



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN FACULTAD
DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA



**Evaluación de alternativas para valorización de borras salinas
de una planta química**

POR

Juan Pablo Escalona Badilla

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

Profesor Guía
Claudio Zaror

Profesional Supervisor
Carolina Sánchez

Enero 2025
Concepción
(Chile)

Resumen

La industria química genera una cantidad significativa de residuos, como la borra de salmuera, un subproducto del tratamiento primario de salmuera en plantas cloro-soda. Este residuo, compuesto principalmente por carbonato de calcio (CaCO_3), sílice (SiO_2), y otras impurezas, actualmente se dispone en vertederos, representando un costo significativo y desaprovechando su potencial de revalorización. En el contexto de la economía circular y la sostenibilidad ambiental, esta investigación evalúa la viabilidad de reutilizar la borra de salmuera como aditivo en mezclas de mortero.

El estudio incluyó tres etapas principales: caracterización del residuo, identificación de opciones de revalorización, y evaluación experimental. La caracterización reveló un contenido predominante de CaCO_3 (31%) y SiO_2 (10%), además de propiedades fisicoquímicas favorables como un pH alcalino y una granulometría fina. Se confeccionaron mezclas de mortero con diferentes porcentajes de adición de borra (0%, 2,5%, 5% y 10%), evaluándose su trabajabilidad y propiedades mecánicas mediante ensayos de flexión y compresión.

Los resultados demostraron que una adición del 2,5% de borra optimiza la trabajabilidad y aumenta las resistencias mecánicas: un 9,6% en compresión y un 10,5% en flexión tras 28 días de curado. Adiciones mayores, como el 10%, mostraron disminuciones en la densidad y la resistencia a la compresión, sugiriendo limitaciones en la cantidad de borra incorporada. Estas conclusiones resaltan el potencial de la borra de salmuera como un recurso para materiales de construcción, promoviendo una gestión de residuos más sostenible.

Estas conclusiones resaltan que la borra de salmuera presenta una oportunidad significativa para darle una segunda vida, transformándola en un recurso útil para la industria de la construcción, y contribuyendo a una gestión de residuos más sostenible y eficiente.

Abstract

The chemical industry generates significant amounts of waste, such as brine sludge, a byproduct of the primary brine treatment in chlor-alkali plants. This residue, primarily composed of calcium carbonate (CaCO_3), silica (SiO_2), and other impurities, is currently disposed of in landfills, incurring significant costs and failing to exploit its potential for valorization. In the context of a circular economy and environmental sustainability, this research evaluates the feasibility of reusing brine sludge as filler in mortar mixtures.

The study encompassed three main stages: residue characterization, identification of valorization options, and experimental evaluation. Characterization revealed a predominant content of CaCO_3 (31%) and SiO_2 (10%), along with favorable physicochemical properties such as alkaline pH and fine granulometry. Mortar mixtures with varying sludge additions (0%, 2.5%, 5%, and 10%) were prepared and tested for workability and mechanical properties through flexural and compressive strength tests.

Results demonstrated that a 2.5% sludge addition optimizes workability and increases mechanical strengths: a 9.6% improvement in compression and a 10.5% increase in flexural strength after 28 days of curing. Higher additions, such as 10%, resulted in decreased density and compressive strength, indicating limitations in the amount of sludge that can be incorporated.

These findings reveal that brine sludge represents a significant opportunity to repurpose industrial waste, transforming it into a useful resource for the construction industry and promoting more sustainable and efficient waste management practices.

Contenido

1. Introducción.....	8
2. Estado del arte	9
3. Objetivos.....	12
3.1. Objetivo general.	12
3.2. Objetivos específicos.	12
4. Metodología.....	13
4.1. Caracterización de las borras de salmuera.....	13
4.1.1. Diagrama de flujo y balance de materia.....	13
4.1.2. Porcentaje de humedad y pH.....	15
4.2. Identificación de opciones de revalorización.....	15
4.3. Evaluación de las borras de salmuera.....	16
4.3.1. Granulometría.....	16
4.3.1.1. Granulometría Borra de salmuera.....	16
4.3.1.2. Granulometría árido arena gruesa.....	17
4.3.2. Propiedades físicas del árido fino.....	17
4.4. Confección de mezclas de mortero.....	18
4.5. Ensayos de trabajabilidad de la mezcla	20
4.6. Ensayos mecánicos	20
4.6.1. Ensayo de resistencia a la flexión.....	21
4.6.2. Ensayo de resistencia a la compresión	21
5. Resultados y discusiones	23
5.1. Caracterización de las borras de salmuera.....	23
5.1.1. Diagrama de flujo de tratamiento primario	23
5.1.2. Humedad y pH de las borras de salmuera	24
5.1.3. Composición de las borras de salmuera	25
5.2. Evaluación experimental de las borras de salmuera	28
5.2.1. Granulometría de las borras de salmuera	28

5.2.2.	Caracterización del árido a utilizar.....	29
5.2.2.1.	Propiedades físicas de la arena gruesa	30
5.2.2.2.	Granulometría de la arena gruesa.....	30
5.2.3.	Ensayos de trabajabilidad de la mezcla.....	31
5.3.	Ensayos mecánicos de las probetas	33
5.3.1.	Masa y densidad de las probetas	34
5.3.2.	Ensayos de resistencia a la flexibilidad	35
5.3.3.	Ensayos de resistencia a la compresión.....	37
5.4.	Consideraciones adicionales	40
6.	Conclusión	41
7.	Referencias	42
8.	Anexos.....	46
Anexos A.	46
Anexo B.	51
Anexo C.	52

Índice de figuras

Figura 1: Tamizadora utilizada para el estudio de granulometría de la borra de salmuera	17
Figura 2: Materiales de la confección de mezcla y mezcladora utilizada.....	18
Figura 3: probetas de mrtero en la mesa vibradora para compactación.....	19
Figura 4: Mesa de sacudidas.....	20
Figura 5: Maquinas utilizadas para los ensayos de resistencia a la flexión.....	21
Figura 6: Maquina de compresion de probetas de mortero	22
Figura 7: Almacenamiento de las borras de salmuera	24
Figura 8: imagen cercana de la condicion de las borras de salmuera	24
Figura 9: Borra de salmuera luego de secado ambiental y disgregacion manual	29
Figura 10: Grafico de la distribución del diámetro de partículas de la arena gruesa.....	31
Figura 11: Resultados del ensayo de trabajabilidad por cono de Abrams	32
Figura 12: Resultados del ensayo de trabajabilidad por mesa de sacudidas.....	32
Figura 13: Probetas de mortero luego del desmoldaje.....	33
Figura 14: Densidades de las mezclas de mortero.....	34
Figura 15: resultados de ensayo de resistencia a flexión a diversos tiempos de curado.....	35
Figura 16: progresión de la resistencia a la compresión a diversos días de curado.....	37
Figura 17: Variación de la resistencia a la compresión en comparación a la mezcla patrón.....	38
Figura 18: Diagrama del procedimiento de tratamiento primario.....	46

Índice de tablas.

Tabla 1: Dosificación de las mezclas de mortero	18
Tabla 2: promedio de datos históricos de humedad y pH de las borras de salmuera.....	24
Tabla 3: Aproximación de la composición de las borras de salmuera.....	26
Tabla 4: Resultados del procedimiento de tamizado de la borra	29
Tabla 5: propiedades físicas de la arena gruesa.....	30
Tabla 6: Resultados del procedimiento de tamizado de la arena gruesa.....	31
Tabla 7: Registro de pH y %Humedad de las borras de salmuera.....	47
Tabla 8: Impurezas que ingresan al tratamiento primario	48
Tabla 9: Masa removida por el tratamiento primario	49
Tabla 10: Masa final de los componentes principales de la borra de salmuera	49
Tabla 11: Valores experimentales de las propiedades de la arena gruesa	51
Tabla 12: Resultados experimentales de densidad a los 3 días.....	52
Tabla 13: Resultados experimentales de densidad a los 5 días.....	52
Tabla 14: Resultados experimentales de densidad a los 7 días.....	52
Tabla 15: Resultados experimentales de densidad a los 28 días.....	52
Tabla 16: Resultados experimentales de flexión a los 3 días.....	53
Tabla 17: Resultados experimentales de flexión a los 3 días.....	53
Tabla 18: Resultados experimentales de flexión a los 7 días.....	53
Tabla 19: Resultados experimentales de flexión a los 28 días.....	54
Tabla 20: Resultados experimentales de compresión a los 3 días	55
Tabla 21: Resultados experimentales de compresión a los 5 días	56
Tabla 22: Resultados experimentales de compresión a los 7 días	57
Tabla 23: Resultados experimentales de compresión a los 28 días	58

1. Introducción

La generación de residuos industriales es un desafío creciente en la industria química; en el caso de la industria del cloro soda uno de estos residuos es la borra de salmuera. Este subproducto se caracteriza por contener diversos compuestos químicos, provenientes principalmente de la sal de roca utilizada como materia prima.

En la mayoría de los casos, estas borras son consideradas desechos no peligrosos debido a su baja toxicidad y naturaleza química estable. Actualmente, su gestión es realizada por una empresa contratada que se encarga de recolectarlas, transportarlas y disponerlas en vertederos autorizados bajo estrictos controles normativos. Este proceso, aunque asegura una correcta disposición desde el punto de vista ambiental, representa un costo significativo para la empresa generadora y no aprovecha el potencial valor económico y funcional de estos residuos, los cuales podrían ser revalorizados en aplicaciones industriales.

Chile enfrenta actualmente un problema creciente en la capacidad de sus vertederos, los cuales están llegando a su límite debido al incremento en la generación de residuos sólidos. La mayoría de estas instalaciones han superado su capacidad o tienen una vida útil de menos de 10 años, lo que plantea serios desafíos ambientales y de salud pública (ANIR, 2023). Según el Ministerio del Medio Ambiente (MMA, 2021), el 96% de los residuos domiciliarios terminan en rellenos sanitarios, vertederos o basurales, mientras solo un 4% se recicla. Esto subraya la necesidad de mejorar las prácticas de gestión de residuos en el país.

La revalorización de residuos industriales se presenta como una alternativa viable para minimizar los impactos ambientales y promover la economía circular. El presente estudio tiene como objetivo evaluar la viabilidad técnica de reutilizar la borra de salmuera generada por una planta cloro-soda como aditivo en mezclas de mortero. Para ello, se realizó una caracterización fisicoquímica del residuo, se estudió su granulometría y se confeccionaron mezclas de mortero con diferentes proporciones de borra. Además, se llevaron a cabo ensayos de trabajabilidad y propiedades mecánicas para determinar el impacto de la borra en el rendimiento del material.

Esta investigación busca no solo ofrecer una solución práctica para la gestión de un residuo industrial, sino también contribuir al desarrollo de materiales de construcción más sostenibles. Los resultados

obtenidos podrían ser de utilidad para la industria química y de la construcción, promoviendo prácticas más responsables desde el punto de vista ambiental y económico

2. Estado del arte

En la industria cloro-soda, las borras de salmuera se generan durante el tratamiento primario de la salmuera, constituyendo uno de los principales residuos del proceso. Su composición está directamente relacionada con la mineralogía de la sal de roca empleada como materia prima. La gran cantidad de sal utilizada en estos procesos resulta en la generación de volúmenes significativos de este residuo, los cuales requieren una gestión adecuada para su disposición final. Ante las implicaciones económicas y ambientales asociadas al desecho de grandes cantidades de residuos, ya sean peligrosos o no, han surgido importantes esfuerzos para otorgarles una segunda vida. Estos esfuerzos buscan fomentar una economía circular y reducir los costos relacionados con su disposición.

Actualmente ha habido varias investigaciones acerca de la revalorización de este residuo, principalmente como aditivo en materiales de construcción. Uno de los países donde ha habido un gran interés en el tema es la India donde el enfoque de revalorizar las borras de salmuera en materiales de construcción es muy fuerte. Algunas plantas en la India han adoptado métodos innovadores para la revalorización de borras de salmuera. Un ejemplo notable es el uso de estos lodos en la fabricación de ladrillos, un proceso detallado en un Procedimiento Operativo Estándar (SOP) emitido por el Central Pollution Control Board (2021). Este procedimiento consiste en una mezcla de borras de salmuera, cal, cenizas volantes, cemento, arena y agua para la producción de ladrillos en la planta cloro soda.

Una reutilización estudiada es el remplazo parcial del cemento por borra de salmuera en diversos materiales de construcción. En el caso del hormigón, un estudio realizado por Pingle y Saraswat (2018) demuestra la posibilidad de utilizar borras salinas provenientes de la industria papelera en la confección de hormigón mediante un remplazo parcial del cemento. En este caso se determina un remplazo máximo del 7% para maximizar las resistencias mecánicas del hormigón, la borra salina si bien origina de una planta papelera presenta compuestos presentes en borras procedentes de la industria cloro soda como carbonato de calcio y sílice. Hussain A. (2024) exploró otro enfoque en el remplazo parcial del cemento, esta vez realizando un remplazo parcial en la confección de mortero, llegando a mejorar las propiedades del mortero hasta un remplazo aproximado de 9%.

En estos estudios la composición de la borra y su fina granulometría es uno de los principales incentivos para probar su revalorización en la confección de materiales de construcción como el hormigón o morteros. Debido a su tamaño de partícula, las borras de salmuera podrían ser utilizadas como un remplazo de aditivo de relleno tradicionales como la cal molida, mejorando así las resistencias mecánicas de mortero y hormigón al generar un mejor empaquetado de la mezcla. Izidoro et al. (2021).

Además del remplazo parcial de cemento hay estudios que prueban no solo utilizar borras de salmuera para reducir la cantidad de cemento utilizado, sino que también utilizan cenizas volantes. (Khan et al., 2019) proponen una mezcla de cenizas, cemento, borras de salmuera, arena, cal y cloruro de calcio para confeccionar ladrillos cuya resistencia a los 28 días ronda los 18 N/mm². Similarmente, Garg y Pundir (2014) propusieron una mezcla de 20% borra de salmuera, 30% cenizas volantes y un 50% de cemento para la confección de materiales no estructurales, específicamente ladrillos y bloques de pavimentos. Los resultados de esta investigación dieron resultados positivos indicando que una mezcla de 20% borra de salmuera, 30% ceniza volante y 50% cemento otorgaba los mejores resultados de resistencia de las 3 mezclas estudiadas. Además, los productos finales de la investigación cumplieron con los estándares locales de la India.

En el ámbito de materiales de construcción la confección de ladrillos no es el único método de revalorización para las borras de salmuera. En un estudio Chen et al. (2019) investigaron la utilización de la borra de una planta cloro soda en una mezcla de cemento, agua, agregados gruesos y finos para la obtención de una mezcla final de baja resistencia a la compresión y un flujo en tubo aceptable para ser utilizada como material controlado de baja resistencia.

Otro método prometedor en el ámbito de materiales de construcción es el uso de borras de salmuera en la producción de materiales geo poliméricos, combinándolas con cenizas volantes. Este proceso, propuesto por Verma et al. (2017) permite fabricar bloques de pavimentación y ladrillos sin cemento, alcanzando resistencias a la compresión de hasta 20 MPa. Además, la geopolymerización inmoviliza elementos tóxicos, como metales pesados, en una matriz química estable, lo que mejora su seguridad ambiental y viabilidad como material de construcción

La confección de morteros y hormigones, pese a ser la reutilización más práctica y escalable a un nivel industrial, no es el único ámbito estudiado para la revalorización de este residuo. Un enfoque estudiado por Shukla (2015) es la recuperación de sulfato de bario en aquellos casos donde el sulfato

de bario es un componente significativo de las borras de salmuera. Este proceso implica una separación química utilizando ácido clorhídrico (HCl) para disolver compuestos solubles, como carbonatos y cloruros, dejando el BaSO_4 como componente insoluble. El producto obtenido tendría una pureza del 93%.

Otro enfoque desarrollado por Verma (2016) utiliza las borras de salmuera en la producción de materiales flexibles y moldeables para el blindaje de radiación. Este proceso combina las borras con polímeros como el polidimetilsiloxano (PDMS) el cual es un polímero orgánico basado en silicio, generando materiales con capacidad de atenuación de hasta el 90% de rayos X a 30 kVp.

Un aspecto para considerar es que no todas estas investigaciones tienen la misma composición de las borras de salmuera; como se mencionó anteriormente esto depende del origen de la sal de roca utilizada y estas pueden variar considerablemente. Pese a esto, las investigaciones mencionadas anteriormente contienen métodos para revalorizar borras de salmuera de diversas composiciones, ya sean predominantemente calcio, o bien que presenten compuestos de bario que serían los dos tipos de borras de salmuera más comunes en estas investigaciones, ambas con la presencia de sílice.

A partir de la revisión bibliográfica resumida en esta sección, se puede concluir que existe oportunidad de revalorizar las borras generadas en la producción de cloro-soda. Este trabajo de memoria de título se enmarca dentro de este contexto y tiene como objetivo verificar la factibilidad de aplicar una estrategia de revalorización de dichas borras, en condiciones de la planta cloro-soda en estudio.

3. Objetivos

3.1. Objetivo general.

Revalorizar las borras de salmuera producidas por una planta cloro-soda

3.2. Objetivos específicos.

- Caracterizar las borras de salmuera
- Identificar opciones de revalorización.
- Validar experimentalmente el uso de borras de salmuera en la opción de revalorización seleccionada.

4. Metodología

Este capítulo presenta la metodología empleada en la investigación sobre la revalorización de las borras de salmuera de la planta cloro-soda local. Se inicia con la descripción del procedimiento de caracterización de las borras, con el objetivo de determinar su composición química, mineralógica y otras propiedades relevantes. Posteriormente, se explica el proceso de selección de una estrategia de revalorización, basada en los resultados de la caracterización y una revisión exhaustiva de la literatura. Finalmente, se detalla la metodología para evaluar la viabilidad técnica de la opción seleccionada, buscando determinar si el residuo de borra de salmuera tiene lo necesario para ser reutilizada.

4.1. Caracterización de las borras de salmuera

En esta sección del capítulo de metodología se describe el procedimiento para la elaboración de un diagrama de flujo del proceso de tratamiento primario además de la obtención de una aproximación de la composición del residuo de borras de salmuera. Para este procedimiento se utilizaron principalmente manuales de operación proporcionados por la planta cloro-soda, registro de datos del laboratorio de la empresa y visitas en planta para la identificación de equipos para el caso del diagrama de flujo.

4.1.1. Diagrama de flujo y balance de materia

Los manuales de operación de la planta cloro-soda proporcionan una descripción detallada del proceso de producción en la planta. A partir de esta información, se identificaron las etapas del tratamiento primario, donde se genera la borra de salmuera, y se elaboró un diagrama de flujo del proceso. Este diagrama permitió identificar las corrientes de proceso relevantes para la formación y salida de la borra del sistema de tratamiento primario.

Tras identificar las corrientes principales del tratamiento primario de la salmuera, se realizó un balance de materia global del sistema para determinar la composición de la borra de salmuera. Para este balance, se utilizaron los valores de operación normal descritos en los manuales de tratamiento primario, secundario y electrólisis, asumiendo un estado estacionario del proceso. Además, para la realización del balance se mantuvo la suposición de un estado estacionario del proceso de tratamiento.

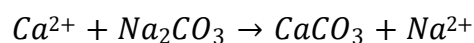
La cantidad de impurezas que ingresan al sistema se calculó a partir de la cantidad de sal necesaria para concentrar la salmuera de clorinada hasta 300 g/L de cloruro de sodio. Con base en esta cantidad de sal se determinaron las cantidades de impurezas que ingresan al sistema, luego se consultaron los valores máximos permitidos de estas impurezas a la salida del tratamiento primario, especificados en

las tablas de especificaciones de la salmuera primaria. Estos valores se utilizaron para realizar balances de materia individuales para cada componente principal, considerando los tratamientos de remoción empleados en esta etapa.

Los principales compuestos eliminados durante el tratamiento primario de la salmuera son el calcio y el magnesio. Además, en menores proporciones, también se remueven hierro y sílice como también el resto de los compuestos insolubles presentes como impurezas en la sal. Las reacciones químicas que intervienen en la remoción de estos compuestos son las siguientes.

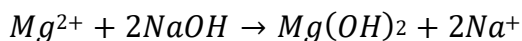
1. Calcio (Ca)

El calcio disuelto en la salmuera se debe llevar a una concentración menor a 2,5 partes por millón, para lograr esto se hace reaccionar con una solución en exceso de carbonato de sodio (Na_2CO_3) para dar lugar a carbonato de calcio (CaCO_3), el cual es insoluble en las condiciones de la salmuera, facilitando su remoción.



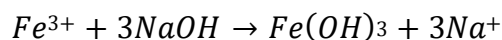
2. Magnesio (Mg)

Después del tratado del calcio en el reactor 104-S1 se agrega soda caustica a la corriente de salmuera lo que provoca la precipitación del magnesio en forma de hidróxido de magnesio ($\text{Mg}(\text{OH})_2$), el cual es insoluble bajo las condiciones del proceso.



3. Hierro (Fe)

El hierro reacciona de manera similar al magnesio, su remoción ocurre con la adición de la soda caustica formando hidróxido de hierro ($\text{Fe}(\text{OH})_3$), el cual también es insoluble.



4. Sílice (SiO_2)

A diferencia de los demás compuestos la sílice no se elimina mediante una reacción química, su remoción se basa en un arrastre mecánico por parte del magnesio durante las etapas de decantación en las piscinas 104-D1.

A partir de los valores máximos permitidos, se realizaron cálculos estequiométricos basados en las reacciones mencionadas anteriormente para determinar la cantidad de cada compuesto que abandona el sistema, expresado en kilogramo por hora. Esto permitió obtener un estimado de la composición química de la borra de salmuera, identificando sus principales componentes y la proporción relativa entre ellos.

4.1.2. Porcentaje de humedad y pH

Una vez completados los balances de materia, que permitieron la obtención de un aproximado de la composición de las borras de salmuera, se procedió a la recopilación de datos históricos de pH y porcentaje de humedad del residuo. Estos datos, registrados por el laboratorio de la planta cloro-soda desde el año 2022 sirvieron como base para el análisis de pH y humedad en las borras.

Con la información recopilada se calcularon los valores promedios de los parámetros mencionados, así como también su respectiva desviación estándar, con el objetivo de evaluar la consistencia y posibles variaciones significativas de la humedad y pH de las muestras de las borras de salmuera. Además, dada la cantidad de humedad, la densidad de la salmuera concentrada y la concentración de NaCl en esta se obtuvo un aproximado de la cantidad de NaCl que contiene la borra de salmuera con la siguiente ecuación.

$$m_{Borra} \cdot \frac{\text{Humedad}}{\rho_{salmuera}} \cdot 300 = m_{NaCl}$$

4.2. Identificación de opciones de revalorización

Con una caracterización aproximada del residuo y la identificación de sus principales componentes, se procedió a realizar una revisión bibliográfica con el objetivo de identificar posibles opciones de revalorización del residuo basadas en sus componentes y propiedades químicas. Para esta revisión, se consultaron artículos académicos que documentan reutilizaciones previas de borras salinas provenientes de distintas industrias químicas, así como aplicaciones comunes de los principales compuestos presentes en el residuo en diversas áreas industriales.

La investigación se centró en analizar si los componentes presentes en las borras de salmuera facilitaban su revalorización en las ideas ya utilizadas en otros lugares o si bien alguno de sus componentes o propiedades presentaba un problema para alguna de estas revalorizaciones. Dado esto las posibles alternativas de revalorización fueron evaluadas considerando su viabilidad técnica y económica con un enfoque en soluciones prácticas y fáciles de implementar.

4.3. Evaluación de las borras de salmuera

En esta sección de la metodología se detalla el procedimiento experimental realizado para evaluar si las borras de salmuera sirven para la opción de revalorización seleccionada, en este caso como aditivo de mortero. Se detallan los equipos de laboratorio utilizados además de los ensayos realizados para obtener las conclusiones.

Con el objetivo de evaluar la opción de revalorización del residuo se extrajo una muestra representativa de éste, la cual fue sometida a un proceso de preparación previo a su estudio y posterior utilización en mezclas de mortero. Este proceso de preparación consistió en un secado al aire libre durante 24 horas para reducir su contenido de humedad a niveles manejables y una posterior disgregación manual del residuo para separar las partículas aglomeradas y obtener una cantidad adecuada para su análisis granulométrico y su utilización como aditivo en la elaboración de mortero.

4.3.1. Granulometría

Una cualidad importante de un material que se vaya a utilizar como aditivo de mortero es el tamaño de sus partículas, es por esto por lo que se decidió estudiar el tamaño de partículas tanto de las borras de salmuera. Por otro lado, las normas chilenas establecen límites sobre el diámetro de partícula que puede tener un árido fino como la arena gruesa, con el objetivo de cumplir con estas normativas también se realizó un estudio del diámetro de partículas de la arena para asegurar el cumplimiento normativo.

4.3.1.1. Granulometría Borra de salmuera

El análisis granulométrico de la borra de salmuera se realizó utilizando una tamizadora con distintos tamices. Los 776 gramos de muestra preparada se hicieron pasar por una serie de tamices con las siguientes aberturas nominales: N°8 (2,36 mm), N°10, N°120, N°200 y N°230 (0,063 mm), cubriendo un rango de tamaño de partícula entre 2,36 mm y 0,063 mm.

Tras un tiempo de tamizado de 3 minutos, se pesó el material retenido en cada tamiz. A partir de estos datos, se calculó el porcentaje pasante por cada tamiz, lo que permitió construir la curva granulométrica y determinar la distribución de tamaños de las partículas del residuo. La tamizadora utilizada para este ensayo se puede apreciar en la figura 1 a continuación.



Figura 1: Tamizadora utilizada para el estudio de granulometria de la borra de salmuera

4.3.1.2. Granulometría árido arena gruesa

La granulometría de la arena gruesa que se utilizó para la confección de mortero se realizó según el procedimiento estipulado por la norma NCh165 (Instituto Nacional de Normalización, 1977). Para la realización de este ensayo se utilizó una serie de tamices con las siguientes aperturas N°4 (4,76 mm) N°8 (2,38 mm), N°16 (1,19 mm), N°30 (0,59 mm), N°50 (0,3 mm) y N°100 (0,15 mm). El tiempo de tamizado fue de 5 minutos y luego se pesaron las cantidades retenidas en cada tamiz para luego la distribución del diámetro de partícula de la arena y comprobar si cumple con lo establecido con la normativa para áridos y agregados finos.

4.3.2. Propiedades físicas del árido fino

Con el propósito de caracterizar el árido fino a utilizar en las mezclas de mortero y asegurar un adecuado diseño de la dosificación, se determinaron sus propiedades físicas fundamentales. Específicamente, se obtuvo la densidad real, la densidad neta y la absorción de agua de la arena gruesa, siguiendo los procedimientos establecidos en la norma NCh 1239 (Instituto Nacional de Normalización, 1981). Este análisis fue realizado con el propósito de ajustar con precisión la cantidad de arena y agua en la dosificación del mortero.

4.4. Confección de mezclas de mortero

Tras la obtención de las propiedades físicas de la arena, se determinó la dosificación de la mezcla de mortero. Las materias primas del mortero; cemento, arena, borra de salmuera y agua se observan en la figura 2, estos materiales se homogenizaron en una mezcladora de cemento de dos velocidades.



Figura 2: Materiales de la confección de mezcla y mezcladora utilizada

Se realizaron 4 mezclas distintas considerando una pérdida del 15% del material en el moldaje, donde la principal variación fue la cantidad de borra de salmuera utilizada como aditivo en la mezcla de mortero, yendo de un 0% para la mezcla de prueba hasta un 10% con relación al cemento para la borra de salmuera.

Material [kg]	MBS0.0	MBS2.5	MBS5.0	MBS10.0
Cemento	1,295	1,295	1,295	1,295
Borra de salina	0,000	0,032	0,065	0,130
Arena	3,900	3,900	3,900	3,900
Agua	0,828	0,828	0,828	0,828

Tabla 1: Dosificación de las mezclas de mortero

El procedimiento para la confección de la mezcla homogénea fue la siguiente:

1. En el caso de la mezcla de prueba se le agrego cemento y luego agua a la mezcladora, para el resto de las mezclas la borra de salmuera se agregó junto al cemento a la mezcladora. Una vez agregado estos materiales se inició la mezcladora para homogenizar la mezcla.

2. Una vez obtenida la contextura deseada del cemento se procedió a agregar la arena gruesa a la mezcla de mortero donde se dejó la mezcladora funcionando por unos 2 minutos hasta obtener la mezcla homogénea deseada.
3. Tras tener la mezcla de mortero lista se procedió a realizar ensayos de trabajabilidad de la mezcla, se realizaron los ensayos de consistencia por mesa de sacudidas y ensayos de cono de Abrams adaptado para mortero para cada mezcla.
4. Obtenidos los datos de trabajabilidad para cada mezcla se procedió a llevar a cabo la preparación de las probetas de mortero las cuales se observan en la figura 3. Para esto se llenaron las probetas según lo establecido por la norma NCh 2260 (Instituto Nacional de Normalización, 1996). El llenado de moldes y la compactación de las mezclas en los moldes fueron idénticos para cada mezcla de mortero producida.
5. A los 3 días de moldaje se desmoldaron las probetas y se realizaron ensayos mecánicos para 2 probetas de 0, 2.5, 5 y 10 porciento de adición de borra de salmuera. El resto de las probetas se guardaron en la cámara de curado bajo condiciones constantes de temperatura y humedad (24°C y 90% humedad). Se retiraron muestras para ensayos a los 5, 7 y 28 días.



Figura 3: probetas de mrtero en la mesa vibradora para compactación

4.5. Ensayos de trabajabilidad de la mezcla

Previo al moldaje se evaluó la trabajabilidad o docilidad de la mezcla de mortero. Para obtener estos resultados se utilizaron los ensayos de consistencia por mesa de sacudidas y ensayos de cono de Abrams adaptado para mortero, los cuales se realizaron de acuerdo con la norma NCh 2257 (Instituto Nacional de Normalización, 1996) Para el caso de la mesa de sacudidas que se observa a continuación.



Figura 4: Mesa de sacudidas

Para el caso del ensayo por mesa de sacudidas se midió el diámetro de la mezcla después de las 25 sacudidas establecidas por la norma y luego se obtuvo un promedio de estos valores. Para el ensayo por cono de Abrams adaptado para mortero se realizaron 2 capas de 20 golpes con la varilla, luego se retiró el cono y se midió el asentamiento del cono, es decir la diferencia entre la altura del cono y el punto más alto del mortero después de que se haya asentado. Con estos datos se obtuvo la trabajabilidad de la mezcla y una idea de cómo la adición de la borra de salmuera afecta el comportamiento de la mezcla de mortero.

4.6. Ensayos mecánicos

Con el fin de determinar cómo afecta la adición de la borra de salmuera en las principales propiedades mecánicas del mortero, las cuales influyen directamente en su comportamiento estructural y durabilidad se procedió a realizar ensayos de resistencia a la flexión y de resistencia a la compresión.

4.6.1. Ensayo de resistencia a la flexión

Se midieron 2 probetas de mortero por porcentaje de adición de borra de salmuera a los 3, 5, y 7 días y 3 probetas para los resultados de 28 días. El procedimiento se realizó según la norma ASTM C78 (ASTM International, 2018).



Figura 5: Maquinas utilizadas para los ensayos de resistencia a la flexión

La figura 5 muestra la maquina utilizada para obtener los resultados es manual y entrega una lectura en el momento de quiebre de la probeta de mortero. Con el valor de la lectura entregada por la maquina se puede obtener el valor de la carga máxima de la siguiente manera:

$$P[\text{kgf}] = \text{Lectura} \cdot 3,4 + 15,25$$

Con el valor de la carga máxima se puede obtener el valor de la resistencia a la flexión del mortero en MPa.

$$\sigma \left[\frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \right] = \frac{3 \cdot P \cdot L}{2 \cdot b \cdot d^2}$$

Donde L es la distancia entre los 2 puntos inferiores de la máquina, que para este caso es de 12cm y los valores de b y d son la altura y ancho de las probetas de mortero, estandarizadas en 4cm. Obtenidos los resultados de cada probeta se obtuvo un promedio para cada porcentaje de adición de borra de salmuera, luego se tabularon y graficaron los resultados a los distintos días.

4.6.2. Ensayo de resistencia a la compresión

El procedimiento del ensayo de resistencia a la compresión se realizó de acuerdo con la norma ASTM C349 (ASTM International, 2018), que describe el procedimiento para la determinación de la

resistencia a la compresión de mortero utilizando porciones de primas rotos del ensayo de flexión. Para cada porcentaje de adición de borra de salmuera se tuvieron 4 muestras tras el ensayo de flexión realizado previamente a los 3, 5, 7 y 28 días.



Figura 6: Máquina de compresion de probetas de mortero

La máquina utilizada para la obtención de datos se muestra en la figura 6, esta máquina aplica una carga axial sobre un área de 40x40 mm sobre el mortero que aumenta progresivamente hasta que detecta la rotura de la probeta, en ese momento registra la carga máxima aplicada en kilo newton y además la resistencia a la compresión en MPa, utilizando la siguiente formula.

$$\sigma[MPa] = \frac{F}{A}$$

Donde F es la carga máxima aplicada en newton y el área es el área estandarizada para este proceso que es de 1600 mm². Para cada día de ensayo se registraron 4 valores por dosificación de mortero, estos valores se promediaron y los resultados se tabularon y graficaron.

5. Resultados y discusiones

En este capítulo de la investigación se presentan los resultados obtenidos para cada uno de los objetivos específicos de acuerdo con el procedimiento establecido en el capítulo de metodología. Primero se entregan los resultados del diagrama de flujo y la caracterización del residuo de borras de salmuera, cruciales para la identificación de opciones de revalorización del residuo. Seguido a esto se presentan los resultados de la investigación sobre que opción de revalorización que se decidió probar para las borras de salmuera. Finalmente se presentan y discuten los resultados del tercer objetivo específico, enfocado en la validación experimental de la opción de revalorización previamente identificada.

5.1. Caracterización de las borras de salmuera

En la siguiente sección del capítulo de resultados y discusiones se presentan y discuten los resultados del procedimiento de caracterización de las borras de salmuera, incluidos la confección del diagrama de flujo, la identificación de los principales componentes de las borras de salmuera y la determinación de su pH y humedad.

5.1.1. Diagrama de flujo de tratamiento primario

A partir de los manuales de operación y de visitas a planta se desarrolló el diagrama de flujo del tratamiento primario el cual se puede apreciar en los anexos A como la figura 18.

Del diagrama se puede observar que el residuo de borra de salmuera se produce principalmente en el reactor 104-S1 donde el calcio se hace reaccionar junto a una solución preparada de carbonato de sodio para generar carbonato de calcio que luego precipitará. En las piscinas de decantación se genera la remoción del magnesio y la sílice con la adición de soda y floculantes a la salmuera.

Otra menor cantidad de borras es generada a partir del lavado de filtros primarios y otros equipos como el mismo reactor 104-S1, Todos estos residuos generados en el lavado de estos equipos son llevados a la laguna 105-D1 donde son almacenadas para luego ser llevadas al estanque 640-D1 de borras de salmuera donde luego ingresan al filtro de prensa donde se reduce su humedad, las borras son posteriormente almacenamiento en el galpón al aire libre mientras que la salmuera removida es reutilizada.

El almacenamiento de las borras de salmuera se puede apreciar en las figuras 7 y 8. Durante su almacenamiento final las borras de salmuera interactúan con el ambiente lo cual podría afectar factores como su humedad.



Figura 7: Almacenamiento de las borras de salmuera



Figura 8: imagen cercana de la condicion de las borras de salmuera

5.1.2. Humedad y pH de las borras de salmuera

Los datos de humedad y pH de las borras se obtuvieron a partir de los registros del laboratorio de la planta cloro-soda como se documentó en el capítulo de metodología. A la fecha de la investigación existen 10 registros sobre los resultados de pH y humedad de las borras de salmuera empezando desde el 2022. El promedio y desviación estándar de estos datos se presentan en la tabla 2 a continuación.

Parámetro	Promedio	Desviación estándar
% Humedad	38,55	3,50
pH	9,28	0,36

Tabla 2: promedio de datos históricos de humedad y pH de las borras de salmuera

El análisis de la documentación reveló un porcentaje de humedad promedio de 38,55%. Este valor indica un contenido de humedad moderado del residuo. El pH promedio fue de 9,28, lo que clasifica al residuo como alcalino. Estas características fisicoquímicas son relevantes para evaluar las opciones de revalorización futuras del residuo. Debido a que las borras de salmuera son almacenadas a la intemperie su porcentaje de humedad puede variar con el tiempo dependiendo de las condiciones climáticas; el valor registrado es el resultado de la medición de las borras de salmuera más recientes del montón. Aquellas borras que llevan más tiempo almacenadas podrían presentar menores porcentajes de humedad si el clima lo favorece.

Los valores de pH y humedad mostraron una baja variabilidad, con desviaciones estándar de 0.36 y 3.50, respectivamente, indicando que estas propiedades del residuo tienden a mantenerse cercanas a los promedios obtenidos. Esta baja variabilidad es un aspecto favorable para la revalorización del residuo de borras de salmuera; esta estabilidad en las propiedades como la humedad permite un mejor control sobre las proporciones del residuo sobre mezclas que podrían ser sensibles frente a la incorporación de agua a ella, como en el caso de mezclas de materiales de construcción. Por otro lado, el pH estable de las borras permite evitar fluctuaciones en reacciones químicas durante su reutilización. Esto contribuye a una estabilidad en las propiedades del producto final de revalorización, lo cual es esencial en aplicaciones como materiales de construcción u otras.

5.1.3. Composición de las borras de salmuera

Mediante la realización del balance de materia de los principales componentes de interés, incluyendo carbonato de calcio, magnesio, sílice, hidróxido de hierro, cloruro de calcio y compuestos insolubles, se obtuvo una aproximación detallada de la composición química de las borras de salmuera. Los resultados obtenidos a partir de este procedimiento se presentan en la Tabla 3. Es importante considerar que los valores presentados a continuación no son constantes debido a variaciones en la composición de la sal utilizada y a la posibilidad de un aumento de magnesio en la salmuera si el pH aumenta durante el tratamiento primario. Pese a esto, las variaciones no representan un gran cambio y los principales compuestos seguirán siendo los mismos en las borras de salmuera.

Componente	% en masa
CaCO ₃	31
SiO ₂	10

NaCl	10
Mg(OH) ₂	7
Fe(OH) ₃	2
Insolubles	39

Tabla 3: Aproximación de la composición de las borras de salmuera

Los cálculos anteriores de la composición de las borras de salmuera revelaron que el compuesto más predominante es el carbonato de calcio (CaCO₃), representando un tercio de la masa de la borra de salmuera. El segundo compuesto con mayor presencia fue la sílice (SiO₂), seguido por el cloruro de sodio (NaCl) y el hidróxido de magnesio (Mg(OH)₂), con una presencia menor de hidróxido de hierro (Fe(OH)₃). A diferencia del resto de los compuestos, la cantidad de cloruro de sodio se determinó a partir del valor de humedad de las borras. Para un kilogramo de borra, se estimó la presencia de 0.098 kilogramos de NaCl, lo que corresponde aproximadamente al 10% en masa.

Una fracción considerable de las borras corresponde a compuestos insolubles, impurezas inherentes a la sal de roca. Las impurezas presentes en la sal de roca dependen principalmente de su procedencia geográfica. Estas impurezas insolubles no se encuentran especificadas en la tabla de especificaciones de la sal utilizada por la planta cloro-soda, originaria del Gran Salar de Tarapacá en el norte de Chile.

La sal utilizada por el proceso está compuesta principalmente por halita, que contiene una pequeña proporción de materiales insolubles que incluyen una diversidad de compuestos minerales que pueden ser considerados impurezas de la sal. A partir de la información entregada por SERNAGEOMIN (2023) acerca de la composición química y mineralógica del salar, y considerando la geología de su cuenca, se pueden inferir algunos ejemplos de estos compuestos: sulfatos de calcio como el yeso (CaSO₄·2H₂O) y la anhidrita (CaSO₄); silicatos, siendo el cuarzo (SiO₂) un componente probable dado que es abundante en las rocas de la cuenca del salar; y carbonatos, con posibles trazas de calcita (CaCO₃). Estos compuestos son parcialmente eliminados del sistema de tratamiento primario mediante la piscina 104-D1 y los filtros primarios 104-F1/F2/F3.

Izidoro et al. (2021), en su estudio sobre las borras de salmuera provenientes de dos plantas cloro-soda similares, reportaron composiciones químicas comparables para ambos casos. Los principales componentes identificados en las muestras fueron calcio (40–20%), silicio (2.1–10%), sodio (2.9–6.1%), hierro (4.2–5%) y magnesio (6.5–7.5%). Estos elementos se encuentran presentes en formas minerales como halita, brucita, calcita y cuarzo, entre otros.

Debido a la presencia de estos minerales insolubles en la sal de roca original, el porcentaje en peso del carbonato de calcio y de la sílice presentes en las borras de salmuera pudo ser mayor al estimado previamente mediante el balance de masa. Además, la cantidad de calcio en el residuo podría ser considerablemente mayor al no solo ingresar carbonato de calcio si no también otras sales de calcio. Este aumento podría significar que el calcio represente porcentajes más altos de la masa total de la borra de salmuera. No obstante, los principales componentes de las borras de salmuera siguen siendo aquellos mencionados en la tabla 3.

Tal como se mencionó en secciones anteriores, la presencia de carbonato de calcio, sílice, hidróxido de magnesio y NaCl, ofrece un potencial significativo para su reutilización en materiales de construcción como aditivo en morteros. Cada uno de estos compuestos posee propiedades particulares que pueden influir en el desempeño del mortero y hormigón.

El carbonato de calcio, uno de los componentes principales de la piedra caliza, ha sido ampliamente estudiado en el área de materiales de construcción. Cuando se utiliza en forma de caliza finamente molida, puede mejorar la reología y la estabilidad del mortero, haciéndolo más manejable (Lundgren, 2004). Además, estudios han demostrado que sustituir hasta un 10% del cemento por carbonato de calcio mejora la trabajabilidad de la mezcla y aumenta la resistencia a la compresión en los primeros días, debido a una mayor tasa de hidratación. Sin embargo, es importante notar que la resistencia a los 28 días puede disminuir en comparación con una mezcla de cemento puro (Ali et al., 2015).

La sílice también representa un componente clave con beneficios potenciales. Su presencia en las borras de salmuera puede contribuir a incrementar la resistencia y durabilidad del hormigón. Esto se debe a la reacción puzolánica entre la sílice y compuestos del cemento, como el óxido de aluminio (Al_2O_3) y el hidróxido de calcio ($Ca(OH)_2$), que genera geles de silicato de calcio hidratado (C-S-H) y aluminato de calcio hidratado (C-A-H). Estos productos mejoran significativamente las propiedades mecánicas y la durabilidad del hormigón (Lin et al., 2023).

El hidróxido de magnesio es un compuesto menos estudiado en este contexto, y sus efectos pueden variar. Una pequeña cantidad de hidróxido de magnesio puede incrementar la resistencia a la compresión del hormigón (Zhang et al., 2024). Sin embargo, cantidades mayores pueden resultar perjudiciales, debido a la formación de silicato de magnesio hidratado (M-H-S), que compite con el silicato de calcio hidratado (C-H-S) y reduce la resistencia del material final (Lothenbach et al., 2011). Por otro lado, el hidróxido de magnesio puede mejorar la resistencia del hormigón a altas

temperaturas, disminuyendo la pérdida de resistencia a temperaturas de hasta 600 °C (Pachta et al., 2021).

En contraste, el NaCl presenta desventajas en materiales de construcción debido a sus efectos corrosivos en el hormigón armado. Si bien algunos compuestos clorados, como el CaCl₂, se han utilizado como acelerantes del fraguado, el NaCl no comparte esta característica. Sin embargo, su uso podría considerarse en aditivos anticongelantes, donde actúa como depresor del punto de congelación (Myrdal, 2015).

En conclusión, la composición química de las borras de salmuera, rica en calcio y sílice, junto con su granulometría fina, las convierte en un recurso prometedor para su aplicación en mezclas de mortero y hormigón. Existe la posibilidad de que esto mejore las propiedades mecánicas de los materiales, aunque también es importante considerar que altos porcentajes de reemplazo o adición del residuo en la mezcla podrían afectar negativamente el desempeño mecánico, reduciendo la resistencia y estabilidad del producto final.

5.2. Evaluación experimental de las borras de salmuera

En esta sección del capítulo de resultados se presentan los diversos resultados de los ensayos experimentales realizados sobre las borras de salmuera. Se presentan los resultados de los procedimientos detallados en el capítulo de metodología como los resultados de la granulometría tanto de las borras como del árido fino a utilizar para la mezcla de mortero. Además, se muestran los resultados de los ensayos de docilidad o trabajabilidad de la mezcla de mortero como también los resultados de los ensayos de resistencias mecánicas de las probetas. Estos resultados son cruciales para evaluar la revalorización del residuo.

5.2.1. Granulometría de las borras de salmuera

Tras el secado al aire libre la muestra de borra de salmuera mostró un porcentaje de humedad del 22% y luego del disgregado manual del residuo aparentó tener un diámetro de partícula considerablemente fino como se observa en la siguiente figura.



Figura 9: Borra de salmuera luego de secado ambiental y disgregacion manual

Los resultados del peso y porcentaje retenido en cada tamiz del proceso de tamizado se muestran en la tabla 4.

N° de Tamiz	Abertura (mm)	Acumulado (kg)	Acumulado (%)
6	3,35	0,00	0,00
8	2,36	0,00	0,00
10	2	0,049	6,30
120	0,125	0,652	90,30
200	0,075	0,071	99,50
230	0,063	0,004	100,00

Tabla 4: Resultados del procedimiento de tamizado de la borra

De la tabla 4 se observa como aproximadamente el 94% de las partículas de la borra de salmuera tienen un diámetro de partícula menor a 2mm, el 84% de las partículas de las borras de salmuera presentan un diámetro entre los 2 y 0,125mm. Es importante destacar la presencia de una fracción fina considerable, con un 9,66% de las partículas presentando un diámetro inferior a 0,125 mm. Esta fracción fina puede tener una influencia significativa en la trabajabilidad y el empaquetamiento de las partículas en la matriz cementante

5.2.2. Caracterización del árido a utilizar

A continuación, en esta sección de los resultados de la evaluación experimental de las borras de salmuera, se presentan las propiedades de la arena gruesa utilizada en la confección de mortero junto al cemento y la borra de salmuera. Es importante conocer sus propiedades físicas para ajustar las

cantidades de agua y arena en la mezcla de mortero. La granulometría de la arena también se presenta con el fin de comprobar que esta cumple con los requerimientos establecidos por las normas chilenas.

5.2.2.1. Propiedades físicas de la arena gruesa

De acuerdo con los procedimientos establecidos en la norma NCh 1239 se obtuvieron las siguientes propiedades físicas del árido fino.

Propiedad	Valor	unidad
Densidad Real (R _{sss})	2731	Kg/m ³
Densidad Real (R _s)	2672	Kg/m ³
Densidad Neta (N)	2839	Kg/m ³
Humedad	0,4	%
Absorción	2,2	%

Tabla 5: propiedades físicas de la arena gruesa

Todos los valores de densidad de la arena gruesa se encuentran dentro de lo que se espera de un árido fino. Dado que la absorción de la arena es mayor que su humedad al utilizarla en la mezcla de mortero la arena le quita agua a la mezcla obteniéndose una mezcla de mortero más seca, es por esto que fue necesario agregar más agua a la mezcla de mortero, aproximadamente un 1,8% de la cantidad de agua originalmente utilizada para una dosificación 1:3:0,5.

5.2.2.2. Granulometría de la arena gruesa

Los resultados obtenidos del ensayo de granulometría de la arena gruesa se presentan en la tabla 6 y la figura 10. Estos resultados muestran una distribución granulométrica donde la mayor representación del diámetro de partícula se encuentra entre los 0,59 y 0,3mm, lo que se ajusta a los límites especificados por la NCh165.

Abertura de tamiz (mm)	Masa retenida (g)
9,25	5,30
4,76	32,2
2,38	91,5
1,19	163
0,59	206
0,3	28,4
0,15	4,5

Tabla 6: Resultados del procedimiento de tamizado de la arena gruesa

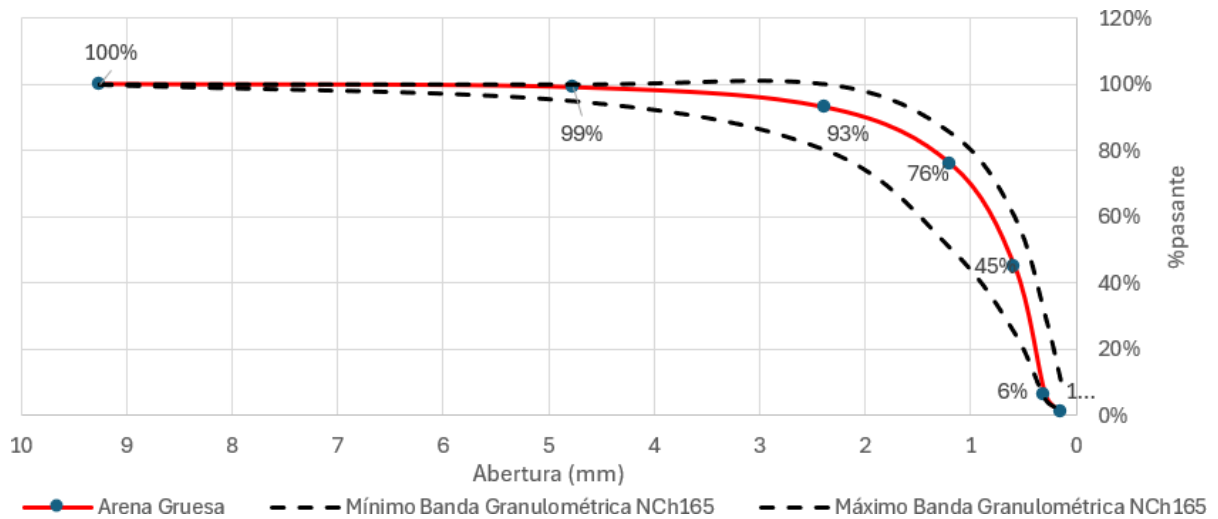


Figura 10: Gráfico de la distribución del diámetro de partículas de la arena gruesa

De los resultados obtenidos por la granulometría y las propiedades de la arena gruesa se puede concluir que el árido fino analizado cumple satisfactoriamente con los requisitos de la norma NCh165, los cuales se aprecian en la figura 10 representados por las líneas segmentadas del gráfico. El cumplimiento de los requisitos establecido por la norma hace adecuado el uso de la arena para como agregado fino en morteros. Su adecuada granulometría y sus propiedades físicas contribuyen a la trabajabilidad de la mezcla en estado fresco y a las propiedades mecánicas y de durabilidad del material endurecido como su resistencia a la compresión y a la flexión.

5.2.3. Ensayos de trabajabilidad de la mezcla

Previo al moldaje de las mezclas se realizaron los ensayos de trabajabilidad de cada mezcla confeccionada. Primero se registraron los resultados de la mesa de sacudidas y después se registraron aquellos obtenidos en el ensayo de cono. Los resultados de estos ensayos se presentan en los siguientes gráficos.

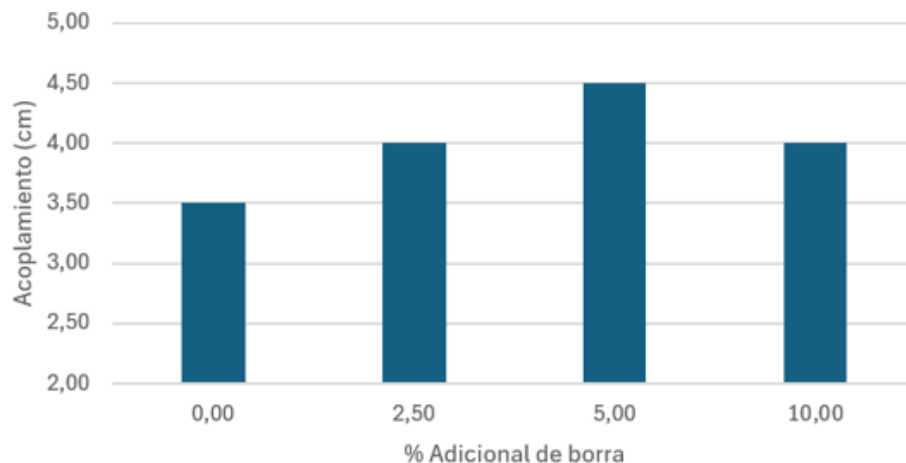


Figura 11: Resultados del ensayo de trabajabilidad por cono de Abrams

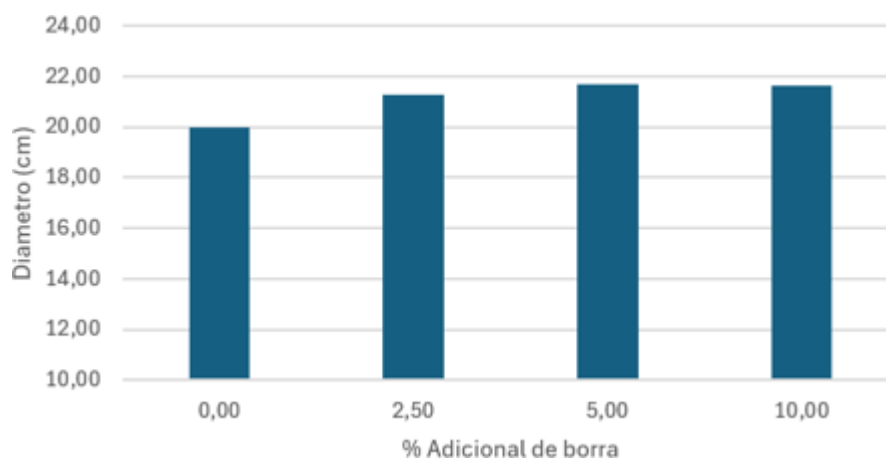


Figura 12: Resultados del ensayo de trabajabilidad por mesa de sacudidas

Los resultados obtenidos en los ensayos de trabajabilidad, tanto en la mesa de sacudidas como en el cono de Abrams, evidencian una leve mejora en la trabajabilidad de las mezclas con adición de borra de salmuera en comparación con la mezcla patrón (0% de adición). Se observa una correlación positiva entre el incremento en la proporción de borra de salmuera y la trabajabilidad de la mezcla hasta una adición del 5%. No obstante, al superar este umbral, se registra una ligera disminución en la trabajabilidad en comparación a la adición anterior, lo cual se aprecia con mayor claridad en los resultados del ensayo de cono de Abrams. En este ensayo, el máximo valor de asentamiento se obtuvo con una adición del 5%, mientras que con una adición del 10%, el valor decrece, aproximándose a los valores observados con una adición del 2.5%.

Este aumento inicial en la trabajabilidad podría atribuirse, en parte, a la introducción de agua en la mezcla a través de la borra de salmuera, la cual presenta una humedad del 22%. Consecuentemente, a mayor adición de borra, mayor es la cantidad de agua incorporada a la mezcla, lo que teóricamente debería favorecer la trabajabilidad de la mezcla. Sin embargo, la disminución observada con la adición del 10% de borra sugiere que, a altas dosificaciones, otros factores comienzan a predominar. Se postula que una adición excesiva de borra de salmuera incrementa la demanda de agua de la mezcla, superando el aporte de agua inicial de la borra y resultando en una reducción de la trabajabilidad. Esta mayor demanda de agua podría estar relacionada con un aumento en la concentración volumétrica de partículas sólidas en la mezcla, lo que puede reducir la cantidad de agua libre disponible para lubricar la mezcla y hacerla más trabajable (Krstulovic et al., 1994). Adicionalmente, se considera la posibilidad de que la borra presente cierta capacidad de absorción de agua, lo cual también contribuiría a la reducción del agua libre disponible, afectando negativamente la trabajabilidad, estos efectos negativos sobre la trabajabilidad solo se apreciarían a altos niveles de adición de borra de salmuera.

5.3. Ensayos mecánicos de las probetas

Las probetas se desmoldaron a los 3 días como se muestran en la figura 13. Luego del desmoldaje se realizaron ensayos mecánicos en 8 probetas mientras que el resto fue dejado en la sala de curado para su posterior uso en ensayos a los 5,7 y 28 días.



Figura 13: Probetas de mortero luego del desmoldaje

5.3.1. Masa y densidad de las probetas

Previo a los ensayos de resistencias del mortero se masaron las probetas y se promediaron los valores, dado que el volumen de las probetas es estandarizado en moldes de dimensiones de 16x4x4 centímetros, con un volumen de 256 cm³ se obtuvieron valores de densidad para cada dosificación que se muestran a continuación.

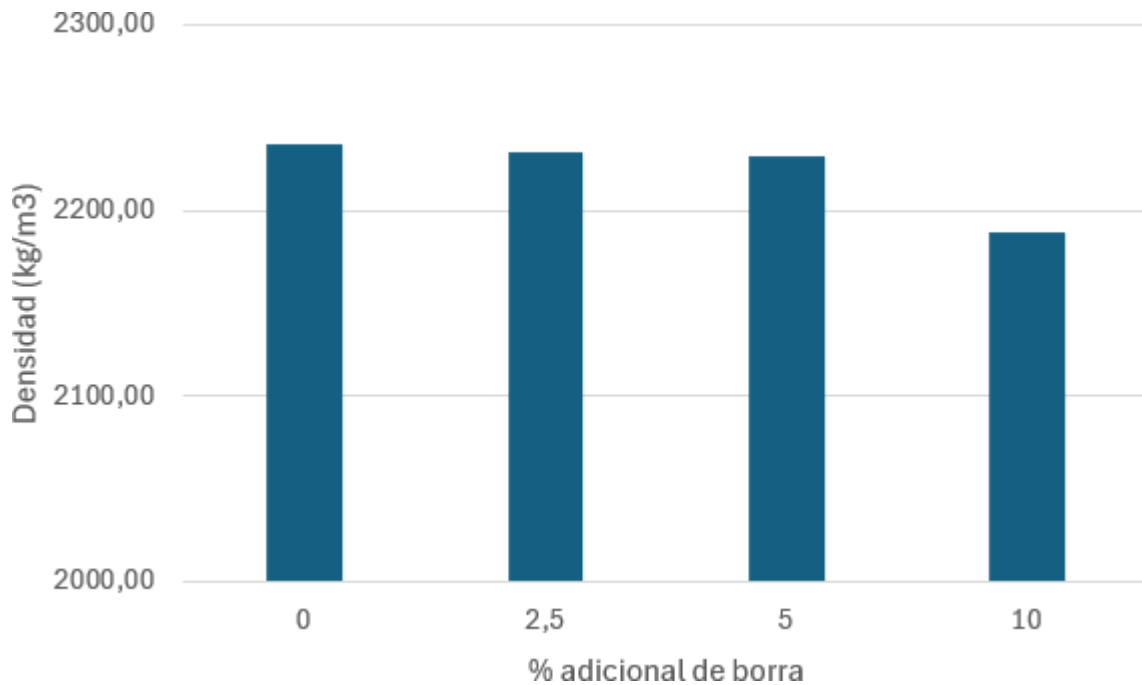


Figura 14: Densidades de las mezclas de mortero

Los resultados de densidad presentados en la figura 14, muestran que las tres primeras dosificaciones (2,5%, 5% y la mezcla patrón) presentan valores relativamente similares, con variaciones mínimas entre sí. En concreto, las dosificaciones de 2,5% y 5% exhiben una variación de densidad de no más del 0,2% con respecto a la mezcla patrón, aumentando en algunos días de ensayo y disminuyendo en otros.

En contraste, la dosificación con 10% de borra de salmuera muestra una leve disminución en la densidad del mortero, alcanzando un valor de 2186 kg/m³, lo que representa una reducción del 2% en comparación con la mezcla patrón. Esta disminución fue consistente a lo largo de todos los ensayos mecánicos, donde las probetas con 10% de adición presentaron consistentemente la menor masa.

Si bien la disminución de densidad en la dosificación al 10% es solo del 2% en comparación con las otras dosificaciones, este déficit podría tener un impacto significativo en sus resistencias mecánicas, resultando en una mezcla de mortero considerablemente más débil.

5.3.2. Ensayos de resistencia a la flexibilidad

En esta sección, se reportan los resultados correspondientes a los ensayos de flexión, cuyo objetivo fue evaluar la influencia de la adición de borra de salmuera en el comportamiento mecánico de la probeta de mortero y comparar los resultados con la mezcla patrón. Como se describió en la sección de metodología, se prepararon probetas con diferentes porcentajes de adición de borra de salmuera hasta un 10% y se determinó su resistencia con la maquinaria mecánica.

La Figura 15 presenta los resultados de los ensayos de resistencia a la flexión realizados en probetas de mortero con adiciones de borra de salmuera al 0% (patrón), 2.5%, 5% y 10%, a edades de 3, 5, 7 y 28 días.

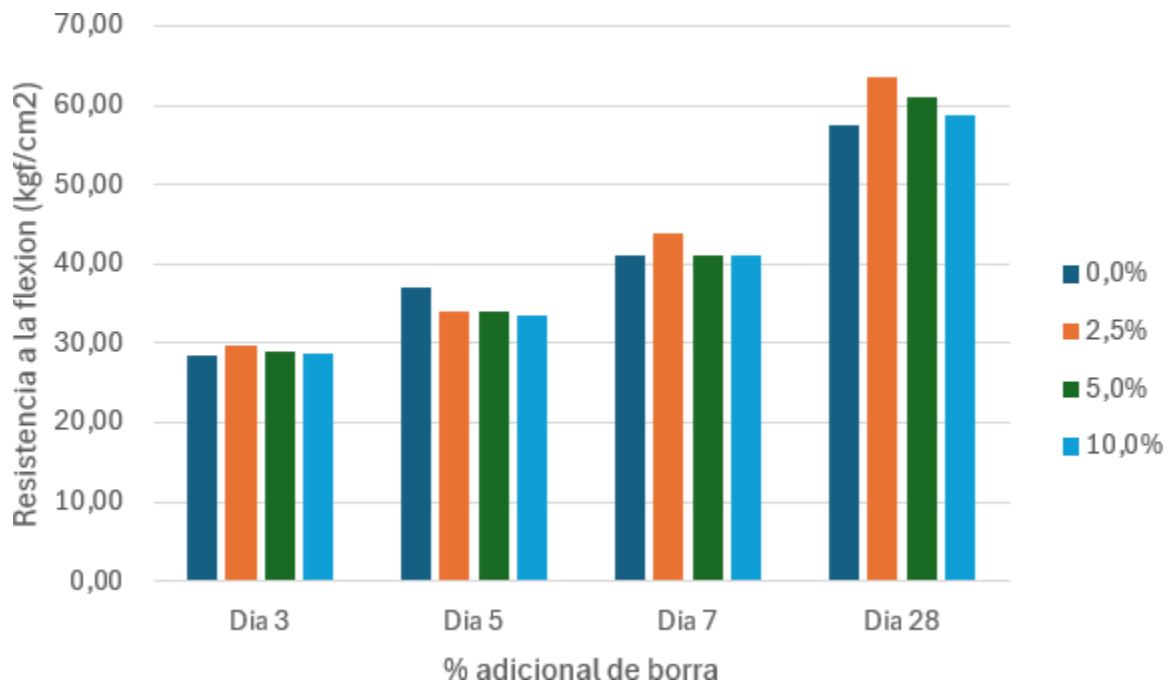


Figura 15: resultados de ensayo de resistencia a flexión a diversos tiempos de curado.

De la figura 15 se observa que la adición de 2.5% de borra de salmuera, con una humedad del 22%, exhibe un incremento en la resistencia a la flexión a las edades de 3, 7 y 28 días en comparación con la mezcla patrón. Específicamente, a los 3 días se observa un aumento de

4%, a los 7 días un aumento de 7% y a los 28 días la resistencia a la flexión de las probetas de mortero aumentó en un 10,5% en comparación con los valores de la mezcla patrón.

En contraste, las mezclas con adiciones de 5% y 10% muestran un comportamiento diferenciado. A los 3 días, si bien se aprecia un ligero aumento en la resistencia a la flexión (2% y 1%) en comparación con la mezcla patrón, este incremento es menor al observado con la adición de 2.5%. A los 5 días, se registra una disminución considerable en la resistencia a la flexión para ambas dosificaciones (5% y 10%) en comparación con la mezcla patrón, con reducciones de 8% y 10%. A los 7 días, las resistencias a la flexión de las mezclas con 5% y 10% de borra se aproximan a los valores de la mezcla patrón, pero aún se encuentran por debajo de los valores obtenidos por la adición de 2,5% de borra de salmuera. Luego de finalizado los 28 días de curado las dosificaciones de 5% y 10% vuelven a presentar valores por sobre los obtenidos para la mezcla patrón. La resistencia a la flexibilidad aumentó en un 6,1% y 2,2% para las dosificaciones del 5% y 10% respectivamente en comparación con la mezcla de mortero patrón.

Es importante destacar que, si bien en el presente estudio se realiza una adición de borra de salmuera, otros investigadores han explorado la sustitución de cemento por este material. En este contexto, Hussain A. (2024) encontró que la sustitución de cemento por borras de salmuera presentó un aumento en la resistencia a la flexión hasta un 9% de sustitución. Aunque se trata de un enfoque diferente, este hallazgo sugiere que la presencia de borra de salmuera puede tener un efecto positivo en el desarrollo de la resistencia a la flexión del mortero, incluso en diferentes metodologías de incorporación. Esta observación refuerza la plausibilidad de los resultados obtenidos en este estudio, especialmente el incremento observado con la adición de 2.5%, sugiriendo que la borra, en cierta proporción, podría estar actuando favorablemente en la microestructura del mortero.

En base a los resultados obtenidos, se puede concluir que la adición óptima de borra de salmuera para mejorar la resistencia a la flexión del mortero, considerando las edades de ensayo evaluadas, es del 2.5%. Dosificaciones mayores aumentan la resistencia frente a la flexión a los 28 días, pero no a los mismos niveles que la dosificación del 2,5% en las edades tempranas. Por lo tanto, si el objetivo es maximizar la resistencia a la flexión, la recomendación sería utilizar la dosificación del 2,5% por sobre otras. Por otro lado, si el objetivo es utilizar el máximo posible de borra de salmuera en la dosificación del mortero evitando efectos adversos significativos en la resistencia a la flexión de las probetas, se podría considerar una adición del 5% o 10%, especialmente a edades más avanzadas.

5.3.3. Ensayos de resistencia a la compresión

A continuación, se reportan los resultados correspondientes a los ensayos de resistencia a la compresión, realizados después de los ensayos de resistencia a la flexión. El objetivo de este ensayo fue evaluar la influencia de la adición de borra de salmuera en el comportamiento mecánico de la probeta de mortero y comparar los resultados con la mezcla patrón. Como se describió en la sección de metodología, se utilizaron las probetas utilizadas previamente en el estudio de flexión de acuerdo con la norma ASTM C349.

La Figura 16 presenta los resultados de los ensayos de resistencia a la compresión realizados en probetas de mortero con adiciones de borra de salmuera al 0% (patrón), 2.5%, 5% y 10%, a edades de 3, 5, 7 y 28 días. Por otro lado, la figura 17 muestra la variación de la resistencia a la compresión en comparación con la mezcla patrón tras los 28 días de curado.

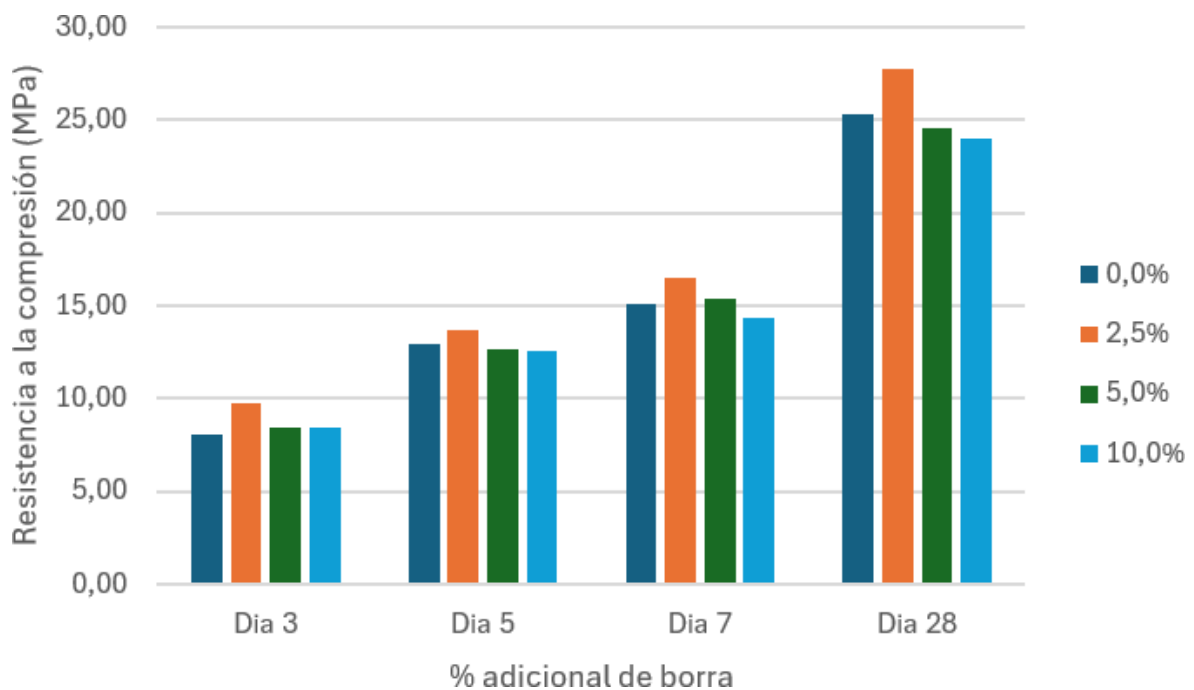


Figura 16: progresión de la resistencia a la compresión a diversos días de curado

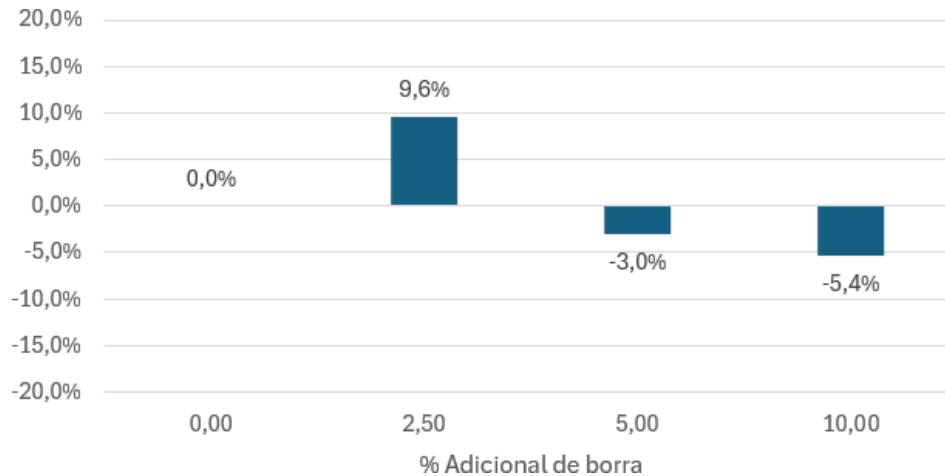


Figura 17: Variación de la resistencia a la compresión en comparación a la mezcla patrón

La Figura 16 muestra la evolución de la resistencia a la compresión del mortero en función del porcentaje de adición de borra de salmuera y la edad de curado. Se observa que la mezcla patrón (0% de borra) alcanza resistencias de 8.04 MPa a los 3 días, 12.96 MPa a los 5 días, 15.12 MPa a los 7 días y finalmente una resistencia de 25,35 MPa a la edad final de 28 días de curado.

La adición de 2.5% de borra de salmuera exhibe un comportamiento superior en todas las edades evaluadas. A los 3 días, se registra un incremento del 21.52% en la resistencia a la compresión, alcanzando un valor de 9.77 MPa. A los 5 y 7 días, se observan incrementos del 5.63% y 8.80%, respectivamente, con valores de 13.69 MPa y 16.45 MPa. Finalmente, a la edad de curado de mayor interés que es la de 28 días la adición de 2,5% presenta una resistencia promedio de 27,79 MPa, lo que indica un aumento significativo del 9,6% por sobre la mezcla patrón, como se observa en la figura 17.

Las mezclas con adiciones de 5% y 10% presentan un comportamiento diferenciado. A los 3 días, muestran un ligero incremento en la resistencia a la compresión en comparación con la mezcla patrón, con aumentos del 4.73% y 4.60%, respectivamente. Sin embargo, a los 5 días, se registran ligeras disminuciones del 2.39% y 3.40%. A los 7 días, la mezcla con 5% de borra muestra un ligero incremento del 1.59%, mientras que la mezcla con 10% presenta una disminución del 5.03%. Sin embargo, ambas dosificaciones presentan una disminución en su resistencia a los 28 días, los valores de las resistencias fueron de 24,60 y 23,99 para las adiciones de 5% y 10% respectivamente. Estos valores indican una disminución de un 3% y 5,4% de la resistencia a la compresión frente a la mezcla patrón como se observa en la figura 17.

La disminución en la resistencia a la compresión observada con adiciones del 5% y 10% de borra de salmuera puede atribuirse a varios factores. En primer lugar, el incremento en la cantidad de borra podría estar introduciendo más agua a la mezcla, alterando la relación agua/cemento y, por ende, afectando las propiedades mecánicas del mortero (Guevara et al., 2012). Además, la mayor cantidad de borra también podría incorporar una mayor cantidad de compuestos como hidróxido de magnesio, cloruro de sodio u otros elementos que no contribuyen favorablemente a la mezcla.

Específicamente, en el caso de la adición del 5%, una de las probetas mostró una resistencia a la compresión considerablemente menor en comparación con las demás. Esto podría deberse a un error en el proceso de curado. Si se excluye este dato atípico, la disminución en la resistencia a la compresión con el 5% de adición sería solo del 1.5%.

El incremento en la resistencia a la compresión observado con la adición de 2.5% de borra, tanto a edades tempranas como a los 28 días, podría atribuirse a un mejor empaquetamiento de las partículas. Las partículas finas de la borra de salmuera ocupan eficientemente los espacios vacíos entre las partículas de cemento, reduciendo la porosidad de la mezcla mejorando así ambas resistencias como se comprobó también anteriormente en los resultados de flexión. John et al. (2018) corroboran que un empaquetamiento más denso, incluso con pequeñas adiciones, incrementa las resistencias.

En resumen, la adición de borra de salmuera influye de manera diferenciada en el desarrollo de la resistencia a la compresión del mortero. La adición del 2.5% demostró ser la más efectiva, presentando incrementos significativos y consistentes en todas las edades evaluadas, lo que sugiere una optimización del empaquetamiento de partículas y, posiblemente, otros mecanismos como la mejora de la hidratación del cemento (John et al., 2018). Por otro lado, las adiciones del 5% y 10%, si bien muestran un ligero beneficio inicial a los 3 días, no presentan mejoras sustanciales a edades tempranas, e incluso muestran ligeras disminuciones a los 28 días, lo que podría indicar un efecto adverso de una mayor concentración de borra en la microestructura del mortero.

Considerando las dosificaciones evaluadas en este ensayo, la adición óptima de borra de salmuera para mejorar la resistencia a la compresión del mortero es nuevamente la del 2.5%, la misma dosificación que presentó los mejores resultados en los ensayos de trabajabilidad y de resistencia a la flexión. Por otro lado, podría considerarse el utilizar la dosificación con 5% adicional de borra de salmuera si se desea maximizar la cantidad de borra de salmuera utilizada ya que la disminución de la resistencia a la compresión no es mayor, la trabajabilidad de esta mezcla de mortero no se ve

afectada significativamente y la resistencia frente a la flexión del mortero se ve beneficiada. La dosificación del 10% por el contrario muestra disminuciones claras en su densidad y la compresión mientras que no presenta grandes aumentos en la resistencia frente a la flexión.

5.4. Consideraciones adicionales

Se debe considerar que las borras obtenidas inicialmente de los filtros presentan un contenido de humedad promedio de 38%, lo cual las hace poco adecuadas para su uso directo en mezclas de mortero. Por lo tanto, reducir la humedad de las borras es un paso crucial antes de su aplicación en mezclas de mortero como se realizó en esta investigación.

Un posible enfoque sería la adquisición de un filtro de prensa más eficiente, capaz de reducir la humedad de las borras a niveles cercanos al 22%. Sin embargo, esta solución implica una inversión inicial significativa además de costos anuales de mantenimiento del equipo, costos que podrían no ser justificados por los ingresos generados mediante la comercialización de las borras de salmuera. Para este caso se necesitaría un filtro de prensa con capacidad para operar con flujos de 5 a 12 m³/h.

Como alternativa más económica, se podrían considerar métodos de secado natural, como el uso de invernaderos o sistemas de secado solar. Durante el desarrollo de esta investigación, se logró reducir la humedad de las borras desde un 38% a un 22% mediante su exposición al sol durante 24 horas, al extenderlas en capas delgadas. Tecnologías como Solia Mix de Volia Water Technologies, que utilizan invernaderos para el secado solar, podrían ser viables para optimizar este proceso a escala industrial. Estas soluciones no solo son más económicas en términos de inversión inicial, sino también en costos operativos a largo plazo.

A niveles de humedad cercanos al 22%, las borras podrían utilizarse para producir aproximadamente del orden de 14 mil m³ de mortero anuales para una adición del 2,5% o del orden de 7 mil m³ para la adición del 5% de borras de salmuera en mezclas de mortero. Esta reutilización significaría un ahorro considerable ya que actualmente significa un gasto de 244 UF (1 UF por tonelada de borra) y de 9,15 UF por vuelta de camión. En la región del Biobío, empresas como Cementos Biobío o proveedores de mezclas premezcladas podrían ser socios potenciales para explorar la viabilidad comercial de este residuo.

Finalmente, es importante destacar que cualquier implementación de estas estrategias debe estar respaldada por un análisis económico y ambiental, considerando tanto los costos asociados como los beneficios potenciales en términos de reducción de residuos y aprovechamiento de recursos.

6. Conclusión

Las conclusiones de este estudio reflejan el cumplimiento de los objetivos establecidos, aportando hallazgos significativos sobre la revalorización de la borra de salmuera generada por una planta cloro-soda. La caracterización química del residuo, que revela una composición predominante de carbonato de calcio (31%) y sílice (10%), junto con sus propiedades fisicoquímicas, demuestra su potencial como aditivo en mezclas de mortero. Estos compuestos contribuyen a mejorar la trabajabilidad, estabilidad y resistencia del material, promoviendo su viabilidad técnica en aplicaciones constructivas.

La evaluación experimental determinó que la adición óptima de borra de salmuera es del 2,5% en peso respecto al cemento, lo que resulta en una mejora significativa en las propiedades mecánicas del mortero, sin comprometer su microestructura. Aunque una mayor dosificación del 5% permitiría una mayor reutilización del residuo, esta podría implicar ligeras reducciones en la resistencia a la compresión, lo que sugiere que la selección de la dosificación adecuada deberá considerar las especificaciones técnicas del proyecto y las condiciones operativas.

A nivel industrial, se estima que la incorporación de un 2,5% de borra de salmuera podría posibilitar la producción de hasta 14.000 m³ de mortero al año, mientras que una adición del 5% generaría alrededor de 7.000 m³, en función de la tasa de generación de borra de la planta cloro-soda. Esta reutilización de las borras significaría un ahorro de por lo menos 244 UF anuales de lograr reutilizar el 100% de las borras producidas, esto sin considerar las posibles ganancias de vender el residuo a un precio apropiado y atractivo para los compradores. Además, esta estrategia contribuye a la economía circular al minimizar la disposición de residuos en vertederos y fomentar un uso sostenible de los recursos.

Se recomienda realizar estudios adicionales que evalúen la incorporación de porcentajes inferiores al 2,5%, como el 1% o 2%, para determinar su impacto en la optimización de las propiedades mecánicas del mortero. Asimismo, se sugiere explorar aplicaciones alternativas de la borra de salmuera, tales como su uso en hormigones estructurales o como sustituto parcial del cemento, ampliando así las posibilidades de revalorización del residuo y potenciando su impacto positivo tanto en el ámbito económico como ambiental.

7. Referencias

1. Garg, M., & Pundir, A. (2014). Utilization of brine sludge in nonstructural building components: A sustainable approach. *Journal of Environmental Science and Technology*, 7(8), 660–665. <https://doi.org/10.1155/2014/389316>
2. Izidoro, J. de C., Fungaro, D. A., Brandão, P. R. G., & Teixeira, L. A. C. (2021). Brine sludge waste from a chlor-alkali industry: Characterization and its application for non-structural and structural construction materials. *Journal of Applied Materials and Technology*, 3(1), 1–7. <https://doi.org/10.31258/jamt.3.1.1-7>
3. Verma, S., Amritphale, S., & Khan, M. A. (2018). Utilization of brine sludge and fly ash waste as complementary resources, for making non-toxic, geopolymeric (cement-free) materials. *Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Civil Engineering*, 43(1–3), 1–7. <https://doi.org/10.1007/s40996-018-0191-3>
4. Shukla, P. M., Patel, J. A., Joshi, D. S., & Joshi, P. P. (2015). Recovery of Barium Sulphate From Brine Sludge. *Indian Journal of Environmental Protection*, 35(4), 312–315. Recuperado de [https://www.researchgate.net/publication/280444351 Recovery of Barium Sulphate From Brine Sludge](https://www.researchgate.net/publication/280444351_Recovery_of_Barium_Sulphate_From_Brine_Sludge)
5. Verma, S., Amritphale, S. S., & Das, S. (2017). Development of Functionalized Nanoprecursor Gel Useful for Making Flexible and Moldable Radiation Shielding Material. *JMEPEG - Journal of Materials Engineering and Performance*, 26(3), 1018–1025. <https://doi.org/10.1007/s11665-017-2532-y>
6. Central Pollution Control Board. (2021). *Standard operating procedure and checklist of minimal requisite facilities for utilization of hazardous waste under Rule 9 of the Hazardous and Other Wastes (Management and Transboundary Movement) Rules, 2016: Utilization of brine sludge (generated from caustic soda unit) for manufacturing of bricks*. Ministry of Environment, Forest & Climate Change, Government of India. https://cpcb.nic.in/uploads/hwmd/61_SOP.pdf
7. Verma, S., Suresh, S., Mili, M., Diwedi, P., Bajpai, H., Khan, M. A., Hashmi, S. A. R., Rathore, S. K. S., & Srivastava, A. K. (2023). Future process options for brine sludge management from the chlor-alkali industry. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20, 9291–9310. <https://doi.org/10.1007/s13762-022-04433-z>

8. Instituto Nacional de Normalización (INN). (1977). *NCh 165 Of. 77: Áridos para morteros y hormigones — Requisitos generales*. Recuperado de <https://www.cesmec.cl/medios/GerenciaCalidad/DIC/normas/NCh165Of77.pdf>
9. Instituto Nacional de Normalización (INN). (2009). *NCh 1239 Of. 81: Áridos para morteros y hormigones - Determinación de las densidades real y neta y de la absorción de agua de las arenas*. Recuperado de https://www.cesmec.cl/medios/DIC/normas/NCh_1239_2009_Ards_Horm_Mort_Dens_R_N_abs_agua.pdf
10. Instituto Nacional de Normalización (INN). (1996). *NCh 2257/1 Of. 96: Morteros - Determinación de la consistencia - Parte 1: Método del extendido en la mesa de sacudidas*. Recuperado de https://www.cesmec.cl/medios/DIC/normas/NCh2275_1Of96.pdf
11. Instituto Nacional de Normalización (INN). (1996). *NCh 2260 Of. 96: Morteros - Preparación de mezclas de prueba y mezclas comparativas en el laboratorio*. Recuperado de <https://www.cesmec.cl/medios/GerenciaCalidad/DIC/normas/NCh2260Of96.pdf>
12. ASTM International. (2018). *ASTM C78 / C78M - 18: Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)*. Recuperado de <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/99398/0f04af1109c649d8a698be80e895b525/ASTM-C78-C78M-18.pdf>
13. ASTM International. (2018). *ASTM C349 / C349M - 18: Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic-Cement Mortars (Using Portions of Prisms Broken in Flexure)*. Recuperado de <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/101872/151317efbe024f55910c3a83423da0eb/ASTM-C349-18.pdf>
14. John, V. M., Damineli, B. L., Quattrone, M., & Pileggi, R. G. (2018). Fillers in cementitious materials — Experience, recent advances and future potential. *Cement and Concrete Research*, 114, 65–78. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.08.019>
15. Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN). (2023). *Ficha Técnica Compilada Salar Grande*. Recuperado el 20 de noviembre, desde https://portalgeo.sernageomin.cl/Salares/SALAR_GRANDE_1/FICHA_TECNICA_COMPI_LADA_SALAR_GRANDE_1.pdf?utm_source=chatgpt.com
16. Hussain, Aslam. (2024). Performance comparison of cement replacing materials in concrete: Brine sludge. *Journal of the Maharaja Sayajirao University of Baroda*. Recuperado de

<https://www.researchgate.net/publication/382911640> Performance comparison of cement replacing materials in concrete Brine sludge

17. Lundgren, M. (2004). Limestone Filler as Addition in Cement Mortars: Influence on the Early-Age Strength Development at Low Temperature. *Nordic Concrete Research*, 30(1), 7-21.
Recuperado de <https://www.researchgate.net/publication/228512666> Limestone Filler as Addition in Cement Mortars Influence on the Early-Age Strength Development at Low Temperature
18. Krstulović, P., Kamenić, N., & Popović, K. (1994). A new approach in evaluation of filler effect in cement. I. Effect on strength and workability of mortar and concrete. *Cement and Concrete Research*, 24(4), 721–727. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(94\)90197-X](https://doi.org/10.1016/0008-8846(94)90197-X)
19. Lothenbach, B., Scrivener, K., & Hooton, R. D. (2011). Supplementary cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, 41, 1244–1256. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.12.001>
20. Lin, H., Pan, B., Li, Y., Luo, X., & Dong, D. (2024). The effect of Mg(OH)₂ on hydrated magnesium silicate cement under different curing conditions. *Construction and Building Materials*, 445, 137799. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137799>
21. Zhang, T., Vandeperre, L. J., C Cheeseman, C. R. (2014). Formation of magnesium silicate hydrate (M-S-H) cement pastes using sodium hexametaphosphate. *Cement and Concrete Research*, c5, 8-14. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.07.001>
22. Ali, M., Abdullah, M. S., C Saad, S. A. (2015). Effect of Calcium Carbonate Replacement on Workability and Mechanical Strength of Portland Cement Concrete. *Advanced Materials Research*, 1115, 137-141. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1115.137>
23. Myrdal, R. (2007). *Accelerating admixtures for concrete: State of the art*. SINTEF Building and Infrastructure, COIN – Concrete Innovation Centre. ISBN: 978-82-536-0989-8.
Recuperado de <https://sintef.brage.unit.no/sintef-xmlui/handle/11250/2424150>
24. Pachta, V., Tsardaka, E.-C., & Stefanidou, M. (2021). The role of flame retardants in cement mortars exposed at elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 273, 122029. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122029>

25. Asociación Nacional de la Industria del Reciclaje (ANIR). (2023). Alerta sanitaria en vertederos: La separación de residuos en origen es urgente. Recuperado el 28 de Septiembre 2024, de <https://anir.cl/alerta-sanitaria-en-vertederos-la-separacion-de-residuos-en-origen-es-urgente-2/>.
26. Ministerio del Medio Ambiente (MMA). (2021). Sexto reporte del estado del medio ambiente en Chile. Recuperado el 15 de octubre 2024. Recuperado de <https://sinia.mma.gob.cl>.
27. Pingle, V., & Saraswat, S. (2018). Experimental study of use of brine sludge in cement concrete. *International Journal of Scientific Research and Development*, 6(9), 30–33. Recuperado de <https://www.ijserd.com/Article.php?manuscript=IJSRDV6I90107>
28. Khan, M. A., Yadav, V. K., Singh, S., Yadav, A. S., & Sharan, U. (2019). Utilization of Brine Sludge in Manufacturing of Bricks Manufacturing of Fly Ash Bricks. *IJRTI*, 4(11). Recuperado de <https://ijrti.org/viewpaperforall.php?paper=IJRTI1911008>
29. Chen, S.-J., Chen, C.-S., Jhan, J.-Y., & Chen, R.-F. (2019). Utilization of Brine Sludge in Controlled Low Strength Materials (CLSM). *Key Engineering Materials*, 801, 436–441. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.801.436>
30. Guevara, G., Hidalgo, C., Pizarro, M., Rodríguez, I., Rojas, L., & Segura, G. (2012). Efecto de la variación agua/cemento en el concreto. *Tecnología en Marcha*, 25(2), 80–86. <https://doi.org/10.18845/tm.v25i2.1632>

8. Anexos

Anexos A.

Caracterización de las borras de salmuera.

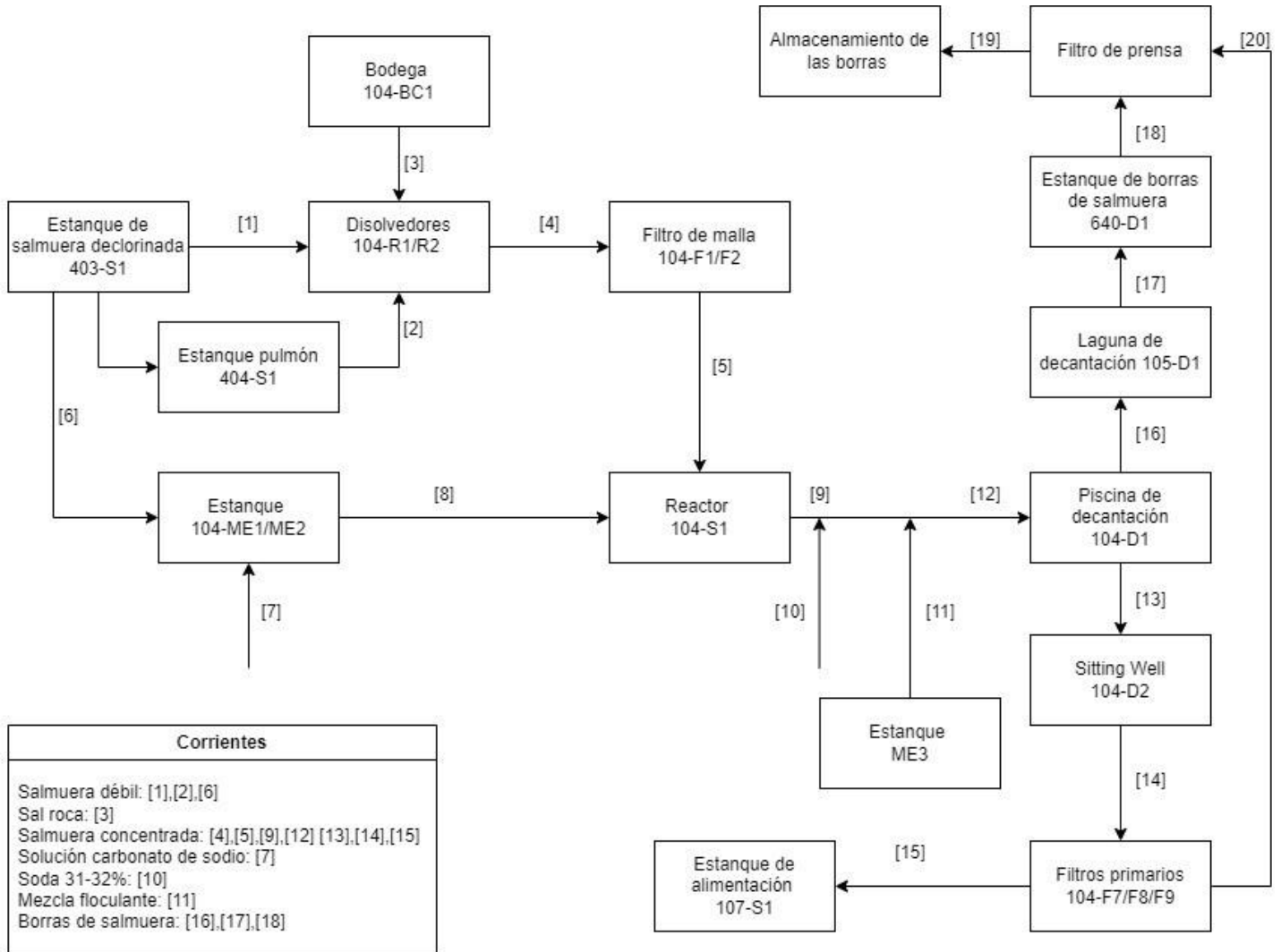


Figura 18: Diagrama del procedimiento de tratamiento primario

Registros de pH y humedad de las borras de salmuera.

Fecha	pH	% Humedad
17-02-2022	9,4	37
01-06-2022	8,91	53,89
23-08-2022	9,8	41,4

15-12-2022	9,9	33,53
08-06-2023	9,2	45,3
30-06-2023	9	38,7
04-10-2023	9,1	37
21-12-2023	9,4	40,4
14-03-2024	9,3	35,3
19-06-2024	8,8	38,3

Tabla 7: Registro de pH y %Humedad de las borras de salmuera

Para obtener el promedio del pH y del porcentaje de humedad primero revisamos que no haya valores atípicos entre los datos, para esto definimos los cuartiles Q1 y Q3 de los datos de humedad y de pH.

$$Q1_{pH} = 9,025 ; Q3_{pH} = 9,4$$

$Q1_{\%H} = 37 ; Q3_{\%H} = 41,15$ Con esto obtenemos el rango Inter cuartil para ambos.

$$pH: IQR = Q3_{pH} - Q1_{pH} = 0,375$$

$$\%Humedad: IQR = Q3_{\%H} - Q1_{\%H} = 4,15$$

limites inferiores y superiores para el pH.

$$Limite Inferior = Q1_{pH} - 1,5 \cdot IQR = 8,4625$$

$$Limite Superior = Q3_{pH} + 1,5 \cdot IQR = 9,9625$$

Por lo tanto, no hay ningún valor atípico en los datos del pH. Realizando lo mismo para la humedad en las borras.

$$Limite Inferior = Q1_{\%H} - 1,5 \cdot IQR = 30,775$$

$$Limite Superior = Q3_{\%H} + 1,5 \cdot IQR = 47,375$$

Por lo tanto, se identifica que el valor de 53,89% de humedad en las borras es un valor atípico y se descarta al momento de calcular el promedio y la desviación estándar de los datos.

Cantidad de sal necesitada para concentrar la salmuera.

NaCl presente en la salmuera débil:

$$\frac{m^3}{g} \quad \frac{1000L}{1kg} \quad kg \ NaCl$$

$$72,5 \frac{h}{L} \cdot 170 \frac{L}{1m^3} \cdot \frac{1000g}{1000g} = 12.325 \frac{h}{L}$$

NaCl presente a la salida en salmuera concentrada:

$$80 \frac{m^3}{h} \cdot 300 \frac{g}{L} \cdot \frac{1000L}{1m^3} \cdot \frac{1kg}{1000g} = 24.036 \frac{kg NaCl}{h}$$

Por lo tanto, se requiere que ingrese la siguiente cantidad de NaCl en la sal de roca:

$$24.036 - 12.325 = 11.711 \frac{kg NaCl}{h}$$

A una pureza del 99,1% se requieren la siguiente cantidad de sal:

$$\frac{11.711}{0,991} kg = 11.818 \frac{kg}{h} \text{ de sal}$$

Lo que ingresaría las siguientes impurezas al tratamiento primario.

Impureza	Cantidad (kg/h)
Calcio	5,79
Magnesio	1,42
Silicio	2,36
Hierro	0,59
Aluminio	0,28
Cromo	0,006
Vanadio	0,0012
Manganeso	0,013
Estroncio	0,06
Bario	0,012
Yodo	0,045
insolubles	17,7

Tabla 8: Impurezas que ingresan al tratamiento primario

Dado los límites máximos permitidos para que la salmuera concentrada avance al tratamiento secundario, 2 ppm para el calcio, 0,1 ppm para el magnesio y el hierro y 6 ppm para la sílice, se identifican las siguientes cantidades de compuestos removidos por el tratamiento primario de la siguiente manera.

$$m_{rA} = m_{iA} - C_{fA} \cdot m_S$$

Donde m_{rA} es la masa removida del compuesto A, m_{iA} su masa inicial en la salmuera concentrada, C_{fA} su concentración final al salir del tratamiento primario y m_s la masa de la salmuera.

Para realizar estos cálculos se necesita conocer la masa de la salmuera concentrada de $80 \text{ m}^3/\text{h}$, dado que los manuales de operación del tratamiento primario indican que la salmuera concentrada debe tener una densidad de $1170 \text{ kg}/\text{m}^3$ es posible determinar la masa de esta para luego determinar las cantidades de calcio, magnesio, hierro y sílice que abandonan el sistema.

$$m_{salmuera} = 1170 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 80 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} = 93743 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

Por lo tanto, la masa removida por el tratamiento primario se presenta en la siguiente tabla.

Compuesto	Masa final (kg)	Masa removida (kg)
Calcio	0,187	5,603
Magnesio	0,009	1,409
Hierro	0,009	0,582
Silicio	0,263	2,100

Tabla 9: Masa removida por el tratamiento primario

Dado que las reacciones por las cuales se eliminan estos compuestos tienen relación estequiométrica 1:1 entre el elemento que se desea eliminar y los compuestos finales que se desean eliminar es necesario calcular los moles de cada elemento para determinar la cantidad eliminada del compuesto final.

Elemento	Masa molar	Moles	Compuesto	Masa molar	Masa final
	g/mol	mol		g/mol	kg
Calcio	40,078	139,8112	CaCO_3	100,0869	13,993
Magnesio	24,305	57,963	$\text{Mg}(\text{OH})_2$	58,33	3,381
Hierro	55,845	10,413	$\text{Fe}(\text{OH})_3$	106,85	1,112
Silicio	28,085	74,796	SiO_2	60,08	4,495

Tabla 10: Masa final de los componentes principales de la borra de salmuera

Anexo B

Propiedades de la arena gruesa:

Los datos experimentales obtenidos de acuerdo al procedimiento solicitado por la normativa se presentan en la siguiente tabla.

Parámetro	Peso (gr)
Matraz + agua (Ma)	655,7
Masa S.S.S (msss)	403,3
Matraz + agua + muestra (Mm)	911,3

Masa seca (ms)	394,6
----------------	-------

Tabla 11: Valores experimentales de las propiedades de la arena gruesa

Densidad real del árido saturado superficialmente seco (ρ_{RSSS}):

$$\rho_{RSSS} = \frac{m_{SSS}}{M_a + m_{SSS} - M_m} \cdot 1000 \frac{kg}{m^3} = 2731 \frac{kg}{m^3}$$

Densidad real del árido seco (ρ_{Rs}):

$$\rho_{Rs} = \frac{m_s}{M_a + m_{SSS} - M_m} \cdot 1000 \frac{kg}{m^3} = 2672 \frac{kg}{m^3}$$

Densidad neta (ρ_N):

$$\rho_N = \frac{m_s}{M_a + m_s - M_m} \cdot 1000 \frac{kg}{m^3} = 2839 \frac{kg}{m^3}$$

Absorción de agua (α):

$$\alpha = \frac{m_{SSS} - m_s}{m_s} \cdot 100\% = 2,20\%$$

Anexo C

Resultados densidad a los 3 días

Dosificación	Masa 1 (gr)	Masa 2 (gr)	Volumen (m ³)	Densidad (kg/m ³)
0	556,80	561,20	0,000256	2183,59
2,5%	569,30	572,90	0,000256	2230,86
5%	567,30	568,70	0,000256	2218,75
10%	556,90	557,20	0,000256	2175,98

Tabla 12: Resultados experimentales de densidad a los 3 días

Resultados densidad a los 5 días

Dosificación	Masa 1 (gr)	Masa 2 (gr)	Volumen (m ³)	Densidad (kg/m ³)
0	578,30	567,30	0,000256	2237,50
2,5%	567,30	571,10	0,000256	2223,44
5%	573,60	567,90	0,000256	2229,49
10%	565,20	560,10	0,000256	2197,85

Tabla 13: Resultados experimentales de densidad a los 5 días

Resultados densidad a los 7 días

Dosificación	Masa 1 (gr)	Masa 2 (gr)	Volumen (m ³)	Densidad (kg/m ³)
0	577,70	578,70	0,000256	2258,59
2,5%	572,60	570,40	0,000256	2232,42
5%	574,40	570,00	0,000256	2235,16
10%	561,50	556,40	0,000256	2183,40

Tabla 14: Resultados experimentales de densidad a los 7 días

Resultados densidad a los 28 días

Dosificación	Masa 1 (gr)	Masa 2 (gr)	Masa 3 (gr)	Volumen (m ³)	Densidad (kg/m ³)
0	580,30	583,20	575,00	0,000256	2263,67
2,5%	571,20	568,50	580,90	0,000256	2240,36
5%	573,20	571,30	569,50	0,000256	2231,77
10%	562,20	561,50	562,50	0,000256	2195,57

Tabla 15: Resultados experimentales de densidad a los 28 días

Resultados de flexión a los 3 días

Dosificación	Lectura 1	Lectura 2	Promedio	P (kgf)	O (kgf/cm ²)
0	25,00	25,50	25,25	101,100	28,434
2,5%	27,00	26,00	26,50	105,350	29,630
5%	26,50	25,00	25,75	102,800	28,913
10%	26,00	25,00	25,50	101,950	28,673

Tabla 16: Resultados experimentales de flexión a los 3 días

Resultados de flexión a los 5 días

Dosificación	Lectura 1	Lectura 2	Promedio	P (kgf)	O (kgf/cm ²)
0	34,50	34,00	34,25	131,700	37,041
2,5%	31,00	31,00	31,00	120,650	33,933
5%	30,00	32,00	31,00	120,650	33,933
10%	29,00	32,00	30,50	118,950	33,455

Tabla 17: Resultados experimentales de flexión a los 5 días

Resultados de flexión a los 7 días

Dosificación	Lectura 1	Lectura 2	Promedio	P (kgf)	O (kgf/cm ²)
0	35,00	42,00	38,50	146,150	41,105
2,5%	45,00	38,00	41,50	156,350	43,973
5%	41,00	36,00	38,50	146,150	41,105
10%	37,00	40,00	38,50	146,150	41,105

Tabla 18: Resultados experimentales de flexión a los 7 días

Resultados de flexión a los 28 días

Dosificación	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3	Promedio	P (kgf)	O(kgf/cm ²)
0	57,00	56,00	54,00	55,67	204,517	57,520
2,5%	63,00	60,00	63,00	62,00	226,050	63,577
5%	61,00	59,00	58,00	59,33	216,983	61,027
10%	58,00	58,00	55,00	57,00	209,050	58,795

Tabla 19: Resultados experimentales de flexión a los 28 días

Resultados de Compresión a los 3 días

Dosificación		Área	Carga	Tensión
		mm ²	kN	MPa
0%	Muestra 1	1600	12,95	8,16
		1600	13,19	8,24
	Muestra 2	1600	12,40	7,75
		1600	12,81	8,01

2,5%	Muestra 1	1600	15,67	9,79
		1600	15,42	9,64
	Muestra 2	1600	16,07	10,05
		1600	15,36	9,60
5%	Muestra 1	1600	13,04	8,15
		1600	13,29	8,31
	Muestra 2	1600	13,63	8,52
		1600	13,90	8,70
10%	Muestra 1	1600	13,73	8,58
		1600	13,52	8,45
	Muestra 2	1600	13,19	8,24
		1600	13,36	8,35

Tabla 20: Resultados experimentales de compresión a los 3 días

Resultados de Compresión a los 5 días

Dosificación		Área	Carga	Tensión
		mm ²	kN	MPa
0%	Muestra 1	1600	20,53	12,83
		1600	20,79	12,99
	Muestra 2	1600	21,01	13,13

		1600	20,59	12,87
2,5%	Muestra 1	1600	22,48	14,05
		1600	21,00	13,13
	Muestra 2	1600	21,22	13,26
		1600	22,91	14,32
5%	Muestra 1	1600	20,60	12,88
		1600	20,40	12,75
	Muestra 2	1600	19,65	12,28
		1600	20,30	12,69
10%	Muestra 1	1600	20,90	13,06
		1600	19,72	12,33
	Muestra 2	1600	20,25	12,66
		1600	19,23	12,02

Tabla 21: Resultados experimentales de compresión a los 5 días

Resultados de Compresión a los 7 días

Dosificación		Área	Carga	Tensión
		mm ²	kN	MPa
0%	Muestra 1	1600	24,58	15,36
		1600	22,53	14,08

	Muestra 2	1600	24,83	15,52
		1600	24,80	15,50
2,5%	Muestra 1	1600	26,02	16,26
		1600	22,93	14,33
	Muestra 2	1600	28,05	17,53
		1600	28,29	17,68
5%	Muestra 1	1600	24,22	15,14
		1600	24,51	15,32
	Muestra 2	1600	24,27	15,17
		1600	25,31	15,82
10%	Muestra 1	1600	22,69	14,18
		1600	22,42	14,01
	Muestra 2	1600	23,10	14,44
		1600	23,68	14,80

Tabla 22: Resultados experimentales de compresión a los 7 días

Resultados de Compresión a los 28 días

Dosificación		Área	Carga	Tensión
		mm ²	kN	MPa
0%	Muestra 1	1600	41,52	25,95

		1600	40,27	25,17
	Muestra 2	1600	41,04	25,65
		1600	39,15	24,47
	Muestra 3	1600	39,01	24,38
		1600	42,38	26,49
2,5%	Muestra 1	1600	45,28	28,30
		1600	45,36	28,35
	Muestra 2	1600	41,90	26,19
		1600	43,44	27,15
	Muestra 3	1600	45,55	28,47
		1600	45,23	28,27
5%	Muestra 1	1600	38,42	24,01
		1600	41,26	25,79
	Muestra 2	1600	40,88	25,55
		1600	40,37	25,23
	Muestra 3	1600	36,42	22,76
		1600	38,77	24,23
10%	Muestra 1	1600	38,22	23,89
		1600	38,08	23,80
	Muestra 2	1600	35,62	22,26
		1600	37,54	23,46
	Muestra 3	1600	39,94	24,96
		1600	40,91	25,57

Tabla 23: Resultados experimentales de compresión a los 28 días