer lugar, se mezcla en seco por 5 segundos fijándose de perder la menor cantidad de material posible, luego se agrega un 80% aproximado del agua durante unos 10 segundos para finalmente vaciar lo restante y mezclar por 2 minutos (ver Figura 18).



Figura 18 Mezcladora de mortero.

Pasados los 2 minutos, se realiza el procedimiento del Cono de Abrams para medir la trabajabilidad, esto consiste en formar un cono con la mezcla, luego quitarlo y medir la altura de lo que quede de material con la altura del molde del cono como se puede ver en la Figura 19. Al realizar este procedimiento se obtuvo una trabajabilidad de 2 cm, por lo que se repitió el proceso agregándole agua hasta obtener un cono de 5 cm. La cantidad de agua adicionada es de un 20 %, por lo que, se debió ajustar a la dosificación.



Figura 19 Cono de Abrams.

Finalmente, la dosificación para los agregados se puede ver en la Tabla 8. Cabe destacar que se optó por agregados de 5% y 2,5% por cada hora de molienda para no afectar en exceso propiedades del mortero como la trabajabilidad. Por otra parte, los agregados a utilizar serán de 0.5h, 1h, 1.5h, 2h y 2.5h, esto debido a que existe una saturación del molino al realizar una molienda por más de 2.5h.

Tabla 8 Dosificación final.

Material	Patrón (kg)	MFA-5,0%	MFA-2,5%
Cemento	1,295	1,295	1,295
Agregado	0	0,065	0,0325
Arena	3,910	3,910	3,910
Agua	0,828	0,828	0,828

La confección se realizó en 2 días debido a la disponibilidad de moldes. Pasado los 3 días en cada caso, comienza el desmolde para luego dejar las probetas en la cámara de curado y ensayar a los 7, 14 y 28 días.

4.5 Ensayos

4.5.1 Ensayo de tracción por flexión

Este ensayo se realiza en un equipo de compresión simple adaptado con el dispositivo de flexión de mortero, este dispositivo se ubica en laboratorio de hormigones de la Universidad de Concepción. La carga se aplica a la mitad de la probeta y la lectura indica el desplazamiento. Para transformar el desplazamiento en fuerza se utiliza siguiente fórmula extraída de la norma NCh 158 determinada empíricamente,

$$P[\text{kgf}] = \text{lectura} * 3,4 + 15,25 \quad (11)$$

Este valor se introduce en la fórmula (9) para obtener la resistencia a la tracción.

4.5.2 Ensayo de compresión

La prueba de compresión fue llevada a cabo en el laboratorio de hormigones de la Universidad de Concepción, utilizando la máquina universal de ensayos Controls Sercomp 7 LH 01.00.B (ver Figura 20). La carga se aplicó a una velocidad de 0,3 MPa/s, ligeramente inferior a la velocidad estipulada en la normativa chilena, que es de 0,35 MPa/s. El ensayo se efectuó en las mitades de las muestras obtenidas tras finalizar la prueba de tracción por flexión. Finalmente se calcula el promedio de las 2 mitades de cada probeta para obtener el valor final.



Figura 20 Ensayo de compresión

4.6 Resumen

En este capítulo, se describe cómo fue diseñada y ejecutada la metodología para evaluar la influencia del uso de conchas de almeja como filler en morteros. Se establece que las conchas fueron sometidas a un proceso sistemático que incluyó limpieza, secado, chancado y molienda, con variaciones en los tiempos de molienda para obtener diferentes granulometrías. Estas granulometrías fueron analizadas según las normativas aplicables, asegurando un control riguroso de las muestras y su clasificación.

Asimismo, se explica que las probetas de mortero se confeccionaron siguiendo dosificaciones específicas, ajustadas según las propiedades del agregado y la trabajabilidad obtenida con el Cono de Abrams. Los ensayos mecánicos de compresión y flexión por tracción se realizaron en probetas curadas bajo condiciones controladas, permitiendo la comparación entre las mezclas con filler de conchas y el mortero patrón. Esta metodología garantiza resultados reproducibles y proporciona una base sólida para analizar la viabilidad técnica y económica del uso de conchas de almeja en la construcción.

Capítulo 5: Resultados

En este capítulo se encuentran los resultados obtenidos en esta investigación, haciendo énfasis en las curvas granulométricas, trabajabilidad, flexión por tracción, resistencia a la compresión y finalizando con un análisis económico y de viabilidad. En cada sección se encuentran análisis detallados de los resultados obtenidos, ya sea comparando resultados de este estudio o comparándolos con estudios revisados en la literatura.

5.1 Granulometría

El tipo de grano utilizado en este tipo de investigaciones influye en las propiedades mecánicas del material, lo que hace relevante la comparación entre distintas bandas granulométricas. En este caso, se emplearon diferentes tipos de agregado fino, dado que el estudio se enfoca en morteros. Para determinar las bandas granulométricas, se tomó como referencia la norma NCh 165, utilizando una serie de tamices que abarca desde una malla de abertura de 2 mm hasta una de 0,053 mm.

Las bandas granulométricas seleccionadas para este estudio se distinguen según diferentes tiempos de molienda, los cuales se representan en el eje X. Para cada tiempo de molienda, se procesaron 1 kg de conchas y el procedimiento se repitió dos veces, obteniendo 2 kg por cada intervalo de tiempo. Posteriormente, las bandas granulométricas de cada muestra se compararon entre sí (M1 y M2) y con la mezcla de ambas, con el objetivo de identificar posibles variaciones.

La nomenclatura utilizada distingue las muestras individuales de 1 kg como M1 y M2, seguidas por el tiempo de molienda. Las bandas que se indican únicamente con la hora de molienda (por ejemplo, "3 h") representan la mezcla de ambas muestras individuales para ese tiempo.

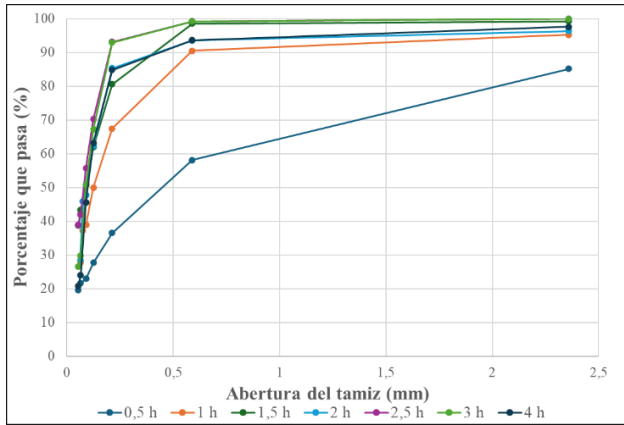


Figura 22 Bandas granulométricas de polvo de conchas de almeja.

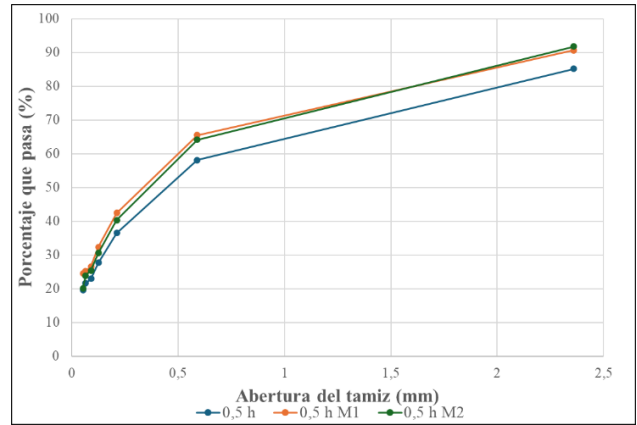


Figura 21 Comparación de bandas granulométricas de polvo de conchas de almeja a 0,5 h de molienda.

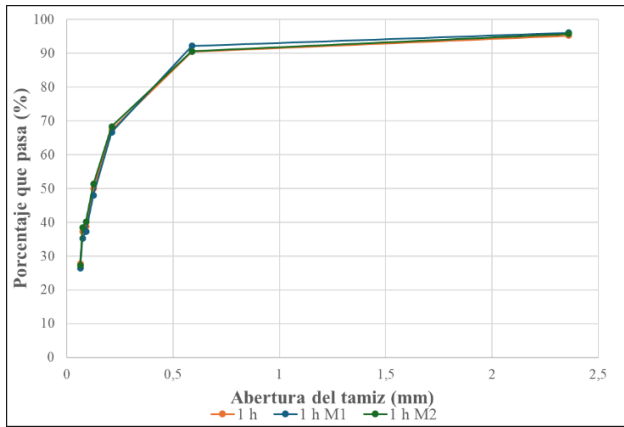


Figura 23 Comparación de bandas granulométricas de polvo de conchas de almeja a 1,0 h de molienda.

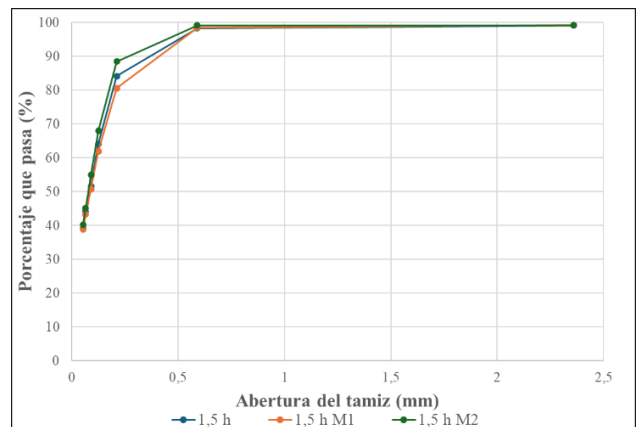


Figura 24 Comparación de bandas granulométricas de polvo de conchas de almeja a 1,5 h de molienda.

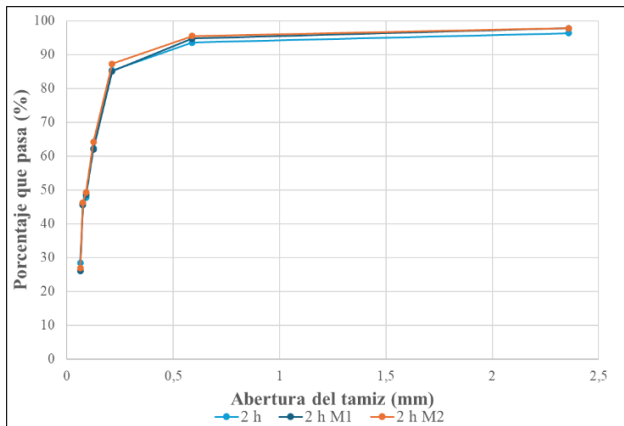


Figura 26 Comparación de bandas granulométricas de polvo de conchas de almeja a 2,0 h de molienda.

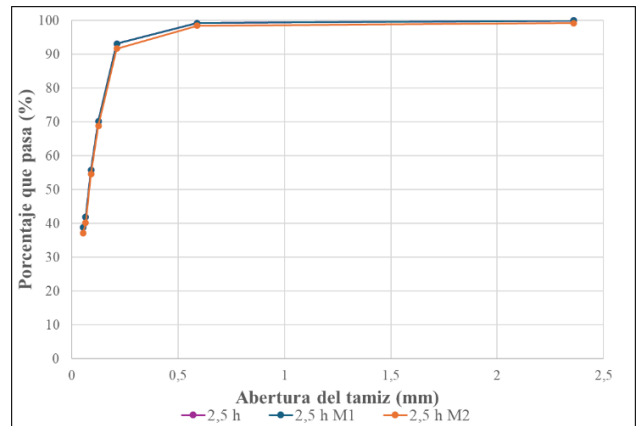


Figura 25 Comparación de bandas granulométricas de polvo de conchas de almeja a 2,5 h de molienda.

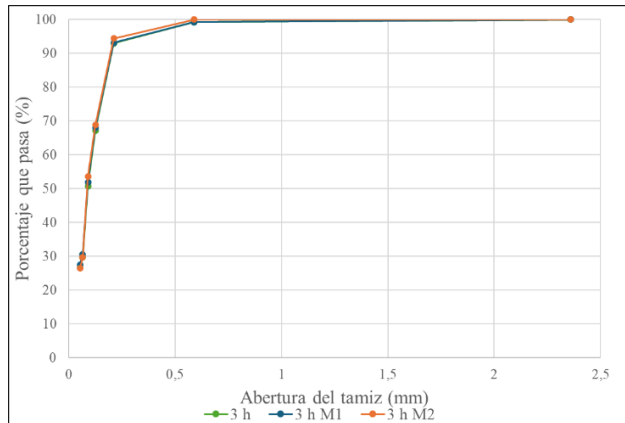


Figura 28 Comparación de bandas granulométricas de polvo de conchas de almeja a 3,0 h de molienda.

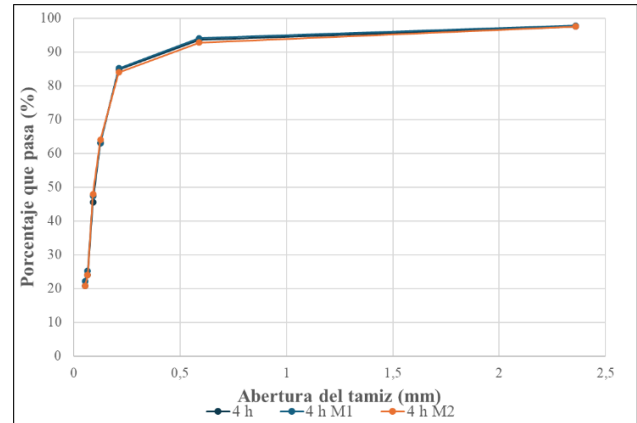


Figura 27 Comparación de bandas granulométricas de polvo de conchas de almeja a 4,0 h de molienda.

Los resultados mostraron una clara influencia del tiempo de molienda sobre la distribución del tamaño de partícula, donde se observó que durante la primera hora se produce la reducción de tamaño más significativa, evidenciada por un incremento pronunciado en el porcentaje de material que pasa por los tamices. Las curvas granulométricas revelaron que después de 1.5 horas de molienda, el proceso alcanza un estado de equilibrio, donde tiempos adicionales de molienda no producen mejoras sustanciales en la reducción del tamaño de partícula ni en la uniformidad del material. Es notable destacar que la molienda de 1.5 horas mostró un mejor rendimiento que la de 2 horas en los tamices de 2 y 0.589 mm, una variación que podría atribuirse a factores como la humedad de las conchas, las condiciones del molino o la heterogeneidad del material de partida. Se observó además un fenómeno de saturación del molino a las 2.5 horas, evidenciado por curvas granulométricas prácticamente idénticas a las de 3 horas, indicando una pérdida significativa de eficiencia. Las moliendas a 4 horas presentaron anomalías en sus resultados, mostrando una distribución granulométrica similar a la de 2 horas, lo que sugiere posibles irregularidades en el proceso. Es importante mencionar que la reproducibilidad de los resultados fue consistente para cada tiempo de molienda, con la excepción de las muestras de 0.5 horas, donde se observó una mayor variabilidad. Estos hallazgos sugieren que el tiempo óptimo de molienda se encuentra en torno a 1.5 horas, punto en el cual se logra un balance adecuado entre el grado de molienda, la uniformidad del producto y la eficiencia energética del proceso.

Para este estudio se tomarán en cuenta la mezcla de cada muestra, pero descartando las moliendas de 3 y 4 horas debido a que sufren el fenómeno de la saturación. Finalmente, las bandas granulométricas a usar se pueden ver en la Figura 29.

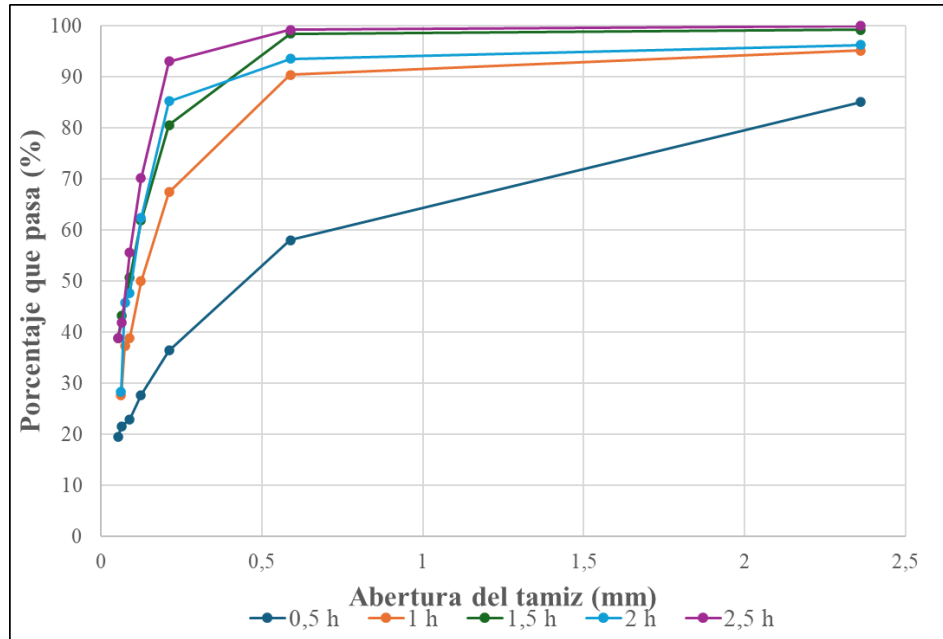


Figura 29 Bandas granulométricas del filler de conchas de almeja a usar en el estudio.

5.2 Cono de Abrams

Los resultados de las mediciones del Cono de Abrams se pueden visualizar en la Figura 30.

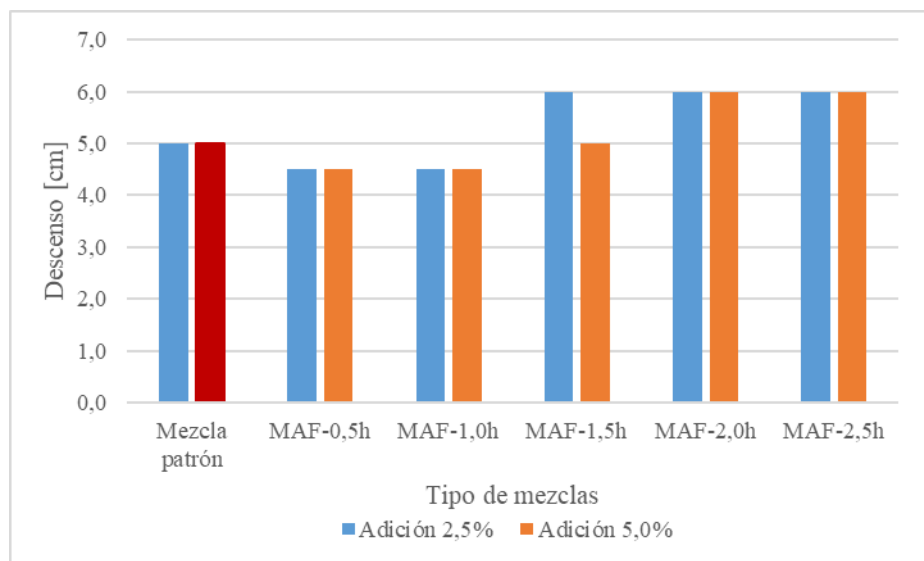


Figura 30 Resultados del Cono de Abrams.

Los resultados obtenidos del ensayo de asentamiento mediante el Cono de Abrams revelaron patrones significativos en el comportamiento del mortero al incorporar polvo de concha de almeja con diferentes tiempos de molienda. Partiendo de una mezcla patrón con un asentamiento base de 5 cm, se evidenció que el tiempo de molienda del polvo de concha de almeja ejerce una influencia directa sobre la trabajabilidad del mortero. Se observó una tendencia ascendente en los valores de asentamiento conforme se incrementaba el tiempo de molienda, alcanzando valores máximos cercanos a 6 cm cuando el tiempo de molienda se aproximaba a las 2.0 horas. Este comportamiento puede atribuirse a la reducción progresiva del tamaño de partícula, lo que genera un efecto de lubricación entre los agregados y mejora el empaquetamiento de la mezcla. Por otro lado, al analizar los porcentajes de adición (2.5% y 5%), se encontró que las mezclas con menor contenido de polvo de concha de almeja 2.5% presentaron mayores valores de asentamiento a partir del uso de granos con 1,5 h de molienda hasta 2,5 h, a diferencia del agregado de 5% que aumenta el valor de asentamiento al usar agregado con molienda de 2,0 h hasta 2,5 h. Esta diferencia podría explicarse por la mayor demanda de agua que requieren las partículas finas cuando se encuentran en mayor proporción, lo que afecta la consistencia final de la mezcla. Es importante destacar que después de las 2.0 horas de molienda, no se observaron mejoras significativas en la trabajabilidad, lo que sugiere que este podría ser un tiempo óptimo de procesamiento desde el punto de vista de la trabajabilidad del mortero.

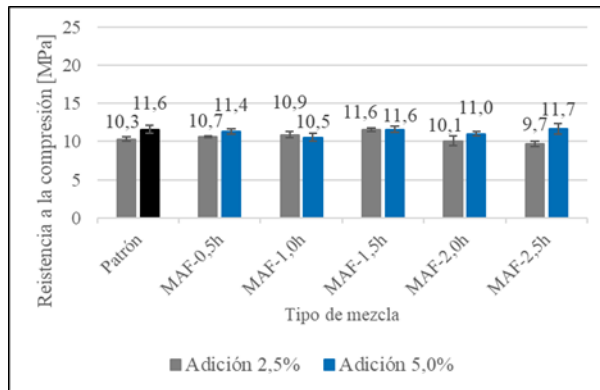
No existe una norma para describir el asentamiento en morteros, pero sí para hormigón, la cual se puede visualizar en la Tabla 9 extraída de la norma NCh 2257. Se pueden estimar parámetros con una relación entre las alturas del cono para hormigón (30 cm) y el cono para mortero (15 cm). Por lo que, en este caso, con granos más gruesos se tiene una consistencia blanda y con granos más finos es fluida.

Tabla 9 Asentamiento del Cono de Abrams para hormigón [58].

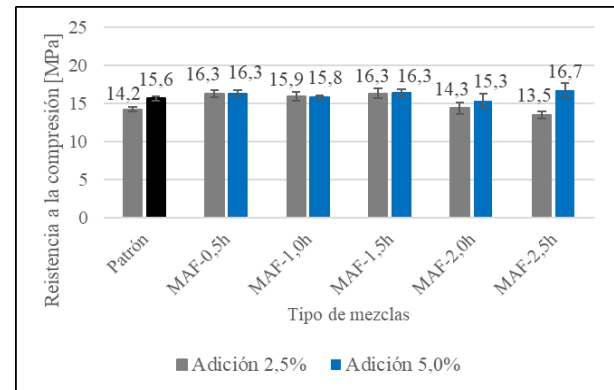
Consistencia	Asentamiento en [cm]
Seca	0 a 2
Plástica	3 a 5
Blanda	6 a 9
Fluida	10 a 15
Líquida	≥ 16

5.3 Resistencia a la compresión

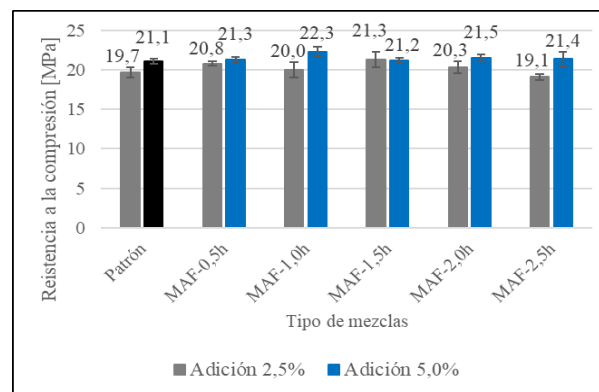
A continuación, se presentan los resultados obtenidos de la resistencia a la compresión en gráficos de barra.



(a)



(b)



(c)

Figura 31 Resistencia a la compresión a los a) 7 días b) 14 días y c) 28 días.

Utilizando los resultados anteriores se obtienen gráficos de cómo varía la resistencia a la compresión con respecto a la mezcla patrón.

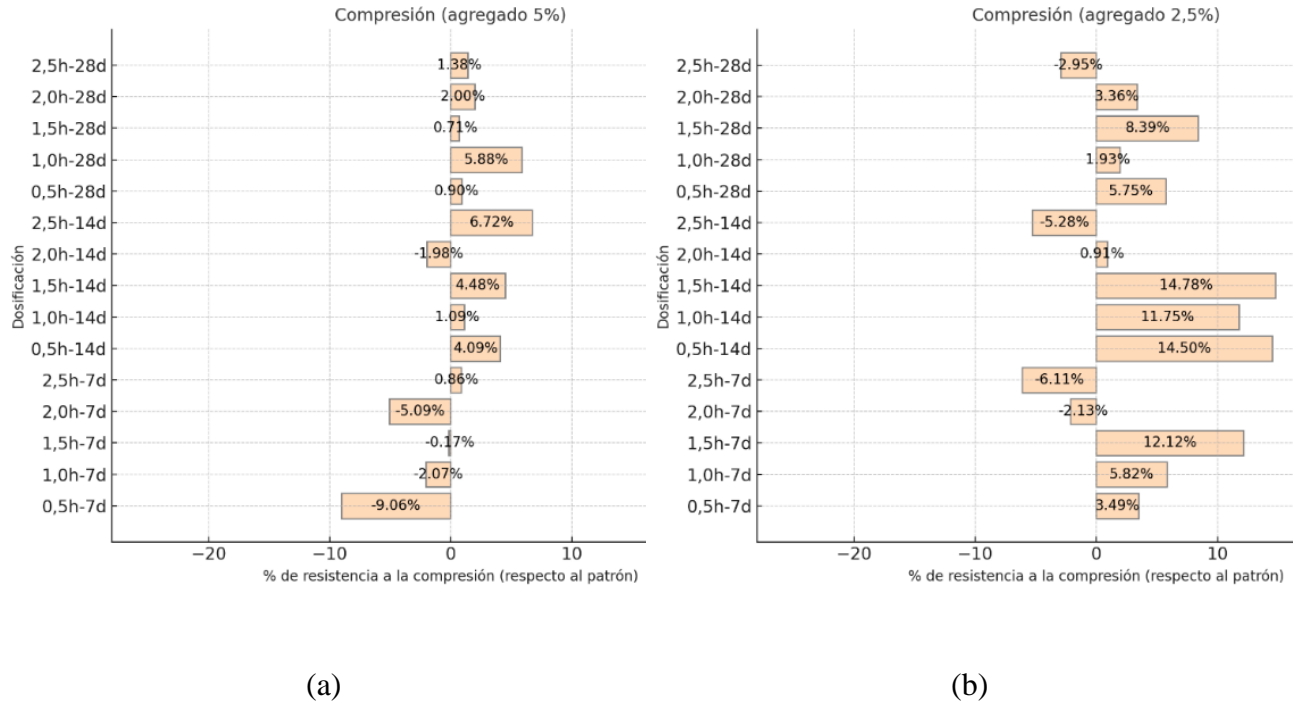


Figura 32 Variación de la resistencia a la compresión respecto a la muestra patrón según el agregado de concha: a) 5% de agregado y b) 2.5% de agregado.

Según los resultados obtenidos, se puede observar que los distintos tamaños de grano y porcentajes de agregado influyen significativamente en la resistencia a la compresión. Al ensayar probetas con 7 días de edad, se obtuvieron resultados más variados en comparación con las edades finales, destacando un aumento del 12,12% en la resistencia a la compresión respecto al patrón al usar conchas molidas durante 1,5 horas con un 2,5% de agregado. Esta tendencia se repitió a los 14 días, donde el mismo tipo de agregado mostró una mejora del 14,78% en la resistencia a la compresión. En la etapa final, la mayoría de los casos mostraron mejoras en la resistencia a la compresión, salvo el agregado del 2,5% molido durante 2,5 horas, que presentó una disminución del 2,95% respecto al patrón. Los mejores resultados con un 2,5% de agregado se obtuvieron con las moliendas de 1,5 y 0,5 horas, alcanzando incrementos del 8,39% y 5,75%, respectivamente en la edad final. Por otro lado, con un 5% de agregado, el mejor desempeño se logró con 1,0 hora de molienda, mostrando un incremento del 5,88% en la resistencia a la compresión. Al usar un agregado 2,5% de 1,0, 1,5 y 0,5 h de molienda se obtuvieron los resultados más consistentes, ya que, la resistencia aumenta en las 3 edades, por lo que este sería el caso más viable de usar en la construcción.

Es importante destacar que las mayores desviaciones estándar en las edades finales se observaron con un agregado del 2,5% molido durante 1 y 1,5 horas, con valores de 0,97 y 1,02 MPa, respectivamente. Asimismo, el uso de un 5% de agregado molido durante 2,5 horas presentó una desviación estándar de 0,89 MPa.

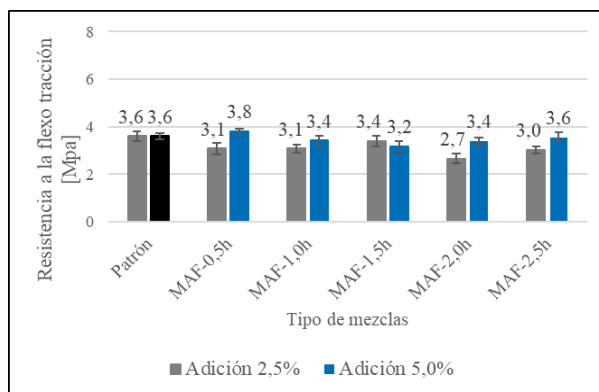
Los materiales usados como filler en la Figura 9 mostraron resultados variados y lo más parecido que hay en la literatura es el uso de polvo de conchas marinas en hormigón. Dicho esto, los resultados del

uso de polvo de conchas de abanico [10] como agregado en un 5%, la resistencia a la compresión disminuyó en un 4,4% en la edad final. Además de eso, en ese estudio se utilizó polvo de conchas con una granulometría inferior a 0,075 mm, lo que implica un mayor de molienda y de tamizado, por lo que, se produce un mayor gasto de electricidad a diferencia de usar agregados con molienda de 1,0, 1,5 y 0,5 h.

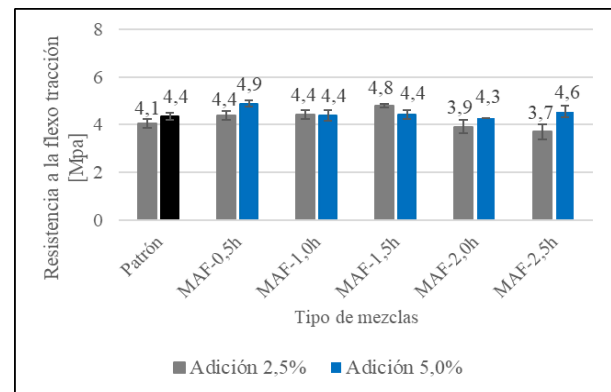
Por otro lado, al usar un agregado de mezcla de concha de abanico y yeso [9] en un 5% cada uno (10% de agregado en total), la resistencia a la compresión disminuyó en un 4,9%, lo que indica que al aumentar el porcentaje de agregado puede disminuir la resistencia a la compresión. Un caso similar sucede al usar piedra caliza [37] en un 10% de agregado, la resistencia disminuye 14,5% y al usarla en un 20% disminuye en un 18%. Esto confirma que, al usar porcentajes de agregado pequeños, es más probable obtener mejores resultados respecto a la resistencia a la compresión.

5.4 Resistencia a la flexión por tracción

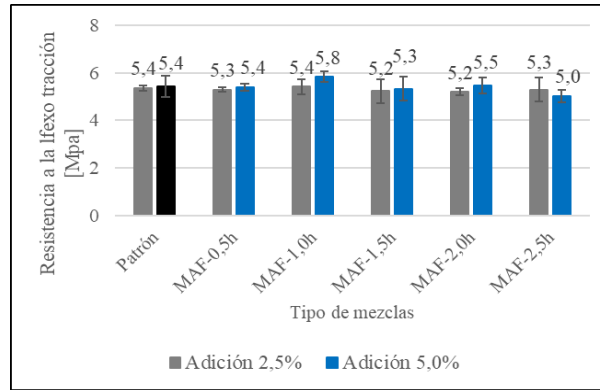
A continuación, se presentan los resultados obtenidos de flexión por tracción en gráficos de barras



(a)



(b)



(c)

Figura 33 Resultados de resistencia a la flexión por tracción a los a) 7 días b) 14 días c) 28 días.

Utilizando los resultados anteriores se obtienen gráficos de cómo varía la resistencia a la compresión con respecto a la mezcla patrón.

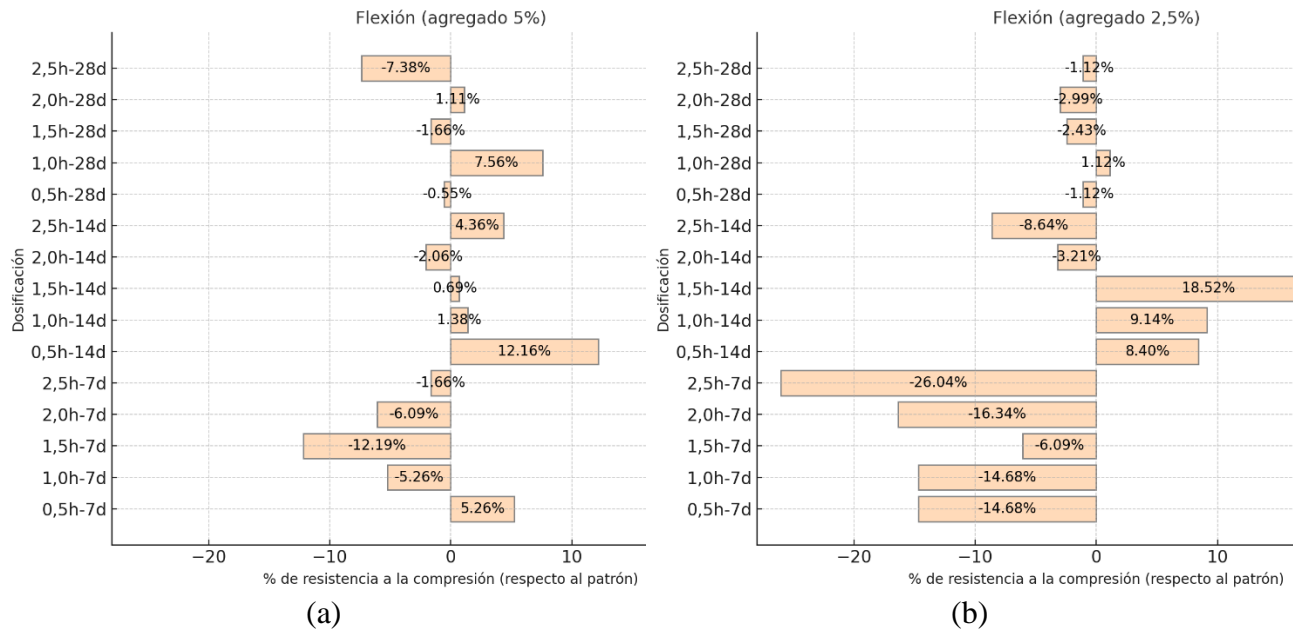


Figura 34 Variación de la resistencia a la flexión por tracción respecto al patrón con a) 5% de agregado b) 2,5% de agregado.

Los resultados indican que la resistencia a la flexión por tracción varía con los diferentes porcentajes de agregado y tamaños de grano. En el caso de un 2,5% de agregado, la resistencia aumenta solo un 1,12% en la etapa final al usar conchas molidas durante 1 hora. Por otro lado, con un 5% de agregado, se observa un incremento del 7,56% en la misma etapa con el mismo tiempo de molienda, siendo este

el mejor resultado obtenido a los 28 días. La desviación estándar es de 0,32 MPa para el primer caso y de 0,22 MPa para el segundo, lo que indica que, además de obtenerse mejores resultados con un 5% de agregado, los resultados son menos dispersos y más consistentes.

Según López [44], la resistencia a la flexión tiende a disminuir cuando se utilizan mayores porcentajes de reemplazo y granos de mayor tamaño. En el caso de emplear agregado como filler con granos muy finos, como los obtenidos tras 2,5 horas de molienda y con un 5% de agregado, se obtuvo una disminución de 7,38% respecto al patrón, siendo este el peor resultado en la edad final de las probetas. Sin embargo, en este análisis se identifica que al usar una molienda de 1 h en ambos porcentajes de agregados la resistencia a la flexión por tracción mejora a partir de los 14 días.

5.5 Análisis económico

En esta sección se realiza un análisis económico con el fin de comparar el costo por metro cúbico al fabricar morteros con agregados y su comparación con agregados plastificantes comúnmente usados en la construcción y fáciles de encontrar en el mercado. Estos agregados plastificantes se emplean cuando es necesario mejorar la trabajabilidad del mortero, logrando un mejor acabado en las piezas moldeadas y aumentando su resistencia mecánica. Incrementa la cohesión para evitar la segregación y refuerza la resistencia del mortero endurecido frente a las heladas. No altera los tiempos de fraguado ni de endurecimiento [59].

En este análisis se realizan estimaciones de gasto de electricidad de las diferentes máquinas y de tiempo para la obtención de polvo de conchas de almeja. En la Tabla 10 se encuentran los valores unitarios de cada material.

Tabla 10 Valores de referencia.

Material	Formato	Unidad	Precio (CLP)	Valor unitario (CLP/unidad)
Cemento	25	kg	3690[60]	147,6
Agua	1	L	1,4[61]	1,4
Arena	25	kg	2000[62]	80
Conchas de almeja	1	kg	4,2	4,2
Energía	1	kWh	2,5[63]	2,5
Agregado plastificante	1	L	13000[59]	13000

Estos costos se deben trasladar a valores proporcionales a 1 [m^3], para eso, se calcula el promedio de peso de 1 probeta que para este caso es 0,57 [kg], por lo que se requiere 2226,6 [kg] total de mezcla para 1 [m^3] de mortero. La cantidad de plastificante se calculó teniendo en cuenta que se debe agregar 0,01 L por cada 25 kg de cemento. En la Tabla 11 se presenta los valores para la dosificación de 1 [m^3] de mortero tomando en cuenta solo las mezclas que obtuvieron un mejor desempeño en los ensayos realizados.

Tabla 11 Valores de la dosificación para 1 [m^3] de mortero.

Material	Patrón	MAF-0,5h-2,5%	MAF-1,5h-2,5%	MAF-1,0h-5%	MAF-1,0h-2,5%	Plastificante
Cemento	\$70.516	\$70.516	\$70.516	\$70.516	\$70.516	\$70.516
Agua	\$428	\$428	\$428	\$428	\$428	\$428
Arena	\$115.399	\$115.399	\$115.399	\$115.399	\$115.399	\$115.399
Agregado	-	\$69	\$80	\$148	\$74	\$2.484
Total	\$186.344	\$186.412	\$186.423	\$186.491	\$186.418	\$188.828
Encarecimiento respecto al patrón	-	0,037%	0,043%	0,08%	0,04%	1,34%
Ahorro respecto al plastificante	-	1,28%	1,28%	1,24%	1,27%	-

De la Tabla 11 se concluye que el uso de agregados no encarece significativamente la fabricación de 1 [m^3] de mortero, y la opción más económica es el polvo de conchas molido durante 30 minutos, ya que reduce el tiempo de uso del molino respecto a las otras. Al usar 2,5% de agregado con 1 h de molienda se encarece en un 0,04% con respecto al patrón, en un 0,003% con respecto a la opción más económica y se puede ahorrar un 1,27% en vez de usar plastificante.

5.6 Resumen

Este capítulo concluye que el tiempo de molienda óptimo es de 1,5 horas, ya que a las 2,5 horas se alcanza el punto de saturación máxima, mientras que las moliendas inferiores a 1,5 horas presentan una mayor variación al comparar las bandas granulométricas.

En términos de trabajabilidad, se observa una disminución al utilizar filler más grueso (0,5 y 1,0 horas), mientras que esta mejora progresivamente con fillers más finos, superando incluso a la mezcla

patrón con moliendas de 2,0 y 2,5 horas. En cuanto a los ensayos mecánicos, la mejor alternativa corresponde a los agregados de tamaño intermedio; específicamente, el agregado al 2,5% con 1 hora de molienda obtuvo resultados positivos en resistencia a la compresión en las tres edades evaluadas, además de un incremento en la resistencia a la flexión a partir de los 14 días.

Por último, el análisis económico demuestra que el uso de conchas de almeja no encarece significativamente la fabricación del mortero y resulta más rentable en comparación con el uso de plastificantes.

Capítulo 6: Conclusiones

A partir de este trabajo se determinó la influencia de utilizar conchas de almeja como filler en la resistencia mecánica de un mortero para edades de 7, 14 y 28 días, y en cantidades 2.5% y 5% de agregado, obteniéndose las siguientes conclusiones.

Se analizó la variación en el tamaño de partícula según el tiempo de molienda, donde se percibió que para tiempos mayores a 2.5 horas está no presentaba una disminución representativa, por lo que se llega al punto de saturación. Al pasar de una molienda de 0,5 h a 1 h se obtuvo un porcentaje pasante por la abertura de 2,36 mm de 85% a 95%, siendo este, el mayor cambio en las curvas.

Se determinó que lo óptimo es utilizar agregados de tamaño intermedio, ya que el agregado de 2,5% con 1 hora de molienda obtuvo resultados positivos en resistencia a la compresión para las tres edades de ensayo y mejoró la resistencia a la flexión a partir de los 14 días. Este agregado presenta un 95% de partículas que pasan por una abertura de 2,36 mm y un 37,3% de partículas ultrafinas (abertura de 0,075 mm), lo que permite una mejor compactación de la matriz del mortero.

El análisis económico reveló que la incorporación de conchas de almeja no encarece significativamente la producción de mortero, encareciéndolo en un 0,043% y en un 0,08% al usar 2,5% y 5% respectivamente de agregado de 1 h de molienda. Al compararlo con un agregado comúnmente usado que es tipo plastificante, se puede ahorrar entre un 1,24% y un 1,27% usando conchas de almeja.

Otro tipo de valor agregado que tiene el uso de conchas de almeja como filler es desde un punto de vista ecológico ya que contribuye a la reducción de residuos marinos que, de otro modo, serían desechados y podrían causar problemas ambientales.

Este trabajo presenta un aporte en el ámbito del uso de materiales reciclados en la construcción. Debido a esto, se pueden utilizar como apoyo para investigaciones futuras relacionadas al uso de conchas de almeja en mortero. Como investigación futura se puede realizar lo siguiente:

- Menores porcentajes de filler (0,5%, 1,0%, 1,5% y 2,0%) debido a que se demostró que al aumentar el porcentaje, empeoran las propiedades mecánicas.
- Tiempos de molienda de 0,5 h, 1,0 h y 1,5 h. Estos tiempos de molienda se mostraron con buenos resultados en este estudio.
- Tiempos de molienda intermedios, como: 0,25 h, 0,75 h y 1,15 h. Estos tiempos no fueron utilizados, por lo que, puede ser un aporte utilizarlos.

Referencias

- [1] R. Camargo-Perez, F. Moreno-Navarro, A. E. Alvarez, L. F. Walubita, y L. Fuentes, “Influence of recycled rice husk ash filler on the mechanical performance of asphalt mixtures: A mortar scale analysis”, *Construction and Building Materials*, vol. 414, p. 134832, feb. 2024, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.134832.
- [2] “Cómo Hacer Cemento, Elaboración: Proceso Paso a Paso y Sus Usos”. Accedido: 28 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.holcim.es/como-hacer-cemento-elaboracion-proceso-paso-paso-y-sus-usos>
- [3] W. Wang, J. Wang, J. Shen, y P. Guo, “High titanium heavy slag powder as a sustainability filler and its influence on the performance of asphalt mortar”, *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 25, pp. 5586–5599, jul. 2023, doi: 10.1016/j.jmrt.2023.07.037.
- [4] “Régimen artesanal de extracción”, SUBPESCA Normativa. Accedido: 28 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.subpesca.cl/portal/615/w3-propertyvalue-50882.html>
- [5] “Estadísticas – sernapesca”. Accedido: 28 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.sernapesca.cl/informes/estadisticas/>
- [6] “Producción de residuo de concha de molusco”, BIOVALVO. Accedido: 28 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://proyectobiovalvo.wordpress.com/antecedentes/produccion-de-residuo-de-concha-de-molusco/>
- [7] “content.pdf”. Accedido: 29 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://pirhua.udep.edu.pe/backend/api/core/bitstreams/be25bb99-7dd8-459e-9c64-58308f57e944/content>
- [8] H. Ez-Zaki, A. Diouri, S. Kamali-Bernard, y O. Sassi, “Composite cement mortars based on marine sediments and oyster shell powder”, *Materiales de Construcción*, vol. 66, mar. 2016.
- [9] S. Vega, L. Tovar, C. Flores, y J. Oyola, “Resistencia a compresión simple del concreto con yeso y residuos de conchas de abanico”, *Revista Boliviana de Química*, vol. 39, abr. 2022, doi: 10.34098/2078-3949.39.1.1.
- [10] “content.pdf”. Accedido: 29 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://pirhua.udep.edu.pe/backend/api/core/bitstreams/8d974de3-8ce8-436c-8363-b7406c7e7132/content>
- [11] A. Farro, “Ensayo de Granulometría”, CONSTRUNEIC. Accedido: 9 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://construneic.com/mecanica-de-suelos/granulometria/>
- [12] “doc_num.pdf”. Accedido: 9 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.bfa.fcnym.unlp.edu.ar/catalogo/doc_num.php?explnum_id=3712
- [13] “M-MMP-1-03-03.pdf”. Accedido: 9 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://normas.imt.mx/normativa/M-MMP-1-03-03.pdf>
- [14] L. Ing, “Análisis Granulométrico por Tamizado - Excel”, La Librería del Ingeniero. Accedido: 9 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.libreriaingeniero.com/2017/09/analisis-granulometrico-por-tamizado.html>
- [15] “D452.pdf”. Accedido: 9 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.kelid1.ir/FilesUp/ASTM_STANDARS_971222/D452.PDF
- [16] “¿Cómo se realiza el Análisis Granulométrico en suelos?”, GIG. Accedido: 9 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://ingeotecnica.com/analisis-granulometrico>
- [17] W. Rodríguez, “Ensayo granulométrico de los suelos mediante el método del tamizado”, *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, vol. 7, pp. 6908–6927, may 2023, doi: 10.37811/cl_rcm.v7i2.5834.

- [18] Q. Li, Y. Fan, Y. Qi, S. Zhang, y S. P. Shah, “Effect of nano-metakaolin on the chloride diffusion resistance of cement mortar with addition of fly ash”, *Journal of Building Engineering*, vol. 88, p. 109171, jul. 2024, doi: 10.1016/j.jobe.2024.109171.
- [19] “NCh148Of68.pdf”. Accedido: 9 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.cesmec.cl/medios/DIC/normas/NCh148Of68.pdf>
- [20] “nch0158-1967.pdf”. Accedido: 9 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://tecnohorm.weebly.com/uploads/9/6/2/7/9627075/nch0158-1967.pdf>
- [21] “NCh163Of79.pdf”. Accedido: 9 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.cesmec.cl/medios/DIC/normas/NCh163Of79.pdf>
- [22] “NCh164 of 76 - nch 164 - C.D. 691 Norma chilena oficial de emergencia NCh164 ARIDOS PARA MORTEROS Y - Studocu”. Accedido: 9 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.studocu.com/cl/document/universidad-de-la-serena/hormigon-armado/nch164-of-76-nch-164/8474427>
- [23] “NCh165Of2009.pdf”. Accedido: 9 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.cesmec.cl/medios/DIC/normas/NCh165Of2009.pdf>
- [24] “NCh_166_Of2009.pdf”. Accedido: 9 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.cesmec.cl/medios/DIC/normas/NCh_166_Of2009.pdf
- [25] JPimentel, “Actualización Norma Chilena NCh1498 Hormigón y mortero - Agua de amasado - Requisitos”, INN. Accedido: 9 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.inn.cl/node/3454>
- [26] “NCh_2261_2010_Mortero_Conf_Probeta_obra_compresion.pdf”. Accedido: 9 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.cesmec.cl/medios/DIC/normas/NCh_2261_2010_Mortero_Conf_Probeta_obra_compresion.pdf
- [27] “Nch 2256 - 1 - rabajo - I Contenido Página 0 Introducción Preámbulo IV 1 Alcance y campo de - Studocu”. Accedido: 9 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.studocu.com/cl/document/universidad-de-las-americas-chile/mecanica-de-suelos/nch-2256-1-rabajo/44028263>
- [28] “NCh1019Of2009.pdf”. Accedido: 9 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.cesmec.cl/medios/DIC/normas/NCh1019Of2009.pdf>
- [29] “nch1038-1977.pdf”. Accedido: 9 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://tecnohorm.weebly.com/uploads/9/6/2/7/9627075/nch1038-1977.pdf>
- [30] “material de relleno | Tesouro de Arte & Arquitectura”. Accedido: 26 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.aatespanol.cl/terminos/300080665>
- [31] H. Tang *et al.*, “Effect of mechanical activation on hydration properties of natural volcanic rock towards partially replacing cement in composite cementitious materials”, *Journal of Building Engineering*, vol. 83, p. 108427, abr. 2024, doi: 10.1016/j.jobe.2023.108427.
- [32] K. Doughmi, K. Baba, y A. Nounah, “Mechanical properties of eco-friendly cement based composite mortars plastic fiber reinforced partially replaced by natural pozzolan and marble waste”, *Materials Today: Proceedings*, jul. 2023, doi: 10.1016/j.matpr.2023.07.203.
- [33] M. A. O. Mydin *et al.*, “Performance of lightweight foamed concrete partially replacing cement with industrial and agricultural wastes: Microstructure characteristics, thermal conductivity, and hardened properties”, *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 14, n° 11, p. 102546, nov. 2023, doi: 10.1016/j.asej.2023.102546.
- [34] P. Krammart y S. Tangtermsirikul, “Properties of cement made by partially replacing cement raw materials with municipal solid waste ashes and calcium carbide waste”, *Construction and Building Materials*, vol. 18, n° 8, pp. 579–583, oct. 2004, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2004.04.014.

- [35] T. R. Gyawali, “Use of high ductile mortar mixing method for the enhancement of flexural fracture behaviour of steel filler mortar”, *Results in Engineering*, vol. 18, p. 101096, jun. 2023, doi: 10.1016/j.rineng.2023.101096.
- [36] X. Song y Y. Ma, “Long-term thaumasite sulfate attack on mortar containing coral sand filler and SCMs exposed to sodium sulfate solution”, *Case Studies in Construction Materials*, vol. 19, p. e02576, dic. 2023, doi: 10.1016/j.cscm.2023.e02576.
- [37] M. N. Hamdadou, F. Bignonnet, W. Deboucha, H. Ranaivomanana, N. Leklou, y K. Arroudj, “Hydration, mechanical and transfer properties of blended cement pastes and mortars prepared with recycled powder or limestone filler”, *Journal of Building Engineering*, vol. 78, p. 107541, nov. 2023, doi: 10.1016/j.jobe.2023.107541.
- [38] F. Marin, G. Luquet, B. Marie, y D. Medakovic, “Molluscan Shell Proteins: Primary Structure, Origin, and Evolution”, en *Current Topics in Developmental Biology*, vol. 80, en *Current Topics in Developmental Biology*, vol. 80. , Academic Press, 2007, pp. 209–276. doi: 10.1016/S0070-2153(07)80006-8.
- [39] C. M. Garcia, “Estudio del comportamiento de la concha de mejillón como árido para la fabricación de hormigones en masa: aplicación en la cimentación de un módulo experimental (Módulo Biovalvo)”.
- [40] “Anuarios Estadísticos de Pesca y Acuicultura – sernapesca”. Accedido: 2 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.sernapesca.cl/informacion-utilidad/anuarios-estadisticos-de-pesca-y-acuicultura/>
- [41] P. Sargent *et al.*, “Strength, mineralogical, microstructural and CO2 emission assessment of waste mortars comprising excavated soil, scallop shells and blast furnace slag”, *Construction and Building Materials*, vol. 411, p. 134425, ene. 2024, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.134425.
- [42] A. Hasnaoui, A. Bourguiba, N. Sebaibi, y M. Boutouil, “Valorization of queen scallop shells in the preparation of metakaolin-based geopolymer mortars”, *Journal of Building Engineering*, vol. 53, p. 104578, ago. 2022, doi: 10.1016/j.jobe.2022.104578.
- [43] B. Safi, M. Saidi, A. Daoui, A. Bellal, A. Mechekak, y K. Toumi, “The use of seashells as a fine aggregate (by sand substitution) in self-compacting mortar (SCM)”, *Construction and Building Materials*, vol. 78, pp. 430–438, mar. 2015, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.01.009.
- [44] R. A. Á. López, “RENDIMIENTO DE CAPARAZONES Y CONCHAS DE CRUSTÁCEOS Y MOLUSCOS COMO SUSTITUTO PARCIAL DE AGREGADOS EN MEZCLAS DE CONCRETO”.
- [45] C. Varhen, S. Carrillo, y G. Ruiz, “Experimental investigation of Peruvian scallop used as fine aggregate in concrete”, *Construction and Building Materials*, vol. 136, pp. 533–540, abr. 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.01.067.
- [46] I. Ekop, A. A, y A. Umoh, “STRENGTH CHARACTERISTICS OF GRANITE-Pachymelania aurita SHELL CONCRETE”, vol. 9, pp. 9–14, jun. 2013.
- [47] E.-I. Yang, S.-T. Yi, y Y.-M. Leem, “Effect of oyster shell substituted for fine aggregate on concrete characteristics: Part I. Fundamental properties”, *Cement and Concrete Research*, vol. 35, n° 11, pp. 2175–2182, nov. 2005, doi: 10.1016/j.cemconres.2005.03.016.
- [48] H. Cuadrado-Rica, N. Sebaibi, M. Boutouil, y B. Boudart, “Properties of ordinary concretes incorporating crushed queen scallop shells”, *Mater Struct*, vol. 49, n° 5, pp. 1805–1816, may 2016, doi: 10.1617/s11527-015-0613-7.
- [49] L. Ettu, O. Ibearugbulem, J. Ezech, y C. Anya, “A reinvestigation of the prospects of using periwinkle shell as partial replacement for granite in concrete”, vol. 2, pp. 54–59, mar. 2013.
- [50] A. P. Adewuyi, “Exploratory Study of Periwinkle Shells as Coarse Aggregates in Concrete Works”, *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 3, ene. 2008.

- [51] F. Falade, E. Ikponmwosa, y N. OJEDIRAN, “Behaviour of lightweight concrete containing periwinkle shells at elevated temperature”, *Journal of Engineering Science and Technology*, vol. 5, dic. 2010.
- [52] O. Agbede y M. Joel, “Suitability of Periwinkle Shell as Partial Replacement for River Gravel in Concrete”, *Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies*, vol. 8, dic. 2009.
- [53] C. Martínez-García, B. González-Fonteboa, F. Martínez-Abella, y D. Carro- López, “Performance of mussel shell as aggregate in plain concrete”, *Construction and Building Materials*, vol. 139, pp. 570–583, may 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.09.091.
- [54] T.-T. Nguyen, H.-T. Thai, y T. Ngo, “Optimised mix design and elastic modulus prediction of ultra-high strength concrete”, *Construction and Building Materials*, vol. 302, p. 124150, oct. 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124150.
- [55] E. Khankhaje *et al.*, “Properties of quiet pervious concrete containing oil palm kernel shell and cockleshell”, *Applied Acoustics*, vol. 122, pp. 113–120, jul. 2017, doi: 10.1016/j.apacoust.2017.02.014.
- [56] P. Raju, S. Siva, y H. Dharmala, “COMPRESSIVE STRENGTH OF CONCRETE WITH PARTIAL REPLACEMENT OF AGGREGATES WITH GRANITE POWDER AND COCKLE SHELL”, *Malaysian Journal of Civil Engineering*, vol. 28, pp. 183–204, ene. 2016, doi: 10.11113/mjce.v28.15970.
- [57] “Nueva NCh163: disminuir pasivos ambientales y extracción de áridos naturales”, País Circular. Accedido: 8 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.paiscircular.cl/economia-circular/actualizacion-de-la-nch163-un-paso-indispensable-para-disminuir-pasivos-ambientales-y-reducir-extraccion-de-aridos-naturales/>
- [58] “NCh2257_3Of96.pdf”. Accedido: 17 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.cesmec.cl/medios/DIC/normas/NCh2257_3Of96.pdf
- [59] desarrollo@teais.es, “PLASTIFICANTE PARA MORTEROS-PLAIS N · TEAIS”, Teais. Accedido: 12 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://www.teais.es/es/producto/11090/plastificante-para-morteros-plais-n>
- [60] “Cementos Cbb 25 Kilos | Sodimac Chile”, Sodimac. Accedido: 3 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.sodimac.cl/sodimac-cl/articulo/110308912/Cementos-Cbb-25-Kilos/110308931?exp=so_com
- [61] “Despeje_Cobro_Boleta_Essbio.pdf”. Accedido: 3 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.essbio.cl/pdf/banners/Despeje_Cobro_Boleta_Essbio.pdf
- [62] “Arena Gruesa”, Arenas Costanera Bio Bío. Accedido: 3 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.arenasbiobio.cl/producto/arena-gruesa/>
- [63] “Seremi de Energía informa sobre los alcances del Proyecto de Ley que estabiliza la tarifa de electricidad | Ministerio de Energía”. Accedido: 3 de noviembre de 2024. [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>

1. Anexo A: Carta Gantt

A continuación, se presenta la Carta Gantt, la cual se usó como una forma de organizar el trabajo a realizar.

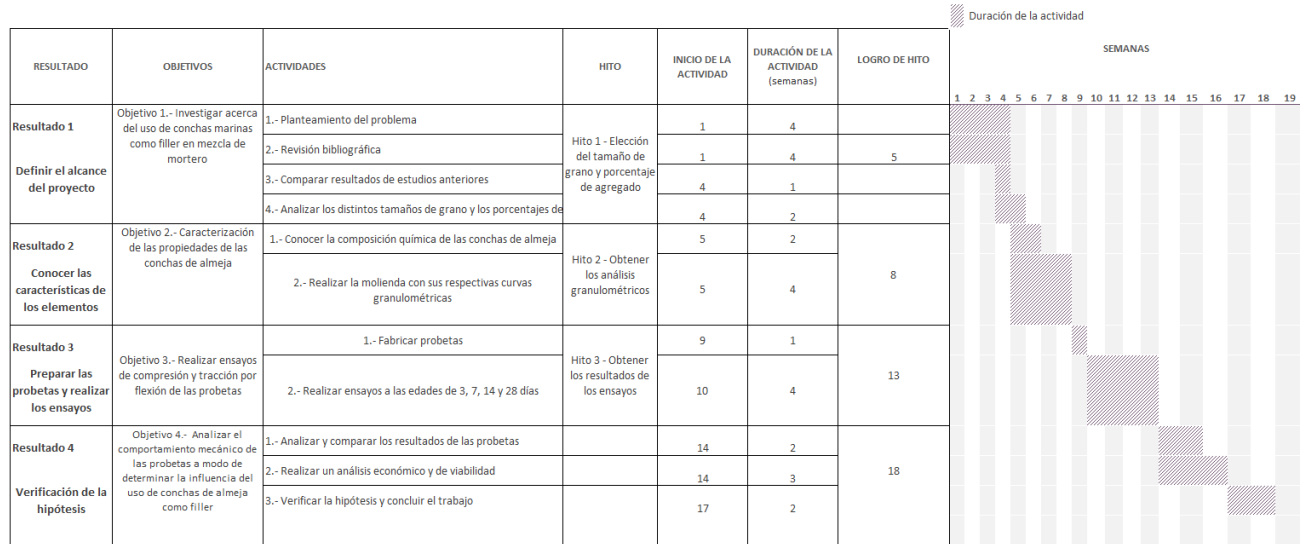


Figura 35 Carta Gantt.

Anexo B: Resultados de resistencia a la compresión

En esta sección se encuentran los resultados en detalle de la resistencia a la compresión

Tabla 12 Anexo B.1 Resistencia a la compresión de mortero patrón para agregado de 5%.

PATRÓN miércoles										
Propiedades de Probetas						Ensayo				
Edad	% Aditivo	Probeta	Peso	Probeta	Resistencia	Resist. Prom	Resist. Prom GLOBAL	Densidad kg/m3		
7 días	5%	P1	567,1	P1-1	11,58	11,92	11,59	2215,2		
				P1-2	12,26					
		P2	563	P2-1	12,27	11,81			2199,2	
				P2-2	11,34					
		P3	561,9	P3-1	11,10	11,06				2194,9
				P3-2	11,01					
	5%	P1	574	P1-1	15,22	15,41	15,63	2242,2		

14 días		P2	568	P1-2	15,60	15,72	21,08	2218,8
				P2-1	15,84			
		P3	565,7	P2-2	15,60	15,77		2209,8
				P3-1	15,49			
				P3-2	16,05			
28 días	5%	P1	582,0	P1-1	21,38	21,35	21,08	2273,4
				P1-2	21,32			
		P2	584,2	P2-1	20,97	21,09		2282,0
				P2-2	21,21			
		P3	578,4	P3-1	20,46	20,79		2259,4
				P3-2	21,12			

Tabla 13 Anexo B.2 Resistencia a la compresión de mortero patrón para agregado de 2,5%.

PATRÓN viernes								
Propiedades de Probetas						Ensayo		
Edad	% Aditivo	Probeta	Peso	Probeta	Resistencia	Resist. Prom	Resist. Prom GLOBAL	Densidad kg/m³
7 días	2,5%	P1	557,8	P1-1	10,74	10,70	10,31	2178,9
				P1-2	10,66			
		P2	568,1	P2-1	10,16	10,08		2219,1
				P2-2	9,99			
		P3	567,5	P3-1	9,96	10,17		2216,8
				P3-2	10,37			
14 días	2,5%	P1	568,8	P1-1	14,13	13,96	14,21	2221,9
				P1-2	13,79			
		P2	567,1	P2-1	14,73	14,41		2215,2
				P2-2	14,09			
		P3	566,9	P3-1	14,15	14,25		2214,5
				P3-2	14,35			
28 días	2,5%	P1	573,5	P1-1	18,90	19,17	19,66	2240,2
				P1-2	19,44			
		P2	568,2	P2-1	19,16	19,52		2219,5
				P2-2	19,87			
		P3	566,8	P3-1	19,62	20,30		2214,1
				P3-2	20,97			

Tabla 14 Anexo B.3 Resistencia a la compresión de mortero con agregado MAF-0,5h.

MAF-0,5h (MOLIENDA DE 30 MINUTOS)								
Probetas				Ensayo				
Edad	% Aditivo	Probeta	Peso	Probeta	Resistencia	Resist. Prom	Resist. Prom GLOBAL	Densidad kg/m3
7 días	2,5%	P1	573,1	P1-1	10,77	10,71	10,67	2238,7
				P1-2	10,64			
		P2	566,1	P2-1	10,57	10,69		
				P2-2	10,81			
		P3	569,7	P3-1	10,46	10,60		
				P3-2	10,74			
	5,0%	P1	572,1	P1-1	11,47	11,74	11,35	2234,8
				P1-2	12,00			
		P2	570,6	P2-1	11,29	11,10		
				P2-2	10,91			
		P3	572,3	P3-1	11,31	11,22		
				P3-2	11,12			
14 días	2,5%	P1	574,2	P1-1	15,21	14,91	15,05	2243,0
				P1-2	14,60			
		P2	569,7	P2-1	15,50	14,88		
				P2-2	14,25			
		P3	572,3	P3-1	15,52	15,36		
				P3-2	15,20			
	5,0%	P1	582,1	P1-1	15,95	15,77	16,27	2273,8
				P1-2	15,58			
		P2	588,4	P2-1	16,64	16,72		
				P2-2	16,79			
		P3	587,9	P3-1	16,47	16,34		
				P3-2	16,20			
28 días	2,5%	P1	566,7	P1-1	20,29	20,63	20,79	2213,7
				P1-2	20,96			
		P2	565,5	P2-1	20,75	20,67		
				P2-2	20,59			
	P3	563,4	P3-1	21,06	21,07			
			P3-2	21,07				
	5,0%	P1	576,5	P1-1	20,84	21,22	21,27	2252,0
				P1-2	21,59			

	P2	571,4	P2-1	21,43	21,43		2232,0
			P2-2	21,42			
	P3	573,3	P3-1	20,75	21,18		2239,5
			P3-2	21,60			

Tabla 15 Anexo B.4 Resistencia a la compresión de mortero con agregado MAF-1,0h.

MAF-1,0h (MOLIENDA DE 60 MINUTOS)								
Probetas				Ensayo				
Edad	% Aditivo	Probeta	Peso	Probeta	Resistencia	Resist. Prom	Resist. Prom GLOBAL	Densidad kg/m3
7 días	2,5%	P1	571,7	P1-1	10,51	10,59	10,91	2233,2
				P1-2	10,67			
		P2	577,5	P2-1	11,35	10,86		
				P2-2	10,36			
		P3	583,8	P3-1	11,23	11,27		
				P3-2	11,31			
	5,0%	P1	574,1	P1-1	11,02	10,69	10,54	2242,6
				P1-2	10,35			
		P2	577,4	P2-1	11,03	10,98		
				P2-2	10,92			
		P3	578,3	P3-1	10,39	9,97		
				P3-2	9,55			
14 días	2,5%	P1	569,7	P1-1	15,50	15,73	15,88	2225,4
				P1-2	15,96			
		P2	570,2	P2-1	15,41	15,54		
				P2-2	15,67			
		P3	569,7	P3-1	15,58	16,37		
				P3-2	17,15			
	5,0%	P1	577	P1-1	15,91	16,12	15,80	2253,9
				P1-2	16,33			
		P2	573,5	P2-1	15,54	15,68		
				P2-2	15,81			
		P3	578,2	P3-1	15,72	15,62		
				P3-2	15,51			
28 días	2,5%	P1	564,7	P1-1	18,11	19,10	20,04	2205,9
				P1-2	20,09			
		P2	564,7	P2-1	20,09	20,06		
				P2-2	20,02			

		P3	569,6	P3-1	20,66	20,97		2225,0
				P3-2	21,27			
	5,0%	P1	566,8	P1-1	22,52	22,26	22,32	2214,1
				P1-2	21,99			
		P2	584,2	P2-1	21,24	21,73		2282,0
				P2-2	22,22			
		P3	569,3	P3-1	22,62	22,98		2223,8
				P3-2	23,33			

Tabla 16 Anexo B.5 Resistencia a la compresión de mortero con agregado MAF-1,5h.

MAF-1,5h (MOLIENDA DE 90 MINUTOS)								
Probetas				Ensayo				
Edad	% Aditivo	Probeta	Peso	Probeta	Resistencia	Resist. Prom	Resist. Prom GLOBAL	Densidad kg/m ³
7 días	2,5%	P1	569,4	P1-1	11,70	11,65	11,56	2224,2
				P1-2	11,59			
		P2	568,4	P2-1	11,25	11,31		2220,3
				P2-2	11,36			
		P3	571,4	P3-1	11,65	11,73		2232,0
				P3-2	11,81			
	5,0%	P1	576,2	P1-1	11,19	11,09	11,57	2250,8
				P1-2	10,99			
		P2	575,2	P2-1	11,54	11,76		2246,9
				P2-2	11,98			
		P3	578,7	P3-1	12,13	11,85		2260,5
				P3-2	11,56			
14 días	2,5%	P1	557,8	P1-1	16,22	16,64	16,31	2178,9
				P1-2	17,06			
		P2	573,6	P2-1	16,78	15,98		2240,6
				P2-2	15,18			
		P3	558,7	P3-1	15,85	16,32		2182,4
				P3-2	16,79			
	5,0%	P1	576,9	P1-1	16,82	16,72	16,33	2253,5
				P1-2	16,62			
		P2	575,6	P2-1	16,61	15,95		2248,4
				P2-2	15,28			
		P3	579,3	P3-1	16,35	16,33		2262,9
				P3-2	16,30			

28 días	2,5%	P1	565,5	P1-1	21,01	21,49	21,31	2209,0
				P1-2	21,97			
		P2	559,7	P2-1	19,88	20,12		2186,3
				P2-2	20,36			
		P3	560,3	P3-1	22,91	22,31		2188,7
				P3-2	21,70			
	5,0%	P1	582,1	P1-1	21,17	21,39	21,23	2273,8
				P1-2	21,60			
		P2	575,5	P2-1	21,44	21,14		2248,0
				P2-2	20,84			
		P3	588,4	P3-1	21,23	21,17		2298,4
				P3-2	21,11			

Tabla 17 Anexo B.6 Resistencia a la compresión de mortero con agregado MAF-2,0h.

MAF-2h (MOLIENDA DE 120 MINUTOS)								
Probetas					Ensayo			
Edad	% Aditivo	Probeta	Peso	Probeta	Resistencia	Resist. Prom	Resist. Prom GLOBAL	Densidad kg/m³
7 días	2,5%	P1	580,1	P1-1	10,43	10,36	10,09	2266,0
				P1-2	10,28			
		P2	583,8	P2-1	8,71	9,48		2280,5
				P2-2	10,24			
		P3	578,1	P3-1	10,43	10,45		2258,2
				P3-2	10,47			
	5,0%	P1	574,7	P1-1	11,53	11,32	11,00	2244,9
				P1-2	11,10			
		P2	566,4	P2-1	10,91	10,78		2212,5
				P2-2	10,64			
		P3	568,6	P3-1	10,81	10,92		2221,1
				P3-2	11,03			
14 días	2,5%	P1	567,7	P1-1	13,74	13,66	14,34	2217,6
				P1-2	13,57			
		P2	575,2	P2-1	14,28	13,97		2246,9
				P2-2	13,65			
		P3	577,9	P3-1	15,18	15,41		2257,4
				P3-2	15,64			
	5,0%	P1	571,2	P1-1	15,84	15,99	15,32	2231,3
				P1-2	16,13			

		P2	568,5	P2-1	15,59	14,46		2220,7			
				P2-2	13,32						
		P3	569,8	P3-1	15,88	15,51		2225,8			
				P3-2	15,13						
		28 días	2,5%	P1	577,6	P1-1		21,29	21,28	20,32	2256,3
						P1-2		21,27			
P2	577,5			P2-1	19,50	19,68	2255,9				
				P2-2	19,86						
P3	581			P3-1	19,66	20,01	2269,5				
				P3-2	20,35						
5,0%	P1		567,4	P1-1	21,64	21,49	21,53	2216,4			
				P1-2	21,34						
	P2		567,4	P2-1	20,97	21,49		2216,4			
				P2-2	22,00						
	P3		571,8	P3-1	21,19	21,62		2233,6			
				P3-2	22,04						

Tabla 18 Anexo B.7 Resistencia a la compresión de mortero con agregado MAF-2,5h.

MAF-2,5h (MOLIENDA DE 150 MINUTOS)								
Probetas					Ensayo			
Edad	% Aditivo	Probeta	Peso	Probeta	Resistencia	Resist. Prom	Resist. Prom GLOBAL	Densidad kg/m³
7 días	2,5%	P1	576,6	P1-1	9,42	9,66	9,68	2252,3
				P1-2	9,90			
		P2	573,5	P2-1	9,04	9,58		2240,2
				P2-2	10,12			
		P3	579,4	P3-1	9,55	9,81		2263,3
				P3-2	10,07			
	5,0%	P1	551,2	P1-1	11,12	11,76	11,69	2153,1
				P1-2	12,40			
		P2	559,5	P2-1	10,60	11,57		2185,5
				P2-2	12,54			
		P3	560,9	P3-1	11,27	11,73		2191,0
				P3-2	12,19			
14 días	2,5%	P1	567,4	P1-1	13,37	13,50	13,46	2216,4
				P1-2	13,62			
		P2	568	P2-1	12,88	12,93		2218,8
				P2-2	12,98			

	5,0%	P3	565,9	P3-1	13,78	13,96	16,68	2210,5	
				P3-2	14,13				
		P1	571,5	P1-1	17,28	17,36			
				P1-2	17,43				
		P2	565,7	P2-1	15,15	15,88			
				P2-2	16,60				
	P3	561	P3-1	15,85	16,81				
			P3-2	17,77					
	28 días	2,5%	P1	576,3	P1-1	18,72	19,08	19,08	2251,2
					P1-2	19,44			
			P2	568,5	P2-1	19,21	18,80		
					P2-2	18,38			
P3			572,5	P3-1	19,20	19,36			
				P3-2	19,52				
5,0%		P1	564,1	P1-1	20,42	21,16	21,37	2203,5	
				P1-2	21,89				
		P2	567,2	P2-1	20,30	20,91			
				P2-2	21,52				
		P3	566,4	P3-1	21,16	22,03			
				P3-2	22,90				

Anexo C: Resultados de resistencia a la flexión por tracción

A continuación, se presentan los resultados en detalle de la resistencia a la flexión por tracción

Tabla 19 Anexo C.1 Resistencia a la flexotracción de mortero patrón para mezcla de 5%.

MEZCLA PATRON miércoles									
Probetas				Ensayo					
Edad	% ADITIVO	Probeta	Peso (g)	Desplazamiento (mm)	Carga (Kgf)	Flexión (Kgf/cm²)	Flexión (Mpa)	Flexión Promedio (Mpa)	Densidad kg/m³
7 días	0%	P1	567,1	36	137,65	38,7	3,80	3,61	2215,2
		P2	563	33	127,45	35,8	3,52		2199,2
		P3	561,9	33	127,45	35,8	3,52		2194,9

14 días	0%	P1	574	44	164,85	46,4	4,55	4,36	2242,2
		P2	568,8	42	158,05	44,5	4,36		2221,9
		P3	565,7	40	151,25	42,5	4,17		2209,8
28 días	0%	P1	582,4	60	219,25	61,7	6,05	5,42	2275,0
		P2	584,2	50	185,25	52,1	5,11		2282,0
		P3	578,4	50	185,25	52,1	5,11		2259,4

Tabla 20 Anexo C.2 Resistencia a la flexotracción de mortero patrón para mezcla de 2,5%.

MEZCLA PATRON vienes									
Probetas				Ensayo					
Edad	% ADITIVO	Probeta	Peso (g)	Desplazamiento (mm)	Carga (Kgf)	Flexión (Kgf/cm²)	Flexión (Mpa)	Flexión Promedio (Mpa)	Densidad kg/m³
7 días	0%	P1	557,8	37	141,05	39,7	3,89	3,61	2178,9
		P2	568,1	33	127,45	35,8	3,52		2219,1
		P3	567,5	32	124,05	34,9	3,42		2216,8
14 días	0%	P1	568,8	39	147,85	41,6	4,08	4,05	2221,9
		P2	567,1	36	137,65	38,7	3,80		2215,2
		P3	566,9	41	154,65	43,5	4,27		2214,5
28 días	0%	P1	573,5	51	188,65	53,1	5,20	5,36	2240,2
		P2	568,2	54	198,85	55,9	5,48		2219,5
		P3	566,8	53	195,45	55,0	5,39		2214,1

Tabla 21 Anexo C.3 Resistencia a la flexotracción de mortero con agregado MAF-0,5h.

MAF-0,5h (MOLIENDA DE 30 MINUTOS)									
Probetas				Ensayo					
Edad	% ADITIVO	Probeta	Peso (g)	Desplazamiento (mm)	Carga (Kgf)	Flexión (Kgf/cm²)	Flexión (Mpa)	Flexión Promedio (Mpa)	Densidad kg/m³
7 días	2,5%	P1	573,1	26	103,65	29,2	2,86	3,08	2238,7
		P2	566,1	27	107,05	30,1	2,95		2211,3
		P3	569,7	32	124,05	34,9	3,42		2225,4
	5,0%	P1	572,1	37	141,05	39,7	3,89	3,80	2234,8
		P2	570,6	34	130,85	36,8	3,61		2228,9
		P3	572,3	37	141,05	39,7	3,89		2235,5
14 días	2,5%	P1	574,2	40	151,25	42,5	4,17	4,39	2243,0
		P2	569,7	42	158,05	44,5	4,36		2225,4
		P3	572,3	45	168,25	47,3	4,64		2235,5
	5,0%	P1	582,1	49	181,85	51,1	5,02	4,89	2273,8
		P2	588,4	46	171,65	48,3	4,73		2298,4
		P3	587,9	48	178,45	50,2	4,92		2296,5
28 días	2,5%	P1	566,7	53	195,45	55,0	5,39	5,30	2213,7
		P2	565,5	51	188,65	53,1	5,20		2209,0
		P3	563,4	38	144,45	40,6	3,98		2200,8
	5,0%	P1	576,5	51	188,65	53,1	5,20	5,39	2252,0

		P2	571, 4	55	202,2 5	56,9	5,58		2232,0
		P3	573, 3	53	195,4 5	55,0	5,39		2239,5

Tabla 22 Anexo C.4 Resistencia a la flexotracción de mortero con agregado MAF-1,0h.

MAF-1,0h (MOLIENDA DE 60 MINUTOS)									
Probetas				Ensayo					
Edad	% ADITIVO	Probeta	Peso (g)	Desplazamiento (mm)	Carga (Kgf)	Flexión (Kgf/cm²)	Flexión (Mpa)	Flexión Promedio (Mpa)	Densidad kg/m³
7 días	2,5%	P1	571, 7	29	113,8 5	32,0	3,14	3,08	2233,2
		P2	577, 5	26	103,6 5	29,2	2,86		2255,9
		P3	583, 8	30	117,2 5	33,0	3,23		2280,5
	5,0%	P1	574, 1	31	120,6 5	33,9	3,33	3,42	2242,6
		P2	577, 4	35	134,2 5	37,8	3,70		2255,5
		P3	578, 3	30	117,2 5	33,0	3,23		2259,0
14 días	2,5%	P1	569, 7	43	161,4 5	45,4	4,45	4,42	2225,4
		P2	570, 2	40	151,2 5	42,5	4,17		2227,3
		P3	569, 7	45	168,2 5	47,3	4,64		2225,4
	5,0%	P1	577	39	147,8 5	41,6	4,08	4,39	2253,9
		P2	573, 5	43	161,4 5	45,4	4,45		2240,2
		P3	578, 2	45	168,2 5	47,3	4,64		2258,6
28 días	2,5%	P1	564, 7	50	185,2 5	52,1	5,11	5,42	2205,9

		P2	564,7	52	192,05	54,0	5,30		2205,9
		P3	569,6	58	212,45	59,8	5,86		2225,0
	5,0%	P1	566,8	56	205,65	57,8	5,67	5,83	2214,1
		P2	584,2	61	222,65	62,6	6,14		2282,0
		P3	569,3	56	205,65	57,8	5,67		2223,8

Tabla 23 Anexo C.5 Resistencia a la flexotracción de mortero con agregado MAF-1,5h.

MAF-1,5h (MOLIENDA DE 90 MINUTOS)									
Probetas				Ensayo					
Edad	% ADITIVO	Probeta	Peso (g)	Desplazamiento (mm)	Carga (Kgf)	Flexión (Kgf/cm²)	Flexión (Mpa)	Flexión Promedio (Mpa)	Densidad kg/m³
7 días	2,5%	P1	569,4	29	113,85	32,0	3,14	3,39	2224,2
		P2	568,4	31	120,65	33,9	3,33		2220,3
		P3	571,4	35	134,25	37,8	3,70		2232,0
	5,0%	P1	576,2	26	103,65	29,2	2,86	3,17	2250,8
		P2	575,2	30	117,25	33,0	3,23		2246,9
		P3	578,7	32	124,05	34,9	3,42		2260,5
14 días	2,5%	P1	557,8	46	171,65	48,3	4,73	4,80	2178,9
		P2	573,6	46	171,65	48,3	4,73		2240,6
		P3	558,7	48	178,45	50,2	4,92		2182,4
	5,0%	P1	576,9	40	151,25	42,5	4,17	4,42	2253,5

		P2	575, 6	43	161,4 5	45,4	4,45		2248,4
		P3	579, 3	45	168,2 5	47,3	4,64		2262,9
28 días	2,5%	P1	565, 5	54	198,8 5	55,9	5,48	5,23	2209,0
		P2	559, 7	44	164,8 5	46,4	4,55		2186,3
		P3	560, 3	56	205,6 5	57,8	5,67		2188,7
	5,0%	P1	582, 1	46	171,6 5	48,3	4,73	5,33	2273,8
		P2	575, 5	59	215,8 5	60,7	5,95		2248,0
		P3	588, 4	52	192,0 5	54,0	5,30		2298,4

Tabla 24 Anexo C.6 Resistencia a la flexo tracción de mortero con agregado MAF-2,0h.

MAF-2,0h (MOLIENDA DE 120 MINUTOS)									
Probetas				Ensayo					
Edad	% ADITIVO	Probeta	Peso (g)	Desplazamiento (mm)	Carga (Kgf)	Flexión (Kgf/cm²)	Flexión (Mpa)	Flexión Promedio (Mpa)	Densidad kg/m³
7 días	2,5%	P1	580, 1	25	100,2 5	28,2	2,77	2,67	2266,0
		P2	583, 8	26	103,6 5	29,2	2,86		2280,5
		P3	578, 1	21	86,65	24,4	2,39		2258,2
	5,0%	P1	574, 7	31	120,6 5	33,9	3,33	3,39	2244,9
		P2	566, 4	30	117,2 5	33,0	3,23		2212,5
		P3	568, 6	34	130,8 5	36,8	3,61		2221,1
14 días	2,5%	P1	567, 7	40	151,2 5	42,5	4,17	3,92	2217,6
		P2	575, 2	33	127,4 5	35,8	3,52		2246,9

		P3	577,9	39	147,85	41,6	4,08		2257,4
	5,0%	P1	571,2	41	154,65	43,5	4,27	4,27	2231,3
		P2	568,5	41	154,65	43,5	4,27		2220,7
		P3	569,8	41	154,65	43,5	4,27		2225,8
28 días	2,5%	P1	577,6	49	181,85	51,1	5,02	5,20	2256,3
		P2	577,5	53	195,45	55,0	5,39		2255,9
		P3	581	51	188,65	53,1	5,20		2269,5
	5,0%	P1	567,4	49	181,85	51,1	5,02	5,48	2216,4
		P2	567,4	56	205,65	57,8	5,67		2216,4
		P3	571,8	57	209,05	58,8	5,77		2233,6

Tabla 25 Anexo C.7 Resistencia a la flexotracción de mortero con agregado MAF-2,5h.

MAF-2,5h (MOLIENDA DE 150 MINUTOS)									
Probetas				Ensayo					
Edad	% ADITIVO	Probeta	Peso (g)	Desplazamiento (mm)	Carga (Kgf)	Flexión (Kgf/cm ²)	Flexión (Mpa)	Flexión Promedio (Mpa)	Densidad kg/m ³
7 días	2,5%	P1	576,6	27	107,05	30,1	2,95	3,02	2252,3
		P2	573,5	26	103,65	29,2	2,86		2240,2
		P3	579,4	30	117,25	33,0	3,23		2263,3
	5,0%	P1	551,2	35	134,25	37,8	3,70	3,55	2153,1
		P2	559,5	30	117,25	33,0	3,23		2185,5

		P3	560, 9	35	134,2 5	37,8	3,70		2191,0
14 días	2,5%	P1	567, 4	31	120,6 5	33,9	3,33	3,70	2216,4
		P2	568	35	134,2 5	37,8	3,70		2218,8
		P3	565, 9	39	147,8 5	41,6	4,08		2210,5
	5,0%	P1	571, 5	47	175,0 5	49,2	4,83	4,55	2232,4
		P2	565, 7	41	154,6 5	43,5	4,27		2209,8
		P3	561	44	164,8 5	46,4	4,55		2191,4
28 días	2,5%	P1	576, 3	45	168,2 5	47,3	4,64	5,30	2251,2
		P2	568, 5	53	195,4 5	55,0	5,39		2220,7
		P3	572, 9	58	212,4 5	59,8	5,86		2237,9
	5,0%	P1	564, 1	47	175,0 5	49,2	4,83	5,02	2203,5
		P2	567, 2	53	195,4 5	55,0	5,39		2215,6
		P3	566, 4	47	175,0 5	49,2	4,83		2212,5