UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA

EVALUACIÓN DE MORTEROS CON REEMPLAZO DE CEMENTO Y ÁRIDOS UTILIZANDO RELAVES ACTIVADOS MECÁNICAMENTE: PROCESO DE MOLIENDA

Por

María Fernanda Valdés Casanova

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

Profesor Guía

Roberto Gómez Espina

Miembros de la Comisión

René Gómez Puigpinos

María Vanessa Gutiérrez

Junio 2025

Concepción (Chile)

© 2025 María Fernanda Valdés Casanova

Agradecimientos

Agradezco haber llegado a esta etapa de mi vida, principalmente a mis padres, por brindarme la oportunidad de ser libre y feliz al momento de tomar mis decisiones, especialmente aquella que marcó mi camino profesional: estudiar la carrera que realmente deseaba.

También agradezco a mis amigos de toda la vida, de mi querido pueblo, y a quienes conocí durante este trayecto universitario, personas maravillosas que siempre recordaré con cariño por haber compartido momentos significativos durante estos años.

Agradezco al Proyecto FONDEF ID23I10183 por el apoyo brindado durante todos estos meses, así como por las enseñanzas, la confianza depositada en mí y la oportunidad de participar activamente en una investigación de gran relevancia.

Agradezco a la Universidad de Concepción por permitirme formarme como profesional, especialmente al Departamento de Ingeniería Metalúrgica y de Minas, por facilitar el acceso a sus instalaciones y equipos, fundamentales para el desarrollo de este trabajo.

Resumen

Este estudio evalúa la incorporación de relaves de cobre, activados puzolánicamente de manera mecánica, como reemplazo parcial de cemento y árido fino en mezclas de mortero. La investigación surge como respuesta a la necesidad de reducir las emisiones asociadas al cemento Portland y de aprovechar los residuos mineros acumulados en el país.

Para ello, se elaboraron distintas dosificaciones de mortero con porcentajes variables de reemplazo, empleando relaves molidos con bolas de acero por tiempos de 15 minutos, 1, 4 y 8 horas. Se analizaron propiedades como la trabajabilidad, la densidad y las resistencias a flexión y compresión a los 28 y 56 días de curado. Además, se analizaron variables adicionales como fibra sintética, cal viva, agua adicional y variaciones en la fracción granulométrica del relave, con el fin de identificar el desempeño óptimo de las mezclas.

Los resultados demostraron que es posible utilizar el relave activado sin comprometer el rendimiento del mortero, especialmente en remplazos de cemento de 10% y 20%, y de árido fino hasta un 65%. Las mezclas óptimas mostraron buen desempeño mecánico y una trabajabilidad aceptable, destacando aquellas condiciones con adición de cal y combinaciones de fracciones. En cambio, los reemplazos de cemento superiores al 30% y los tiempos de molienda de 4 y 8 horas redujeron la resistencia estructural, debido a la sobre pulverización del relave y la pérdida de su capacidad puzolánica.

Se concluye que el uso de relaves activados mecánicamente permite desarrollar morteros con potencial aplicación en infraestructura minera subterránea, como hormigón proyectado o revestimiento de túneles. Esta alternativa no solo contribuye a valorizar un residuo minero de difícil gestión, sino también a representar una estrategia concreta para reducir la huella ambiental en la industria de la construcción.

Abstract

This study evaluates the incorporation of mechanically activated copper tailings as a partial replacement for cement and fine aggregate in mortar mixtures. The research look for reduce emissions associated with Portland cement and to utilize the large volumes of mining waste accumulated in Chile.

Here, various mortar dosages were prepared with different replacement percentages of mine tailings. The mine tailings was milled with steel balls for 15 minutes, 1, 4, and 8 hours. Properties such as workability, dry density, and flexural and compressive strengths at 28 and 56 days of curing were analyzed. Additionally, modifications such as the incorporation of synthetic fiber, quicklime, extra water, and granulometric fraction variations were implemented to improve the performance of the mixtures.

The results showed that it is possible to use activated tailings without compromising mortar performance, particularly for cement replacements of 10% and 20%, and fine aggregate replacements up to 65%. The most efficient mixtures demonstrated good mechanical behavior and acceptable workability, especially those including quicklime and blended tailings fractions. Conversely, cement replacements above 30% and grinding times of 4 and 8 hours decreased structural strength due to overgrinding and loss of pozzolanic potential.

Therefore, the use of mechanically activated tailings allows mortar with potential application to be developed in underground mining infrastructure, such as shotcrete or tunnel linings. This alternative represents a good strategy to reduce the environmental footprint of the construction industry.

Tabla de contenido

Capítulo 1: Introducción 1

1.1 Objetivos 2

1.1.1 Objetivo general 2

1.1.2 Objetivos específicos 2

1.2 Metodología general 3

Capítulo 2: Marco teórico 4

2.1 Relaves 4

2.1.1 Depósitos de relaves 5

2.1.2 Impacto ambiental de los relaves 6

2.1.3 Normativa para la disposición de los relaves 7

2.2 Cemento 9

2.2.1 Cemento Portland 10

2.2.2 Cemento Puzolánico 11

2.2.3 Hidratación del cemento 12

2.3 Morteros 13

2.3.1. Normativa NCh 2256 13

2.3.2 Tipos de morteros 13

2.4 Molienda 14

2.4.1 Tipos de Molienda 14

2.4.2 Activación mecánica de los relaves mediante molienda 15

2.5 Reemplazo de cemento 16

2.5.1 Caso 1 17

2.5.2 Caso 2 18

2.6 Reemplazo de áridos 19

2.6.1 Caso 1 19

2.6.2 Caso 2 20

2.7 Actividad puzolánica 20

2.8 Índice de Actividad Puzolánica 21

Capítulo 3: Materiales 23

3.1 Cemento 23

3.2 Relave 23

3.3 Arena 24

3.4 Agua 25

3.5 Cal 25

3.6 Fibra Sintética 25

Capítulo 4: Metodología experimental 26

4.1 Dosificación 26

4.1.1 Reemplazo de cemento 26

4.1.2 Reemplazo de áridos 28

4.2 Molienda 29

4.3 Caracterización de materiales 30

4.4 Preparación de las probetas 38

4.5 Ensayos de resistencia 39

Capítulo 5: Resultados 40

5.1 Trabajabilidad del mortero 40

5.2.1 Etapa preliminar 40

5.2.2 Etapa complementaria 41

5.3 Densidad 43

5.4 Flexión 44

5.4.1 Etapa preliminar: 28 días de curado 44

5.4.2 Etapa complementaria: 28 y 56 días de curado 45

5.5 Compresión 48

5.5.1 Etapa preliminar: 28 días de curado 48
5.5.2 Etapa complementaria: 28 y 56 días de curado 49

Capítulo 6: Discusión 53
6.1 Evaluación de la etapa preliminar 53
6.2 Evaluación de la etapa complementaria 55
6.3 Influencia de la activación mecánica del relave 59
6.4 Limitaciones del estudio 60

Capítulo 7: Conclusiones y recomendaciones 62

Capítulo 8: Bibliografía 64

Capítulo 9: Anexos 70
Anexo 9.1 Curvas granulométricas de los materiales 70
Anexo 9.2 Detalles de las dosificaciones 71
Anexo 9.3 Molienda de los relaves 75
Anexo 9.4 Imágenes SEM 76
Anexo 9.5 Resultados de DRX 79
Anexo 9.6 Resultados de difracción láser 82
Anexo 9.7 Procedimiento de cómo hacer los morteros 84
Anexo 9.8 Ensayos de resistencia 88
Anexo 9.9 Resultados de los ensayos de trabajabilidad 90
Anexo 9.10 Resultados de la densidad 92
Anexo 9.11 Resultados de resistencia a la flexión 94
Anexo 9.12 resultados de resistencia a la compresión 96

Índice de Tablas

Tabla 1. Situación de los depósitos de Relaves en Chile 4
Tabla 2. Tipos de Depósitos de Relaves en Chile 6
Tabla 3. Clasificación de los tipos de cementos en Chile 9
Tabla 4. Composición química del Clínker [18] 11
Tabla 5. Normativas para la fabricación de morteros 13
Tabla 6. Distribución granulométrica del cemento 23
Tabla 7. Distribución granulométrica del relave 24
Tabla 8. Distribución granulométrica de la arena 24
Tabla 9. Mineralogía de la arena por difracción de rayos X (%) 33
Tabla 10. Mineralogía de los relaves utilizados para las mezclas de los morteros 34

Índice de Figuras

Figura 1. Normativa vigente para la disposición de los depósitos de relaves en Chile (elaboración propia en base a [16]) 8
Figura 2. Comparación de curvas granulométricas del cemento, relave y árido fino 24
Figura 3. Nomenclatura utilizada para las mezclas control 26
Figura 4. Nomenclatura utilizada para el reemplazo de cemento < 150 µm 26
Figura 5. Nomenclatura utilizada para el reemplazo de cemento < 150 µm con fibra sintética 27
Figura 6. Nomenclatura utilizada para el reemplazo de cemento del 20 % < 150 µm con ajuste en la relación agua/cemento 27
Figura 7. Nomenclatura utilizada para el reemplazo de cemento del 10 % < 150 µm con incorporación de cal viva 28
Figura 8. Nomenclatura utilizada para el reemplazo de cemento del 20 % según tipo de fracción del relave 28
Figura 9. Nomenclatura utilizada para el reemplazo de árido > 150 µm 29
Figura 10. Nomenclatura utilizada para el reemplazo de árido > 150 µm con ajuste de relación agua/cemento 29
Figura 11. Curva de distribución del número de bolas según su diámetro en el Molino de Bolas tipo Marcy 30
Figura 12. Micrografía SEM para relave sin tratamiento previo 31
Figura 13. Micrografía SEM del relave fino molido a distintos tiempos 32
Figura 14. Diámetros efectivos para distintos tipos de relaves 35
Figura 15. Distribución de tamaño de partícula por difracción láser 36
Figura 16. Coeficientes granulométricos según tipo de relave activado 37
Figura 17. Diámetros efectivos para las mezclas de reemplazo de áridos por relave 37
Figura 18. Coeficientes granulométricos para mezclas con reemplazo de árido por relave 38
Figura 19. Aplicación de ensayos de resistencia mecánica sobre morteros (a) Ensayo de flexión con máquina INSTRON 8801; (b) Ensayo de compresión con prensa MATEST C088-11N 39
Figura 20. Resultados de la trabajabilidad para el reemplazo de cemento < 150 µm 40
Figura 21. Resultados de la trabajabilidad para el reemplazo de árido > 150 µm 41

Figura 22. Resultados de la trabajabilidad para el reemplazo de cemento < 150 µm con fibra sintética 41
Figura 23. Resultados de la trabajabilidad para el reemplazo de cemento del 20 % < 150 µm con ajuste en la relación agua/cemento 42
Figura 24. Resultados de la trabajabilidad para el reemplazo de cemento del 10 % < 150 µm con cal viva 42
Figura 25. Resultados de la trabajabilidad para el reemplazo de cemento del 20 % para distintos tipos de relaves molidos 43
Figura 26. Resultados de la trabajabilidad para el reemplazo de árido > 150 µm con ajuste en la relación agua/cemento 43
Figura 27. Relación entre la densidad y coeficientes para mezclas con reemplazo de árido > 150 µm 44
Figura 28. Resultados de resistencia a la flexión para el reemplazo de cemento < 150 µm para 28 días de curado 45
Figura 29. Resultados de resistencia a la flexión para el reemplazo de árido > 150 µm para 28 días de curado 45
Figura 30. Resultados de resistencia a la flexión para el reemplazo de cemento < 150 µm con fibra sintética para 28 y 56 días de curado 46
Figura 31. Resultados de resistencia a la flexión para el reemplazo de cemento del 20 % < 150 µm con ajuste en la relación agua/cemento para 28 y 56 días de curado 46
Figura 32. Resultados de resistencia a la flexión para el reemplazo de cemento del 10 % < 150 µm con cal viva para 28 y 56 días de curado 47
Figura 33. Resultados de resistencia a la flexión para el reemplazo de cemento del 20 % con distintos tipos de relaves molidos para 28 y 56 días de curado 47
Figura 34. Resultados de resistencia a la flexión para el reemplazo de árido > 150 µm con ajuste en la relación de agua/cemento para 28 y 56 días de curado 48
Figura 35. Resultados de resistencia a la compresión para el reemplazo de cemento < 150 µm con 28 días de curado 49
Figura 36. Resultados de resistencia a la compresión para el reemplazo de árido > 150 µm con 28 días de curado 49

Figura 37. Resultados de resistencia a la compresión para el reemplazo de cemento < 150 µm con fibra sintética para 28 y 56 días de curado 50
Figura 38. Resultados de resistencia a la compresión para el reemplazo de cemento del 20 % < 150 µm con ajuste en la relación agua/cemento para 28 y 56 días de curado..... 51
Figura 39. Resultados de resistencia a la compresión para el reemplazo de cemento del 10 % < 150 µm con cal viva para 28 y 56 días de curado 51
Figura 40. Resultados de resistencia a la compresión para el reemplazo de cemento del 20 % para distintos tipos de relaves molidos para 28 y 56 días de curado..... 52
Figura 41. Resultados de resistencia a la compresión para el reemplazo de árido > 150 µm con ajuste en la relación agua/cemento para 28 y 56 días de curado 52

Índice de Tablas de Anexos

Tabla A- 1. Dosificación de probetas para el reemplazo de cemento < 150 µm 72
Tabla A- 2. Dosificación de probetas para el reemplazo de cemento < 150 µm con fibra sintética 73
Tabla A- 3. Dosificación de probetas para el reemplazo de cemento del 20 % < 150 µm con ajuste en la relación de agua/cemento 73
Tabla A- 4. Dosificación de probetas para el reemplazo de cemento del 10 % < 150 µm con cal viva 74
Tabla A- 5. Dosificación de probetas para el reemplazo de cemento del 20 % para distintos tipos de relaves molidos 74
Tabla A- 6. Dosificación de probetas para el reemplazo de árido > 150 µm 74
Tabla A- 7. Dosificación de probetas para el reemplazo de árido > 150 µm con ajuste en la relación agua/cemento 75
Tabla A- 8. Número de bolas en el molino 75
Tabla A- 9. Resultados de distribución de tamaño de partícula y coeficientes granulométricos para relaves según tiempo de molienda 83
Tabla A- 10. Resultados de distribución de tamaño de partícula y coeficientes granulométricos para las mezclas con reemplazo de árido por relave 83
Tabla A- 11. Resultados del cono de Abrams para el reemplazo de cemento < 150 µm 90
Tabla A- 12. Resultados del cono de Abrams para el reemplazo de árido > 150 µm 90
Tabla A- 13. Resultados del cono de Abrams para el reemplazo de cemento < 150 µm con fibra sintética 91
Tabla A- 14. Resultados del cono de Abrams para el reemplazo de cemento del 20 % < 150 µm con ajuste en la relación agua/cemento 91
Tabla A- 15. Resultados del cono de Abrams para el reemplazo de cemento del 10 % < 150 µm con cal viva 91
Tabla A- 16. Resultados del cono de Abrams para el reemplazo de cemento del 20 % para distintos tipos de relaves molidos 91
Tabla A- 17. Resultados del cono de Abrams para el reemplazo de árido > 150 µm con ajuste en la relación agua/cemento 91
Tabla A- 18. Densidad para el reemplazo de cemento < 150 µm 92

Tabla A- 19. Densidad para el reemplazo de árido > 150 µm 93
Tabla A- 20. Densidad para el reemplazo de cemento < 150 µm con fibra sintética 93
Tabla A- 21. Densidad para el reemplazo de cemento del 20 % < 150 µm con ajuste en la relación agua/cemento 93
Tabla A- 22. Densidad para el reemplazo de cemento del 10 % < 150 µm con cal viva 93
Tabla A- 23. Densidad para el reemplazo de cemento del 20 % para distintos tipos de relaves molidos 93
Tabla A- 24. Densidad para el reemplazo de árido > 150 µm con ajuste en la relación agua/cemento 94
Tabla A- 25. Resistencia a la flexión para el reemplazo de cemento < 150 µm 94
Tabla A- 26. Resistencia a la flexión para el reemplazo de árido > 150 µm 94
Tabla A- 27. Resistencia a la flexión para el reemplazo de cemento < 150 µm con fibra sintética 95
Tabla A- 28. Resultados a la flexión para el reemplazo de cemento del 20 % < 150 µm con ajuste en la relación agua/cemento 95
Tabla A- 29. Resultados a la flexión para el reemplazo de cemento del 10 % < 150 µm con cal viva 95
Tabla A- 30. Resultados a la flexión para el reemplazo de cemento del 20 % para distintos tipos de relaves molidos 96
Tabla A- 31. Resultados a la flexión para el reemplazo de árido > 150 µm con ajuste en la relación agua/cemento 96
Tabla A- 32. Resistencia a la compresión para el reemplazo de cemento < 150 µm para 28 días de curado 96
Tabla A- 33. Resultados de IAR [%] para el reemplazo de cemento < 150 µm para 28 días de curado 97
Tabla A- 34. Resistencia a la compresión para el reemplazo de árido > 150 µm 97
Tabla A- 35. Resistencia a la compresión para el reemplazo de cemento < 150 µm con fibra sintética para 28 y 56 días de curado 98
Tabla A- 36.Resultados de IAR [%] para el reemplazo de cemento < 150 µm con fibra sintética para 28 y 56 días de curado 98

Tabla A- 37. Resultados a la compresión para el reemplazo de cemento del 20 % < 150 μm con ajuste en la relación agua/cemento para 38 y 56 días de curado 100
Tabla A- 38. Resultados de IAR [%] para el reemplazo de cemento del 20 % < 150 μm con ajuste en la relación agua/cemento para 28 y 56 días de curado 100
Tabla A- 39. Resultados a la compresión para el reemplazo de cemento del 10 % < 150 μm con cal viva para 28 y 56 días de curado 101
Tabla A- 40. Resultados de IAR [%] para el reemplazo de cemento del 10 % < 150 μm con cal viva para 28 días de curado 101
Tabla A- 41. Resultados a la compresión para el reemplazo de cemento del 20 % para distintos tipos de relaves molidos para 28 y 56 días de curado 102
Tabla A- 42. Resultados de IAR [%] para el reemplazo de cemento del 20 % para distintos tipos de relaves molidos para 28 días de curado 102
Tabla A- 43. Resultados a la compresión para el reemplazo de árido > 150 μm con ajuste en la relación agua/cemento 103

Índice de Figuras de Anexos

Figura A- 1. Curva granulométrica del cemento 70
Figura A- 2. Curva granulométrica del relave 70
Figura A- 3. Curva granulométrica de la arena 70
Figura A- 4. Molino de bolas utilizado para la molienda 75
Figura A- 5. SEM del relave completo 76
Figura A- 6. SEM del relave fino (< 150 μm) 76
Figura A- 7. SEM del relave grueso (> 150 μm) 77
Figura A- 8. Relave fino molido a 15 minutos 77
Figura A- 9. Relave fino molido a 1 hora 78
Figura A- 10. Relave fino molido a 4 horas 78
Figura A- 11. Relave fino molido 8 horas 79
Figura A- 12. Difractograma DRX del relave completo 79
Figura A- 13. Difractograma DRX del relave fino sin moler (<150 μm) 80
Figura A- 14. Difractograma DRX del relave de 15 minutos con molienda 80
Figura A- 15. Difractograma DRX del relave de 1 hora con molienda 81
Figura A- 16. Difractograma DRX del relave de 4 horas con molienda 81
Figura A- 17. Difractograma DRX del relave de 8 horas con molienda 82
Figura A- 18. Peso de materiales para realizar una mezcla 84
Figura A- 19. Batidora de eje vertical utilizada para la elaboración de las mezclas 85
Figura A- 20. Medición del mortero tras el ensayo de trabajabilidad (Flow Test) 86
Figura A- 21. Máquina vibratoria utilizada para el moldeo de probetas 86
Figura A- 22. Probeta después del fraguado, previo a ser medida y pesada 87
Figura A- 23. Probeta siendo pesada luego del curado 87
Figura A- 24. Horno utilizado para el secado de muestras 88
Figura A- 25. Probetas luego del ensayo de flexión 88
Figura A- 26. Máquina de flexión INSTRON 8801 89
Figura A- 27. Probetas después de terminar en el ensayo de compresión 89
Figura A- 28. Máquina de compresión MATEST modelo C088-11N 90
Figura A- 29. Comparación entre la resistencia a compresión y el índice de actividad puzolánica (IAR) para el reemplazo de cemento < 150 μm para 28 días de curado 97

Figura A- 30. Comparación entre la resistencia a compresión y el índice de actividad puzolánica (IAR) para el reemplazo de cemento < 150 μm con fibra sintética para 28 días de curado 99
Figura A- 31. Comparación entre la resistencia a compresión y el índice de actividad puzolánica (IAR) para el reemplazo de cemento < 150 μm con fibra sintética para 25 días de curado 99
Figura A- 32. Comparación entre la resistencia a compresión y el índice de actividad puzolánica (IAR) para el reemplazo de cemento del 20 % < 150 μm con ajuste en la relación agua/cemento para 28 días de curado 100
Figura A- 33. Comparación entre la resistencia a compresión y el índice de actividad puzolánica (IAR) para el reemplazo de cemento del 20 % < 150 μm con ajuste en la relación agua/cemento para 56 días de curado 101
Figura A- 34. Comparación entre la resistencia a compresión y el índice de actividad puzolánica (IAR) para el reemplazo de cemento del 10 % < 150 μm con cal viva para 28 días de curado..... 102
Figura A- 35. Comparación entre la resistencia a compresión y el índice de actividad puzolánica (IAR) para el reemplazo de cemento del 20 % para distintos tipos de relaves molidos para 28 días de curado 103

Nomenclatura

PAM	Pasivos Ambientales Mineros
SMA	Superintendencia del Medio Ambiente
SCM	Material Cementante Suplementario
ASTM	American Society for Testing and Materials
NCh	Norma Chilena
UNE-EN	Norma Europea adoptada por España
XRD	Difracción de Rayos X
SEM	Microscopia Electrónica de Barrido
IAR	Índice de Actividad Puzolánica
CO_2	Dióxido de carbono
CaO	Óxido de calcio
SiO_2	Dióxido de silicio
Al_2O_3	Óxido de aluminio
Fe_2O_3	Óxido de hierro
SO_3	Trióxido de azufre
RC	Reemplazo de cemento
RA	Reemplazo de árido
AEX	Adición de agua extra
C5	Adición de 5 % de cal viva
F	Mezcla con incorporación de fibra sintética
SM	Relave sin molienda
15M	Relave molido durante 15 minutos

1H	Relave molido durante 1 hora
4H	Relave molido durante 4 horas
8H	Relave molido durante 8 horas
GF	Mezcla de fracción gruesa y fina del relave
G	Relave grueso molido
T	Relave total molido
C_u	Coeficiente de uniformidad
C_c	Coeficiente de curvatura
MPa	Megapascal
RPM	Revoluciones por minuto
° C	Grados Celsius
µm	Micrómetro
D	Diámetro de partícula (D10, D50, D80, etc.)
mm	Milímetros
kg	Kilogramos
g	Gramos
”	Pulgadas
%	Porcentaje
cm	Centímetros
g/cm³	Gramos por centímetro cúbico
NiCu	Relave de cobre-níquel
Qtz	Relave de cuarzo

Capítulo 1: Introducción

La minería es una de las principales actividades económicas de Chile, desempeñando un papel crucial en el desarrollo del país, siendo el país líder en la explotación del cobre a nivel mundial, además, seis de las diez minas de cobre más importantes del mundo se encuentran en el país [1]. Con el transcurso de los años, ha aumentado la explotación de recursos valiosos, pero es importante considerar que estos generan residuos en grandes volúmenes denominados Pasivos Ambientales Mineros (PAM). Estos corresponden a instalaciones, desechos químicos y residuos mineros que se encuentran abandonados, paralizados o inactivos. De todos ellos, los de mayor impacto son los relaves, desechos que se acopian como residuos finos generados durante el procesamiento de minerales [2].

Los relaves presentan desafíos tanto ambientales como económicos debido a su almacenamiento a largo plazo y su posible impacto negativo en los ecosistemas. En Chile, existen 795 depósitos de relaves [3], lo que lo sitúa en el tercer lugar entre los países con mayor cantidad de residuos mineros. Se proyecta que, para el año 2026, el volumen de material de relaves a gestionar alcanzará aproximadamente los 915 millones de toneladas [4].

Estos residuos son una amenaza para el medio ambiente, ya que contienen sustancias químicas y metales pesados que pueden filtrarse al suelo, contaminando cuerpos de agua y ecosistemas. Del mismo modo, su presencia puede implicar un riesgo para la salud de las comunidades próximas a los depósitos de relaves [5]. Frente a esta situación, surgió la importancia de reutilizar estos materiales, transformándolos en recursos valiosos para diversas aplicaciones de construcción o industriales que sean sostenibles con el medio ambiente.

A nivel mundial, se ha identificado que otro de los sectores con alto impacto ambiental es el de la construcción [6]. Éste demanda grandes volúmenes de cemento, ya que es un insumo esencial para la fabricación del hormigón y uno de los materiales con mayor generación de emisiones de CO_2. Se estima que su producción es responsable del 8% de las emisiones globales de CO_2, debido a la calcinación de piedra caliza para obtener clínker, así como al uso intensivo de combustibles fósiles (como carbón y coque de petróleo) en los hornos de producción [7]. Cada año se producen más de 4 mil millones de toneladas de cemento, y la

demanda continúa en aumento debido al crecimiento urbano y a la expansión de infraestructura, especialmente en países en desarrollo [7].

En este contexto, se plantea la necesidad de desarrollar estrategias que contribuyan a la reducción del volumen de relaves almacenados y, al mismo tiempo, aporten beneficios a la industria de la construcción mediante la disminución del consumo de cemento y áridos. El reemplazo parcial de estas materias primas con relaves permitiría optimizar el uso de recursos naturales y reducir la huella de carbono asociada a la producción de cemento, mitigando las emisiones de CO_2.

En este estudio, se plantea que el uso de relave de pórfido cuprífero activado mecánicamente con fines puzolánicos, como sustituto parcial del cemento y los áridos permitirá mantener o incluso mejorar las propiedades mecánicas de los morteros, sin comprometer su trabajabilidad. Se espera que la molienda incremente la reactividad del material, favoreciendo su integración en la matriz cementante y mejorando su desempeño estructural en términos de resistencia a compresión y flexión. A partir de este punto, se entenderá que toda referencia a relave activado corresponde a un material activado puzolánicamente mediante molienda mecánica.

Con este objetivo, el presente estudio evalúa el desempeño de morteros con reemplazo parcial de cemento y áridos por relaves provenientes de un depósito de pórfido cuprífero, activados mecánicamente, analizando su impacto en las propiedades mecánicas y de trabajabilidad de las mezclas.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo general

Evaluar la viabilidad de fabricar morteros con reemplazo parcial de cemento y áridos por relave de pórfido cuprífero activado mecánicamente mediante molienda, sin comprometer sus propiedades reológicas ni su resistencia mecánica.

1.1.2 Objetivos específicos

- Caracterizar el relave de pórfido cuprífero para determinar su viabilidad como material de reemplazo en morteros.

- Evaluar el efecto de la molienda del relave en la distribución de partículas y reactividad mediante activación mecánica.
- Analizar el desempeño mecánico de morteros con distintas proporciones de reemplazo de cemento y áridos, considerando tiempos de curado de 28 y 56 días.
- Identificar la combinación óptima de reemplazo en función del desempeño mecánico y la trabajabilidad del mortero.

1.2 Metodología general

El desarrollo de la investigación se realizará en diferentes etapas. En primer lugar, se iniciará con la recopilación de información útil para el estudio, luego se llevará a cabo la caracterización mineralógica y granulométrica del relave a utilizar mediante difracción de rayos X (XRD) y microscopia electrónica de barrido (SEM), con el fin de analizar la distribución de las partículas tanto en el material natural sin tratamiento como en el material tratado. Por lo tanto, se estudiará el impacto de la molienda bajo diferentes condiciones para examinar el efecto de la activación mecánica, implementando tiempos de molienda de 15 minutos, 1 hora, 4 horas y 8 horas, con el propósito de evaluar su efecto en la reactividad del material.

En consecuencia, se fabricarán morteros con múltiples proporciones de reemplazo de cemento y áridos por relave, basándose en las normativas que se deben cumplir para la obtención de estos. Posteriormente, estas mezclas deberán ser expuestas a ensayos de resistencia a la flexión y compresión en distintos periodos de curado, específicamente a los 28 y 56 días respectivamente. Para concluir, se estudiarán los resultados obtenidos con el fin de distinguir cuáles son los reemplazos óptimos en términos de resistencia y trabajabilidad, con el objetivo de que sean útiles en aplicaciones mineras, destacando su posible implementación en infraestructuras subterráneas.

Capítulo 2: Marco teórico

En el presente capítulo se exponen los fundamentos teóricos que sustentan la evaluación de morteros con reemplazo parcial de cemento y áridos mediante relaves de cobre activados mecánicamente. Se aborda su impacto ambiental, valorización como material cementante, normativa vigente en Chile, propiedades del cemento y los morteros, además de estudios sobre el reemplazo parcial, activación mecánica por molienda y actividad puzolánica.

2.1 Relaves

Los relaves son residuos sólidos que se generan a lo largo del procesamiento de minerales, los cuales están compuestos principalmente por partículas finas de roca, agua y en ciertos casos, por pequeñas cantidades de reactivos químicos utilizados en los procesos de flotación y concentración de minerales. En la minería del cobre, estos residuos provienen del tratamiento de minerales sulfurados y oxidados, tras la molienda y flotación del material se obtiene una pequeña fracción del mineral concentrado, mientras que el material restante es el relave [8].

Según el Catastro de Depósitos de Relaves en Chile 2023 del Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), en el país existen 795 depósitos de relaves, de los cuales 128 están activos, 475 inactivos y 176 abandonados [3]. La Tabla 1 muestra la distribución de estos depósitos a lo largo del territorio nacional.

Tabla 1. Situación de los depósitos de Relaves en Chile

Región	Activos	Inactivos	Abandonados	En Revisión	En Construcción	Total
Tarapacá	2	0	6	0	0	8
Antofagasta	15	23	16	0	0	54
Atacama	37	114	26	0	8	185
Coquimbo	45	247	106	1	7	406
Valparaíso	14	56	11	0	0	81
Metropolitana de Santiago	7	14	6	0	0	27
O'Higgins	3	15	1	0	0	19
Maule	4	2	0	0	0	6
Aysén	1	4	4	0	0	9
Total	**128**	**475**	**176**	**1**	**15**	**795**

De acuerdo con la clasificación del SERNAGEOMIN, los distintos tipos de depósitos de relaves se definen de la siguiente manera [9]:

- **Activos:** depósitos que aún se encuentran en operación dentro de procesos mineros en curso y no han completado su vida útil.
- **Inactivos:** son aquellos depósitos que han completado su vida útil y no reciben material adicional, pero cuentan con un operador responsable a cargo de su gestión.
- **Abandonados:** depósitos que han completado su vida útil y no reciben materia, y además no cuentan con un operador responsable o propietario identificado.

2.1.1 Depósitos de relaves

En Chile, los depósitos de relaves se clasifican en diferentes tipos según su método de construcción y procesamiento. De acuerdo con el Plan Nacional de Depósitos de Relaves para una Minería Sostenible y el Decreto Supremo N° 248/2007, existen las siguientes categorías de clasificación:

Según el método de construcción:

- **Tranque de relave:** depósito de relaves que se caracteriza por la construcción de muros de contención a partir de arenas gruesas del mismo relave. Permiten la sedimentación de sólidos finos, dejando una laguna en la superficie.
- **Embalse de relave:** instalación construida en depresiones naturales o mediante muros de contención impermeabilizados para reducir la filtración y mejorar la estabilidad.

Según el procesamiento del relave:

- **Relave espesado:** depósito en el que los residuos han sido sometidos a un proceso de espesamiento para reducir su contenido de agua antes de su disposición, mejorando la estabilidad física del depósito.
- **Relave en pasta:** presenta una mayor concentración de sólidos y menor contenido de agua, formando una mezcla densa que reduce el riesgo de filtraciones y permite el uso en relleno minero.
- **Relave filtrado:** relaves que han pasado por un proceso de filtración para reducir su humedad por debajo del 20%, permitiendo su almacenamiento en pilas compactas y estables.

Además, existen otros tipos de depósitos de relaves, como los subterráneos en minas abandonadas o en rajos, donde los relaves se utilizan para mejorar la estabilidad de excavaciones. Según el SERNAGEOMIN (2023), la distribución de los distintos tipos de depósitos de relaves en Chile se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2. Tipos de Depósitos de Relaves en Chile

Tipo	Cantidad	Porcentual (%)
Tranque	611	78,86
Embalse	137	17,23
Filtrado	23	2,89
Espesado	11	1,38
Sin información	6	0,75
Pasta	5	0,63
Pretil	1	0,13
Interior Mina	1	0,13
Total	**795**	**100%**

2.1.2 Impacto ambiental de los relaves

Los relaves mineros representan un desafío ambiental significativo debido a su potencial de contaminación y afectación a los ecosistemas. Además, los relaves no solo contienen partículas de rocas finamente molidas, sino que también poseen metales pesados, reactivos químicos y partículas finas, que conllevan diversos riesgos ambientales y geotécnicos, afectando suelos, napas de agua y la calidad del aire en las zonas cercanas a las operaciones mineras [10]. Con lo anterior, los temas más relevantes para el impacto ambiental de los relaves son:

- **Contaminación del agua y suelos:** los relaves mineros poseen una composición que incluye metales pesados como arsénico (As), cadmio (Cd), plomo (Pb), mercurio (Hg) y zinc (Zn), entre otros metales y sustancias tóxicas. Estos elementos pueden migrar hacia los suelos y cuerpos de agua cercanos, afectando su calidad y generando impactos ambientales a largo plazo [11]. Diversos estudios han demostrado que en la Región de Antofagasta los niveles de metales pesados en cuerpos de agua han experimentado un incremento significativo desde la década de 1990 [12].
- **Dispersión del material particulado**: los relaves depositados en superficies expuestas pueden ser transportados por el viento en forma de partículas en suspensión, lo que contribuye a la contaminación del aire. Debido a su tamaño

reducido, estas partículas no son perceptibles a simple vista, pero pueden ingresar al sistema respiratorio, lo que representa un riesgo para la salud, especialmente en personas con enfermedades respiratorias preexistentes y en comunidades cercanas a los depósitos [13].

- **Riesgos geotécnicos y estabilidad de depósitos:** la estabilidad estructural de los depósitos de relaves depende de una gestión adecuada en su diseño, construcción y mantenimiento. En ausencia de monitoreos adecuados, estas infraestructuras pueden colapsar, generando impactos ambientales de gran magnitud. En el caso de Chile, la condición sísmica del país incrementa dicha vulnerabilidad en estas estructuras, lo que podría resultar en derrames de grandes volúmenes de relaves, contaminando ríos y suelos agrícolas [14].

La gestión de los relaves requiere la implementación de tecnologías de monitoreo, control de emisiones y planes de cierre adecuados, los cuales son establecidos por el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) y la Superintendencia del Medio Ambiente (SMA), estas normativas tienen como objetivo reducir el impacto ambiental y proteger la salud de las personas expuestas a estos residuos.

2.1.3 Normativa para la disposición de los relaves

En Chile, la disposición de los depósitos de relaves se encuentra regulada por un marco normativo que establece los requisitos técnicos para su diseño, construcción, operación y cierre. El propósito de esta normativa es reducir el impacto ambiental asociado a estos depósitos y garantizar su estabilidad geotécnica a lo largo de su vida útil. Para ello, es obligatorio el cumplimiento de diversas disposiciones legales, las cuales se presentan de manera esquemática en la Figura 1 [15].

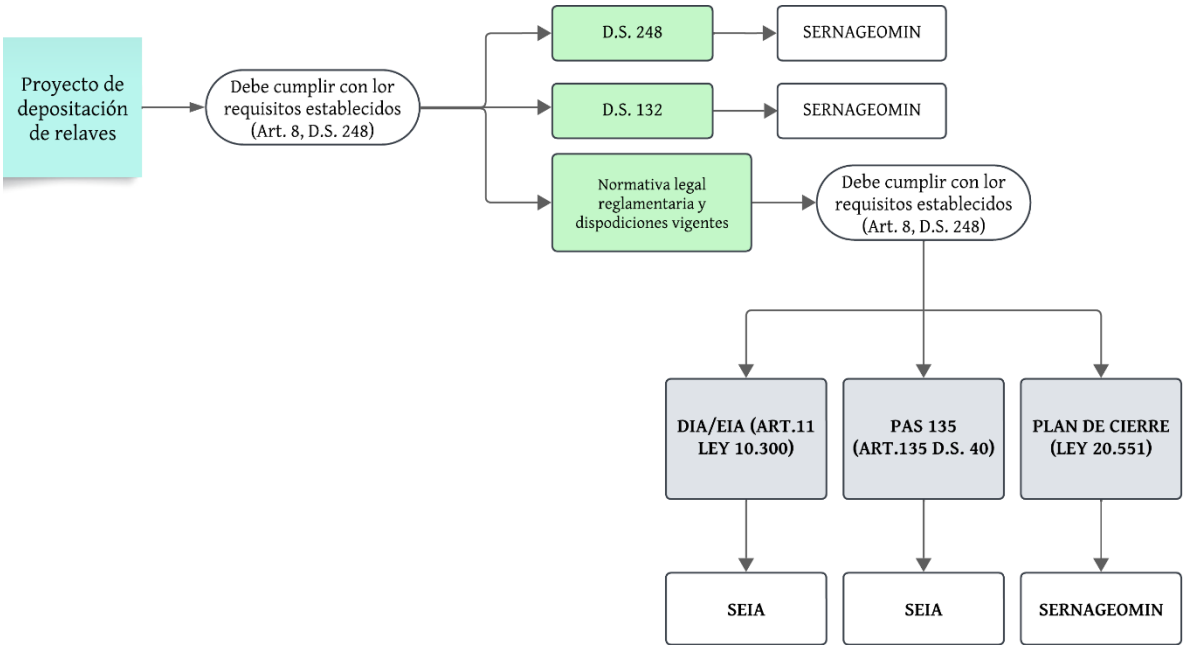


Figura 1. Normativa vigente para la disposición de los depósitos de relaves en Chile (elaboración propia en base a [15]**)**

Decreto Supremo N° 248/2007 - Reglamento para la Aprobación de Proyectos de Diseño, Construcción, Operación y Cierre de los Depósitos de Relaves: El D.S. 248 considera todo tipo de minería, desde la pequeña hasta la gran minería, con la finalidad de garantizar que estos proyectos cumplan con los estándares de seguridad geotécnica y ambiental antes de su construcción y operación. Este decreto regula específicamente las áreas de diseño y construcción, estableciendo requisitos técnicos para su estabilidad. Asimismo, establece directrices para la operación, incorpora medidas de monitoreo y control destinadas a prevenir impactos ambientales, como la contaminación de agua y dispersión de material particulado. Por último, incluye disposiciones para los planes de cierre, definiendo los procedimientos de clausura de los depósitos, con el fin de asegurar su estabilidad a largo plazo y minimizar los riesgos geotécnicos [15].

Decreto Supremo N° 132/2004 - Reglamento de Seguridad Minera: El D.S. 132 establece normas destinadas a proteger la vida e integridad física de los trabajadores, así como a garantizar la seguridad de las instalaciones mineras. Su objetivo es asegurar que las operaciones mineras cumplan con los estándares de seguridad establecidos, evitando que los depósitos de relaves representen un riesgo para los trabajadores y las comunidades cercanas [16].

2.2 Cemento

El cemento es un material esencial en la industria de la construcción y uno de los más producidos a nivel mundial, siendo China, India y Estados Unidos los principales países fabricantes. Se caracteriza por ser un aglomerante en polvo fino, capaz de fraguar y endurecerse al entrar en contacto con el agua, adquiriendo resistencia mecánica. Su fabricación implica la calcinación y posterior molienda de una mezcla de caliza y arcilla, obteniéndose así un material con propiedades hidráulicas que lo hacen indispensable en la construcción de infraestructuras y edificaciones [17].

Este material está compuesto por clínker, yeso y aditivos químicos específicos, siendo el clínker el componente principal. Este se obtiene mediante la calcinación de rocas calizas, arcillas y mineral de hierro a temperaturas superiores a 1450 °C, proceso que permite la formación de los compuestos necesarios para su posterior uso en la fabricación del cemento [18]. En Chile, se comercializan diversos tipos de cemento cuya clasificación está regulada por la Norma NCh 148 [19]. Estos cementos se diferencian principalmente por su composición y resistencias como se presenta en la Tabla 3 [17].

Tabla 3. Clasificación de los tipos de cementos en Chile

Denominación	Clínker (%)	Puzolana (%)	Escoria (%)
Portland	100	-	-
Portland Puzolánico	≥ 70	≤ 30	-
Portland Siderúrgico	≥ 70	-	≤ 30
Puzolánico	50-70	30-50	-
Siderúrgico	25-70	-	30-75

Entre los componentes más utilizados, destacan:

- **Puzolana**: materiales silíceos o aluminosilicatos que, cuando en estado finamente dividido y en presencia de humedad, reaccionan con el hidróxido de calcio para formar compuestos cementantes. Su incorporación en mezclas de cemento mejora la durabilidad y resistencia química del material.
- **Escoria:** subproducto no metálico proveniente del proceso de fundición del mineral de hierro, la cual se obtiene tras un proceso de enfriamiento controlado.

2.2.1 Cemento Portland

El cemento portland es uno de los materiales más utilizados a nivel mundial en la industria de la construcción. Su fabricación se realiza a partir de una mezcla de caliza y arcilla, la cual es sometida a altas temperaturas en un proceso de calcinación y, posteriormente molida hasta obtener un polvo fino. Se caracteriza por su alta resistencia y durabilidad lo que lo hace adecuado para la construcción de hormigón armado, como edificios, puentes y carreteras [18].

La producción de este cemento Portland involucra varias etapas claves [20]:

I. Extracción y preparación de materias primas: se extraen rocas calizas y arcillas, las cuales son trituradas y clasificadas para obtener una mezcla homogénea.
II. Homogenización: la mezcla es sometida a un proceso que garantiza una composición química uniforme, logrando un tamaño de partícula inferior a 5 mm.
III. Calcinación: la mezcla homogenizada se introduce en un horno rotatorio, donde se somete a temperaturas cercanas a 1450 °C, generando una transformación química que origina el clínker.
IV. Enfriamiento: el clínker es enfriado rápidamente mediante sistemas especializados, lo que permite estabilizar sus propiedades y facilita su almacenamiento y transporte.
V. Molienda final: para obtener el cemento, el clínker se muele junto a una pequeña cantidad de yeso, cuya función es regular el tiempo de fraguado.

El comportamiento del cemento durante el proceso de hidratación y su desempeño estructural están determinados por su composición química, en la cual destacan los siguientes compuestos principales [21]:

- **Silicato tricálcico (C_3S):** principal responsable de la resistencia inicial, ya que reacciona rápidamente con el agua durante las primeras etapas de hidratación.
- **Silicato bicálcico (C_2S):** reacciona de forma lenta, contribuyendo al desarrollo de la resistencia a largo plazo.
- **Aluminato tricálcico (C_3A):** influye en el fraguado inicial, aunque su interacción con los sulfatos puede producir reacciones expansivas perjudiciales.

- **Ferroaluminato tetracálcico (C_4AF):** participa en la formación del clínker y contribuye a la estabilidad química del sistema.

En la Tabla 4 se presenta la composición química típica del clínker de cemento Portland, expresada como porcentaje en masa. Esta tabla incluye los principales óxidos responsables de sus propiedades mecánicas y reactividad.

Tabla 4. Composición química del Clínker [17]

Fases	Formulas	Abreviatura	Rango
Silicato tricálcico	$3Ca \cdot SiO_2$	C_3S	46-79
Silicato bicálcico	$2Ca \cdot SiO_2$	C_2S	5-30
Ferritoaluminato tetracálcico	$4CaO\ (Al_2O_3, Fe_2O_3)$	$C_4(A,F)$	4-16
Aluminato tricálcico	$3CaO\ Al_2O_3$	C_3A	6-18
Cal libre	CaO	C	0,1-4
Oxido de magnesio libre	MgO	M	0,7-1,5

2.2.2 Cemento Puzolánico

El cemento puzolánico es un tipo de conglomerante hidráulico que se obtiene a partir de la mezcla de clínker de cemento Portland y materiales puzolánicos naturales o artificiales, los cuales presenta una composición rica en sílice y alúmina, generalmente en estado amorfo. Estos compuestos, en presencia de agua, reaccionan con el hidróxido de calcio liberado durante la hidratación del clínker, formando compuestos cementantes secundarios estables y de baja solubilidad [22].

A diferencia del cemento Portland tradicional, cuyo alto contenido de silicato tricálcico proporciona un desarrollo rápido de resistencia mecánica, el cemento puzolánico presenta una reacción más gradual, lo que se traduce en un aumento progresivo de las propiedades mecánicas con el tiempo. Esta característica lo hace especialmente adecuado para obras que requieran durabilidad a largo plazo y resistencia frente a ambientes agresivos [23].

Entre sus principales ventajas se destaca su menor liberación de calor durante la hidratación, lo cual disminuye los riesgos de fisuración por contracción térmica en estructuras masivas. Además, la fijación del hidróxido de calcio por parte de las puzolanas reduce la alcalinidad libre del sistema, contribuyendo a una mayor estabilidad química de la matriz cementante y mejorando la durabilidad frente a la acción de sulfatos y otros agentes agresivos [23].

La norma chilena NCh 161 [24] establece los requisitos generales para la fabricación y control del cemento puzolánico, incluyendo la proporción de adiciones de minerales y las propiedades físicas y mecánicas mínimas que deben cumplir estos cementos. A su vez, la normativa NCh 148 [19] clasifica los cementos comercializados en el país, reconociendo formalmente el tipo Portland puzolánico como una de las variantes autorizadas para su uso en obras de construcción [22]. Debido a su menor requerimiento de clínker en la mezcla, el cemento puzolánico presenta una huella de carbono significativamente inferior a la del cemento Portland, lo cual lo posiciona como una alternativa estratégica en la transición hacia una construcción sostenible. Esta característica, sumada a su comportamiento favorable frente a la reacción álcalis-sílice, lo convierte en una solución eficiente para enfrentar los desafíos ambientales y estructurales actuales [23].

2.2.3 Hidratación del cemento

El proceso de hidratación del cemento corresponde a una reacción química que ocurre cuando este entra en contacto con el agua, generando una serie de reacciones que permiten su fraguado y endurecimiento. Durante esta transformación, los compuestos del clínker interactúan con el agua para formar productos hidratados, los cuales proporcionan resistencia mecánica y estabilidad estructural.

Los silicatos de calcio son los principales responsables del desarrollo de resistencia, en particular, el silicato tricálcico y el silicato bicálcico reaccionan con el agua para formar silicato de calcio hidratado (C-S-H), el cual mejora la cohesión y rigidez en la matriz cementante. Asimismo, se libera hidróxido de calcio ($Ca\ (OH)_2$), manteniendo la alcalinidad del medio. Por otro lado, el aluminato tricálcico reacciona con el agua rápidamente, generando aluminato de calcio hidratado. Sin embargo, en presencia de sulfatos puede generar reacciones expansivas que afectan la durabilidad. Para evitar estos efectos adversos, se añade yeso con el objetivo de controlar el fraguado.

El endurecimiento del cemento es un proceso progresivo, influenciado por factores como la relación agua/cemento, temperatura, finura del cemento y condiciones de curado. Estas variables influyen directamente en la velocidad de hidratación, afectando tanto la resistencia como la durabilidad [25].

2.3 Morteros

El mortero es un material de construcción compuesto por una mezcla homogénea de arena, agua y un conglomerante inorgánico, que puede ser cal, yeso o cemento. Esta combinación da lugar a una pasta que se emplea en diversas aplicaciones dentro del sector de la construcción.

2.3.1. Normativa NCh 2256

La normativa establece los requisitos generales que deben cumplir los morteros utilizados en la construcción en Chile, definiendo las propiedades fundamentales que determinan su desempeño, tales como la resistencia mecánica, consistencia, retención de agua, adherencia y durabilidad [26]. Para garantizar la calidad y el cumplimiento de estándares, esta normativa se complementa con otras regulaciones que especifican los requisitos de los distintos materiales empleados en la fabricación de morteros, como el cemento, los áridos, el agua, los aditivos y las adiciones. Estas normativas se presentan en la Tabla 5, donde se identifican los términos aplicables según cada componente del mortero, asegurando así su correcta selección y aplicación en obras de construcción.

Tabla 5. Normativas para la fabricación de morteros

Material	Norma	Título
Cemento	NCh 148	Cemento - Terminología, clasificación y especificaciones generales
Arena y filler	NCh 163	Áridos para morteros y hormigones – Requisitos generales
Agua	NCh 1498	Hormigón y mortero– Agua de amasado - Requisitos
Aditivos y adiciones	NCh 2182	Hormigón y mortero – Aditivos – Clasificación y requisitos
	NCh 170	Hormigón – Requisitos generales
	NCh 2260	Morteros – Preparación de mezclas de prueba y mezclas comparativas en el laboratorio

2.3.2 Tipos de morteros

Mortero de albañilería: corresponde a un material utilizado para la unión monolítica de unidades de albañilería, tales como ladrillos, bloques de hormigón o piedra. Su principal función es proporcionar estabilidad estructural y distribuir las cargas de manera uniforme, asegurando la resistencia y durabilidad de los muros y elementos constructivos.

Morteros de revestimientos (estucos): definido por la normativa como un mortero que se aplica sobre una superficie base para mejorar su terminación y conferirle protección frente a agentes ambientales. Se utiliza principalmente en la terminación de muros y fachadas, proporcionando una superficie uniforme y estética.

2.4 Molienda

La molienda corresponde a una etapa fundamental en los procesos de reducción de tamaño de materiales sólidos, tanto en la industria minera como en la producción de insumos para la construcción. Esta operación representa la fase final de la fragmentación industrial, reduciendo el tamaño de partículas hasta niveles micrométricos.

El objetivo de este proceso es liberar los minerales de interés contenidos en la roca o alcanzar una granulometría adecuada para procesos posteriores, como la flotación o la fabricación de morteros y cementos. La molienda se lleva a cabo mediante equipos denominados molinos, que pueden operar en seco o húmedo, dependiendo de las características del material.

Durante la operación, las partículas son sometidas a fuerzas combinadas de compresión, impacto y abrasión, ejercidas por cuerpos moledores como barras o bolas de acero. La eficiencia del proceso esta influenciada por factores como el grado de llenado del molino, la velocidad de rotación y la humedad del material [27].

2.4.1 Tipos de Molienda

En minería, la molienda se clasifica principalmente según el equipo utilizado, el tamaño de partícula obtenido y la condición operativa (seca o húmeda). Cada tipo de molienda cumple funciones específicas según las propiedades del mineral y los requerimientos del proceso [27] [28]:

- **Molino de barras:** molinos cargados con barras metálicas que realizan la fragmentación del material por impacto y fricción, es utilizado principalmente para materiales de granulometría gruesa y en la primera etapa del proceso de molienda.
- **Molino de bolas:** emplea bolas de acero de diferentes tamaños, permitiendo alcanzar tamaños de partículas más finas. Se utiliza en etapas intermedias o finales del proceso de la molienda, siendo eficiente para materiales previamente chancados o parcialmente molidos.

- **Molienda semiautógena (SAG):** combina una carga parcial de bolas de acero y rocas del propio mineral. Reduce el tamaño del mineral proveniente del chancador primario y molienda, lo que disminuye costos operativos y de energía.
- **Molienda autógena:** el mineral se muele sin el uso de elementos externos como bolas o barras, reduciendo el consumo de acero y energía.

En cuanto a las condiciones de operación, la molienda seca se realiza sin incorporación de agua, siendo apropiada para productos que requieren baja humedad, mientras que para la molienda húmeda se emplea agua durante el proceso, lo que mejora la eficiencia al reducir la generación de polvo y facilita el manejo del material.

2.4.2 Activación mecánica de los relaves mediante molienda

La activación mecánica corresponde a una técnica utilizada para incrementar la reactividad de materiales con escaso potencial cementante, como es el caso de los relaves mineros. Esta se basa en la aplicación de una molienda intensiva, la cual genera modificaciones tanto físicas como químicas en las estructuras del material; entre los principales efectos observados se encuentran la disminución del tamaño de partícula, el aumento del área superficial específica, la alteración de la cristalinidad y la formación de fases amorfas que incrementan la actividad puzolánica del material [29].

En el caso particular de los relaves de cobre, diversos estudios han evidenciado que la activación mecánica mediante molienda puede duplicar o incluso triplicar su capacidad de reacción en ambientes alcalinos. Vargas y López [29] evaluaron ocho tipos de relaves de cobre mediante tratamientos térmicos y mecánicos, demostrando que una molienda superior a 30 minutos incrementa la resistencia mecánica de los morteros hasta en un 40% a los 90 días de curado. Asimismo, identificaron que los minerales más favorables para este proceso son la moscovita, la caolinita y, en menor medida, la clorita, debido a su capacidad de transformarse en fases amorfas durante la molienda, lo que permite incrementar la reactividad del relave como material cementante suplementario. En particular, la moscovita mostró un buen desempeño al presentar cambios estructurales significativos tras la activación mecánica, los cuales se asocian a una mayor participación en reacciones puzolánicas [29]. Por otro lado, Jhajharia et al. [30] concluyeron que la activación mecánica favorece la morfología del material, facilitando la integración en mezclas que contienen cemento.

Además de los relaves de cobre, diversos estudios han profundizado en la activación mecánica de otros tipos de relaves y residuos minerales con potencial puzolánico. Por ejemplo, Wang et al. [31] evaluaron la activación de relaves silíceos mediante molienda de alta energía, observando una mejora en la actividad puzolánica de 81,15% y un aumento en la superficie específica hasta 11,67 m^2/g. Los productos de hidratación identificados incluyeron geles C-S-H, etringita e hidrotalcita, lo que confirma el potencial del tratamiento mecánico en la valorización de relaves ricos en sílice. Por su parte, Saedi et al. [32] estudiaron relaves de una mina de plomo-zinc y observaron que la activación mecánica no solo incrementó la resistencia a compresión de las mezclas, sino que además redujo la lixiviación de metales pesados como plomo, zinc y cadmio. La activación favoreció la formación de productos de hidratación como la scawtita, un silicato cálcico hidratado con carbono, cuya formación contribuyó a una mejor cohesión interna del mortero, alcanzando una resistencia de hasta 45,5 MPa a los 90 días con un 20% de reemplazo de cemento.

En cuanto a la activación directa de minerales individuales, Zhang et al. [33] estudiaron el comportamiento de la moscovita, mineral ampliamente presente en distintos tipos de relaves. Los autores reportaron que, tras 160 minutos de molienda, la cristalinidad relativa del mineral disminuyó hasta un 14,99%, mientras que el índice de actividad puzolánica alcanzó el 94,36%. Este cambio estructural promovió la formación de productos de hidratación como geles C-S-H, lo que refuerza su viabilidad como componente cementante activado mecánicamente.

Desde una perspectiva ambiental, esta metodología representa una alternativa sustentable, ya que permite reutilizar residuos mineros y, a su vez, disminuir el uso del clínker en la elaboración del cemento, reduciendo también las emisiones de dióxido de carbono asociadas al proceso. Además, se promueve el aprovechamiento de estos materiales residuales en mezclas aplicables a construcciones del ámbito minero, tales como hormigón proyectado o rellenos estructurales en minería subterránea.

2.5 Reemplazo de cemento

Este apartado presenta antecedentes experimentales sobre el comportamiento de morteros con reemplazo parcial de cemento por relaves finamente molidos, considerando diferentes métodos de activación, rangos de dosificación y días de curado. Se analizan principalmente

los efectos sobre la reactividad, el consumo de hidróxido de calcio, y las resistencias mecánicas a compresión y flexión.

2.5.1 Caso 1

Mechanically activated mine tailings for use as supplementary cementitious materials [34]**:**

El estudio tuvo como objetivo evaluar la viabilidad técnica del uso de relaves mineros como materiales cementantes suplementarios (SCM), a través de activación mecánica por molienda. Para ello, se utilizaron relaves provenientes de minas de cobre-níquel (NiCu) y de cuarzo (Qtz), los cuales fueron sometidos a dos métodos de molienda: molino de bolas durante 30 minutos y molino de discos con tiempos entre 1 y 15 minutos.

La activación mecánica provocó una significativa disminución en el tamaño de partícula, alcanzando un valor del diámetro D50 de 2,8 µm en el caso del molino de discos, así como un incremento en el contenido de fases amorfas, llegando hasta un 14% en los relaves de NiCu y el 27% en los Qtz. El contenido amorfo fue cuantificado mediante difracción de rayos X cuantitativa (QXRD), utilizando rutilo como patrón interno (10%) y aplicando análisis de Rietveld, según lo señalado por los autores. Este método permitió identificar y estimar con mayor precisión las fases cristalinas y amorfas. Estos cambios estructurales, atribuidos a la amorfización superficial y la generación de defectos por colisión, incrementaron la reactividad puzolánica del material. No obstante, se observó que tras 8 minutos de molienda los beneficios asociados a la finura y la amorfización tendieron a estabilizarse.

Posteriormente, se elaboraron mezclas con 30% de reemplazo de cemento por relave activado, manteniendo una relación agua/cemento de 0,40. Estas mezclas fueron evaluadas a los 7 días de curado mediante calorimetría isotérmica y análisis termogravimétrico (TAG). Los resultados mostraron una reducción en el contenido residual del hidróxido de calcio en mezclas con relaves molidos en discos, alcanzando hasta un 38% menos respecto a la mezcla control, lo que indica una participación del relave en la hidratación, reflejando su reactividad puzolánica.

En conclusión, el estudio demuestra que la molienda con discos es una técnica más efectiva para activar relaves mineros, permitiendo su uso como reemplazo parcial del cemento, con un comportamiento favorable en niveles de reemplazo de hasta el 30%.

2.5.2 Caso 2

Mechanical Performances and Microstructures of Cement Containing Copper Tailings [35]**:**

Este estudio se enfocó en analizar el comportamiento mecánico de morteros con reemplazo parcial de cemento por relaves de cobre finamente molidos. El objetivo fue determinar cómo influye este reemplazo en las propiedades de resistencia a compresión y flexión a distintos días de curado.

Para ello, los relaves fueron molidos previamente hasta alcanzar su tamaño de partícula adecuado para su incorporación en mezclas con cemento, y se utilizaron como reemplazo del cemento en proporciones entre el 5% y el 35%, con incrementos del 5%. Las mezclas se prepararon con una relación agua/cemento constante y fueron ensayadas a los 3, 28 y 90 días de curado, evaluando su comportamiento mecánico.

Los resultados indicaron que, en reemplazos de hasta un 15% de cemento por relave molido, las resistencias mecánicas fueron iguales o superiores a las de la mezcla control. Particularmente, la mezcla con un 15% de reemplazo alcanzó una resistencia a la compresión de 57,8 MPa a los 90 días, ligeramente superior a la mezcla control, de 57,4 MPa. Asimismo, la resistencia a la flexión también alcanzó su valor máximo con este mismo porcentaje, registrando 9,3 MPa. Los autores atribuyen estos resultados positivos al efecto de relleno de las partículas finas del relave y a su participación parcial en reacciones puzolánicas, generando productos de hidratación adicionales. Sin embargo, se observó que reemplazos superiores al 20% disminuyen las resistencias, lo que se asocia a la dilución del contenido cementante activo en la mezcla.

Este estudio concluyó que los relaves de cobre, cuando son adecuadamente molidos, pueden incorporarse como material cementante suplementario en proporciones de hasta el 15% logrando buenas prestaciones mecánicas a largo plazo.

2.6 Reemplazo de áridos

La incorporación de relaves mineros como remplazo del árido en morteros surge como una alternativa sostenible frente a la explotación de materiales naturales. A diferencia de aquellos relaves que requieren una activación mecánica, en este apartado se consideran relaves utilizados directamente, ya sea en su estado natural o transformados en agregados artificiales.

2.6.1 Caso 1

Use of Artificial fine aggregates from copper tailings in mortar: Mechanical Performance [36]**:**

El estudio tuvo como objetivo evaluar el comportamiento mecánico de morteros elaborados con agregado fino artificial (AFA), producido a partir de relaves de cobre mediante el proceso de aglomeración alcalina. Los relaves, provenientes de una faena minera ubicada en Calama, fueron tratados con una mezcla de ceniza volante y solución de hidróxido de sodio, lo que permitió generar un material con granulometría apta para reemplazar árido fino natural.

Se fabricaron morteros con reemplazos de árido natural por AFA del 15%, 30%, 45% y 60%, utilizando una relación agua/cemento de 0,5. Las mezclas fueron evaluadas a los 7 y 28 días de curado, según la norma ASTM C109 [37]. A los 7 días, los morteros con AFA mostraron mayores resistencias a compresión respecto a la mezcla control, especialmente en los niveles de reemplazo más bajos. Este comportamiento fue atribuido a una mejor compacidad de la mezcla y a la influencia residual del activador alcalino. Sin embargo, a los 28 días la ganancia de resistencia fue menos evidente, registrándose una disminución en los reemplazos superiores al 45%.

Adicionalmente, se observó una disminución progresiva en la densidad del mortero conforme aumentaba el porcentaje de AFA, lo cual fue relacionado con la menor densidad del agregado artificial en comparación con el árido natural.

En síntesis, el estudio demostró que es viable reemplazar hasta un 30% el árido fino natural por relaves de cobre aglomerados, logrando un mortero con buen desempeño mecánico y potencial candidato para aplicaciones sustentables.

2.6.2 Caso 2

Feasibility Evaluation of Replacing River Sand with Copper Tailings [38]:

Los autores realizaron un estudio orientado a determinar la viabilidad técnica y ambiental de utilizar relaves de cobre como reemplazo parcial del árido fino natural en morteros. Para ello, se emplearon relaves procedentes de una planta de procesamiento en China, caracterizados por un tamaño medio de partícula (D50) de 110 μm, alta porosidad y un contenido importante de óxidos metálicos como SiO_2, CaO y Fe_2O_3.

Se prepararon mezclas de mortero con reemplazos de arena natural en proporciones del 0%, 10%, 20%, 30% y 40%, manteniendo una relación agua/cemento 0,55. Las probetas cúbicas de 5 cm fueron curadas a 7, 28 y 90 días, y se evaluaron las resistencias a compresión, la retracción por secado (según ASTM C596) y la resistencia al ataque por sulfatos.

Los resultados mostraron que, para niveles de reemplazo de hasta el 40%, se obtuvo una mejora de hasta un 14% en la resistencia a compresión en comparación a la muestra control. Este incremento fue atribuido al efecto de relleno que ejercen las partículas de relave, las cuales densificaron la estructura interna del mortero. No obstante, se observó un aumento en la reducción por secado para reemplazos superiores al 20%, asociado a una mayor porosidad del relave. En cuanto a la durabilidad, las mezclas con más de 20% de relave presentaron un mejor comportamiento frente al ataque por sulfatos.

En conclusión, este estudio respaldó la viabilidad de utilizar hasta el 40% de relaves de cobre como reemplazo de árido fino natural, obteniendo morteros con buen desempeño mecánico, durabilidad y beneficios ambientales para la reutilización de relaves mineros.

2.7 Actividad puzolánica

La actividad puzolánica es una propiedad esencial que permite evaluar la capacidad de ciertos materiales, como los relaves mineros, de reaccionar con el hidróxido de calcio ($Ca(OH)_2$) liberado durante la hidratación del cemento, generando productos cementantes adicionales como el gel de silicato cálcico hidratado (C-S-H). Esta reacción secundaria mejora la compactación de la matriz, incrementa la resistencia mecánica y favorece la durabilidad de las mezclas.

En el trabajo desarrollado por Hernández-Ramos et al. [39], se analizaron relaves mineros provenientes de la extracción de oro y plata, los cuales fueron sometidos a tratamientos de activación mediante un molino planetario por hasta 140 minutos y mediante calcinación térmica de hasta 1000 °C. Los resultados mostraron que ambos métodos provocaron una reducción del tamaño de partícula y una disminución en la cristalinidad, incrementando así el contenido de la fase amorfa del material. El índice de actividad puzolánica (IAR), determinado de acuerdo con la norma ASTM C618 [40], alcanzó valores superiores al 75% en mezclas con un 20% de reemplazo de cemento por relave, lo que evidenció una reactividad adecuada. Además, los análisis realizados mediante termogravimetría (TGA) y difracción de rayos X (DRX) confirmaron una disminución de portlandita, junto con la presencia de productos de hidratación.

Asimismo, el estudio de Yao et al. [41] examinó la reactividad de feldespatos activados mecánicamente a través de molienda. Se observó que al reducir significativamente el tamaño de partícula y aumentar el área superficial específica del material, también se incrementó la velocidad de disolución en medios alcalinos y el índice de actividad puzolánica. Este último superó el 65% tras 20 minutos de molienda, lo cual se considera aceptable según la normativa técnica china. Los ensayos de TGA y DRX evidenciaron la generación de geles C-(A)-S-H y una disminución progresiva del contenido de Ca $(OH)_2$, validando la existencia de reacción puzolánica.

En conjunto, ambos estudios evidencian que la actividad puzolánica puede ser significativamente mejorada mediante procesos térmicos, mecánicos por molienda o su combinación. Estas técnicas inducen transformaciones físicas y estructurales en el material, incrementando su capacidad de reacción con el hidróxido de calcio en sistemas de mortero o concreto.

2.8 Índice de Actividad Puzolánica

El índice de actividad puzolánica (IAR) es un parámetro cuantitativo que permite evaluar la capacidad de un material cementante suplementario para contribuir al desarrollo de resistencia mecánica, a partir de su reacción con el hidróxido de calcio generado durante la hidratación del cemento. A diferencia de los métodos termoquímicos o mineralógicos, el IAR se basa en el desempeño mecánico de mezclas con adiciones puzolánicas frente a una mezcla

control sin reemplazo, en condiciones estandarizadas de curado y dosificación. Este valor se obtiene mediante ensayos de compresión, y se expresa como la relación porcentual entre la resistencia a compresión de la mezcla con el material evaluado y la resistencia de la mezcla control, ambas medidas generalmente a los 28 días de curado [42]:

$$IAR = (\frac{A}{B}) * 100 \quad (1)$$

Donde:

- **IAR:** índice de actividad puzolánica.
- **A:** promedio de la resistencia a la compresión de los morteros de ensayo (puzolana y cemento) MPa.
- **B:** promedio de la resistencia a la compresión de los morteros patrón o control (100% cemento Portland) MPa.

Según lo establecido por la norma ASTM C618 [40], se considera que un material posee actividad puzolánica adecuada cuando el índice alcanza al menos un 75% respecto a la mezcla control. Aunque el valor típico se determina a los 28 días, estudios recientes han demostrado que es posible evaluarlo también a edades tempranas, como los 7 días, para analizar la evolución de la reactividad. Por ejemplo, Diaz-Rosero et al. [43] determinaron el índice de actividad puzolánica por resistencia (IAR) de una escoria de cobre secundaria, obteniendo un valor de 67,37% a los 7 días y 78,56% a los 28 días de curado, lo que confirma su potencial como adición cementante.

Cabe destacar que esta metodología se aplica únicamente a materiales utilizados como reemplazo del cemento, ya que implica una evaluación de su comportamiento químico. En el caso del reemplazo de áridos, el análisis se basa principalmente en efectos físicos y mecánicos, por lo que el índice de actividad puzolánica no resulta aplicable [43]. Esta herramienta resulta especialmente útil para caracterizar materiales no convencionales como relaves mineros, cenizas volantes, escorias molidas u otras adiciones minerales, cuyo comportamiento en mezclas cementantes puede variar en función de su composición, niveles de activación y condiciones de curado. El uso del índice de actividad puzolánica permite cuantificar dicha contribución y comparar objetivamente el desempeño de distintos materiales respecto a una mezcla de referencia.

Capítulo 3: Materiales

En este capítulo se describen los materiales utilizados para la elaboración de los morteros evaluados en el presente estudio, en función de sus principales características físicas, químicas y normativas.

3.1 Cemento

El cemento utilizado para la fabricación de los morteros fue el Cemento Bio-Bio Especial, que corresponde a un cemento de tipo puzolánico, el cual es obtenido a partir de la molienda conjunta de clínker, puzolana y yeso. Este cemento cumple con los requisitos de la norma chilena NCh148 [19], correspondiente a cementos de tipo corriente, clase puzolánica.

Entre sus propiedades más destacadas se encuentra su resistencia a ambientes agresivos, como medios sulfatados o marinos, su bajo calor de hidratación y la inhibición de la reacción álcalis/árido, lo que lo hace adecuado para obras de alta durabilidad. Además, presenta buena trabajabilidad y competitividad con aditivos de última generación, siendo adecuado para morteros de pega, estucos y aplicaciones estructurales [44].

Para completar su caracterización, se realizó un análisis granulométrico por tamizado en seco, cuyos resultados se resumen en la Tabla 6 y se presenta gráficamente en el Anexo 9.1, donde se observa que el cemento corresponde a un material de granulometría muy fina.

Tabla 6. Distribución granulométrica del cemento

Malla	Abertura [mm]	Pasante [%]
N° 30	0,600	100,00
N° 50	0,300	98,95
N° 100	0,150	89,17

3.2 Relave

El relave de cobre utilizado proviene de un yacimiento de tipo pórfido cuprífero. Este material fue previamente secado y clasificado para su uso en la elaboración de morteros, siendo sometido a procesos de molienda en seco.

El análisis granulométrico del relave obtenido mediante tamizaje seco se resume en la Tabla 7 y se representa gráficamente en el Anexo 9.1.

Tabla 7. Distribución granulométrica del relave

Malla	Abertura [mm]	Pasante [%]
N° 10	2,00	100,00
N° 20	0,85	99,84
N° 30	0,60	96,76
N° 50	0,30	78,29
N° 100	0,15	17,09

3.3 Arena

El árido fino utilizado en la elaboración de morteros cumple con lo establecido por la norma NCh163 [45], que regula los requisitos que deben cumplir los áridos destinados para morteros. Se realizó un análisis granulométrico por tamizado, donde previamente la arena fue secada con el fin de asegurar la confiabilidad del procesamiento. Los resultados del ensayo se detallan en la Tabla 8, y su representación gráfica se muestra en el Anexo 9.1.

Tabla 8. Distribución granulométrica de la arena

Malla	Abertura [mm]	Pasante [%]
N° 10	2,000	100,00
N° 20	0,850	99,46
N° 30	0,600	92,71
N° 50	0,300	10,90
N° 100	0,150	1,80

Los resultados granulométricos de los materiales principales se comparan en la Figura 2. Se observa que el cemento presenta una granulometría significativamente más fina, el relave muestra una distribución intermedia, y el árido fino contiene una mayor proporción partículas gruesas.

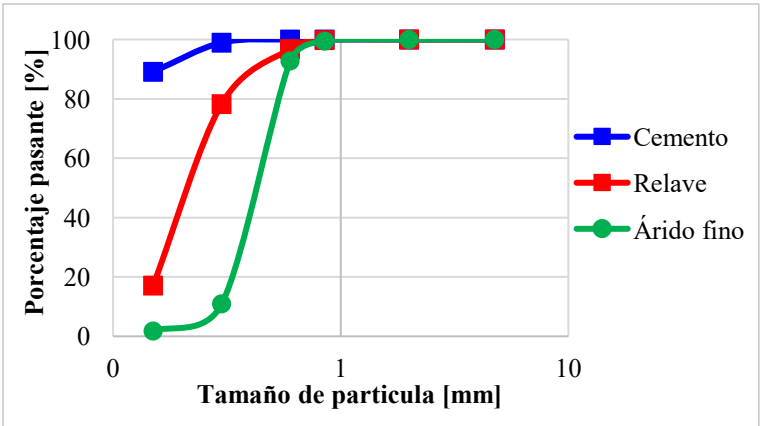


Figura 2. Comparación de curvas granulométricas del cemento, relave y árido fino

3.4 Agua

El agua utilizada en la elaboración de los morteros corresponde a agua potable de la ciudad de Concepción, cumpliendo los requisitos establecidos por la norma NCh 1498 [46], la cual regula la calidad del agua para mezclas de mortero y hormigón. Asimismo, en el proceso experimental se trabajó con una temperatura controlada de alrededor de 23 °C.

3.5 Cal

En algunas mezclas se incorporó cal viva (óxido de calcio, CaO) como adición complementaria al cemento, debido a su capacidad para mejorar la trabajabilidad de la mezcla y su potencial de reacción con compuestos silicatados presentes en el sistema. Para su incorporación, la cal fue hidratada previamente y mezclada con una parte del relave, dejándose en reposo durante 24 horas. Posteriormente, esta mezcla fue integrada junto con el resto de los materiales, asegurando una adecuada distribución del hidróxido de calcio ($Ca(OH)_2$) dentro del mortero.

3.6 Fibra Sintética

En determinadas mezclas se incorporó fibra sintética de polipropileno, correspondiente al producto SikaFiber® P-6, con el objetivo de mejorar la cohesión del mortero. Esta fibra posee una longitud nominal de 6 mm y se dispersa aleatoriamente en la mezcla, formando una red tridimensional que actúa como refuerzo secundario dentro de la matriz cementante.

La adición de estas fibras no genera cambios significativos en la trabajabilidad ni en los tiempos de fraguado, aunque puede contribuir al mejoramiento de ciertas propiedades mecánicas como la resistencia al impacto o a la fisuración temprana [47].

Este producto cumple con los requerimientos de la norma ASTM C1116 [48] y su aplicación se realizó conforme a la norma UNE-EN 14488-7 [49], que establece el procedimiento de ensayo para fibras destinadas al refuerzo en materiales cementantes.

Capítulo 4: Metodología experimental

Este capítulo detalla la metodología aplicada en el desarrollo del estudio, estructurada en función de las distintas etapas del procedimiento experimental. Se describen las fases asociadas a las dosificaciones de las mezclas, su activación mediante la molienda en molino de bolas, la caracterización del relave y del árido fino, la preparación de las probetas y la ejecución de los ensayos de resistencia, todo ello conforme a las normas aplicadas.

4.1 Dosificación

Para evaluar la influencia del reemplazo de cemento y árido por relave en las propiedades mecánicas del mortero, el estudio se dividió en dos etapas: una preliminar, con rangos amplios de reemplazo, y una complementaria, enfocada en combinaciones optimizadas. En ambos casos, se utilizó como mezcla control un mortero convencional elaborado únicamente con cemento, árido fino y agua (sin relave), cuya nomenclatura y relación agua/cemento (A/C) se presenta en la Figura 3.

Figura 3. Nomenclatura utilizada para las mezclas control

4.1.1 Reemplazo de cemento

4.1.1.1 Etapa preliminar:

Durante esta etapa, se reemplazó parcialmente el cemento por relave fino (<150 µm), previamente separado y, en ciertos casos, molido. Se evaluaron proporciones del 10 %, 20 %, 30 % y 40 %, empleando relave de un yacimiento tipo pórfido cuprífero. El objetivo fue analizar el efecto del contenido de relave y del tiempo de molienda sobre las propiedades mecánicas del mortero.

Las muestras se identificaron según el porcentaje de reemplazo y el tiempo de molienda (SM, 15M, 1H, 4H, 8H), como se muestra en la Figura 4. Las dosificaciones correspondientes se detallan en el Anexo 9.2, Tabla A- 1.

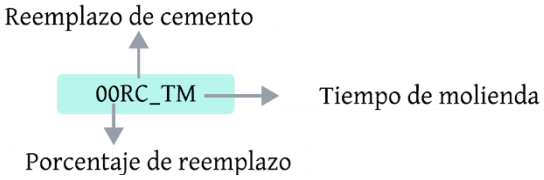


Figura 4. Nomenclatura utilizada para el reemplazo de cemento < 150 µm

4.1.1.2 Etapa complementaria: mezclas con adiciones y ajustes

Con base en los resultados obtenidos previamente, se identificaron nuevas mezclas enfocadas principalmente en los reemplazos de cemento del 10% y 20%, incorporando aditivos o modificaciones en la formulación para evaluar su impacto.

Mezclas con fibra sintética: Se elaboraron mezclas con reemplazo parcial de cemento (<150 µm) por relave fino en proporciones del 10 %, 20 %, 30 % y 40 %, incorporando fibra sintética como único componente adicional. Se mantuvieron las proporciones base de la etapa preliminar (Anexo 9.2,Tabla A- 1), ajustando la relación agua/cemento para conservar la trabajabilidad. La nomenclatura siguió la definida en la Figura 4, añadiendo la letra "F" al final del nombre para indicar la presencia de fibra, como se muestra en la Figura 5. Las dosificaciones completas se presentan en el Anexo 9.2, Tabla A- 2.

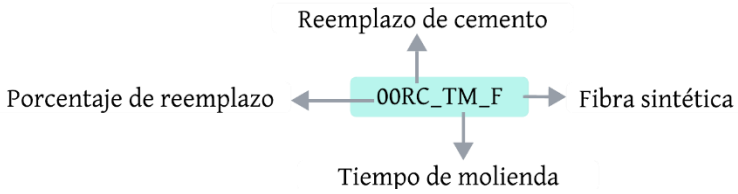


Figura 5. Nomenclatura utilizada para el reemplazo de cemento < 150 µm con fibra sintética

Mezclas con ajuste en la relación de agua/cemento: Se prepararon mezclas con 20 % de reemplazo de cemento (<150 µm) por relave fino, incrementando la relación agua/cemento de 0,63 a 0,70 para mejorar la trabajabilidad, manteniendo constante el resto de los materiales. Las mezclas se identificaron añadiendo la sigla "_TMA/C" y el valor correspondiente de la relación agua/cemento al final del nombre, como se muestra en la Figura 6. Las dosificaciones se detallan en el Anexo 9.2, Tabla A- 3.

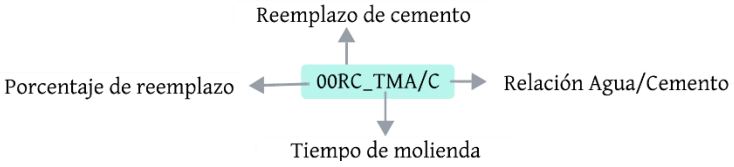


Figura 6. Nomenclatura utilizada para el reemplazo de cemento del 20 % < 150 µm con ajuste en la relación agua/cemento

Mezclas con incorporación de cal viva: Se diseñaron mezclas con 10 % de reemplazo de cemento (<150 µm) por relave fino, incorporando 5 g de cal viva (CaO) como adición complementaria. El objetivo fue evaluar su efecto sobre la trabajabilidad y el desempeño

mecánico, dada su capacidad para mejorar la cohesión e inducir reactividad puzolánica. Las mezclas se identificaron añadiendo la sigla "_C5" al final del nombre, como se muestra en la Figura 7. Las dosificaciones respectivas se encuentran en el Anexo 9.2, Tabla A- 4.

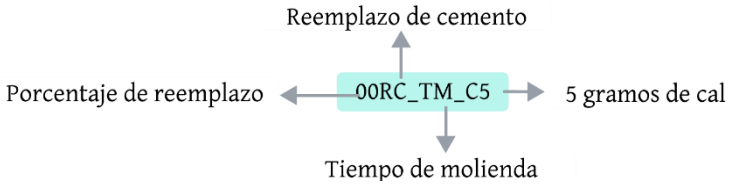


Figura 7. Nomenclatura utilizada para el reemplazo de cemento del 10 % < 150 µm con incorporación de cal viva

Variación del tipo de fracción del relave: Se elaboraron mezclas con un 20% de reemplazo de cemento, variando el tipo de fracción granulométrica del relave utilizado. En este caso, se consideraron tres tipos:

- **T:** relave total molido, sin tamizaje previo.
- **G:** relave grueso molido, compuesto por partículas mayores a 150 µm.
- **GF**: mezcla del relave grueso molido (> 150 µm) con relave fino (<150 µm), mezclados en partes iguales.

Todas las fracciones fueron sometidas a molienda durante 15 minutos y 1 hora, según las condiciones experimentales establecidas para esta etapa. La nomenclatura mantiene la estructura básica, incorporando al inicio la letra correspondiente al tipo de fracción, como se muestra en la Figura 8. Las dosificaciones respectivas están disponibles en el Anexo 9.2, Tabla A- 5.

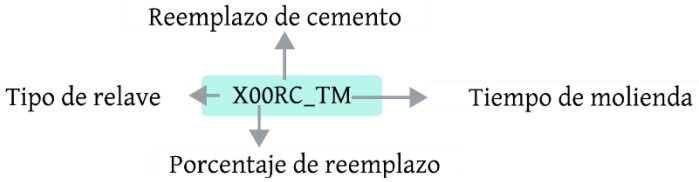


Figura 8. Nomenclatura utilizada para el reemplazo de cemento del 20 % según tipo de fracción del relave

4.1.2 Reemplazo de áridos

4.1.2.1 Etapa preliminar:

En esta etapa se evaluó el comportamiento del relave como reemplazo parcial del árido fino, utilizando su fracción gruesa (>150 µm). Se diseñaron mezclas con porcentajes de reemplazo

del 20 %, 35 %, 50 %, 65 %, 80 % y 100 %, cuyas dosificaciones se presentan en el Anexo 9.2, Tabla A- 6. Las muestras fueron identificadas mediante la sigla "RA", según la nomenclatura indicada en la Figura 9.

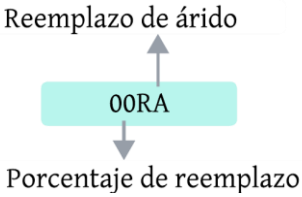


Figura 9. Nomenclatura utilizada para el reemplazo de árido > 150 µm

4.1.2.2 Etapa complementaria: ajuste en la relación de agua/cemento

A partir de los resultados de la etapa preliminar, se realizaron ajustes en la relación agua/cemento de las mezclas con 65 % de reemplazo de árido fino por relave grueso (>150 µm). Las nuevas proporciones evaluadas fueron 0,70 y 0,75, manteniéndose constante el contenido de cemento y utilizando como referencia la relación 0,63 de la etapa anterior. La nomenclatura incorpora explícitamente el valor de la relación A/C al final del nombre de cada mezcla, como se muestra en la Figura 10. Las dosificaciones se detallan en el Anexo 9.2, Tabla A- 7.

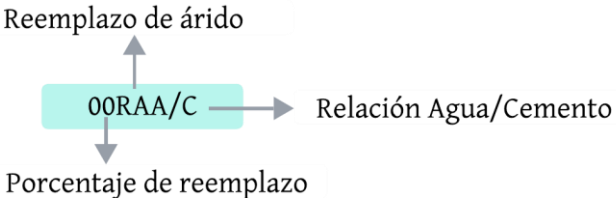


Figura 10. Nomenclatura utilizada para el reemplazo de árido > 150 µm con ajuste de relación agua/cemento

4.2 Molienda

El relave de cobre fue sometido a molienda en seco utilizando un molino de bolas tipo Marcy, con el fin de activar mecánicamente su reactividad. Para este procedimiento se procesó 1 kg de relave por cada ciclo, aplicando distintos tiempos de operación: 15 minutos, 1 hora, 4 horas y 8 horas. Antes de iniciar la molienda, el relave fue clasificado en dos fracciones granulométricas (como se ha venido mencionando): gruesa (> 150 µm) y fina (< 150 µm), para evaluar el comportamiento de cada una de las fracciones por separado frente a la molienda, y también en mezclas combinadas de las mismas.

Para la molienda se utilizó una carga balanceada de 87 bolas de acero con diámetros de 5/8”, 3/4", 7/8”, 1”, 1 ¼” y 1 ½”, que en conjunto sumaron un peso total de 7,070 kg. La Figura 11 muestra la distribución del número de bolas según su diámetro, para mayores detalles se puede consultar el Anexo 9.3.

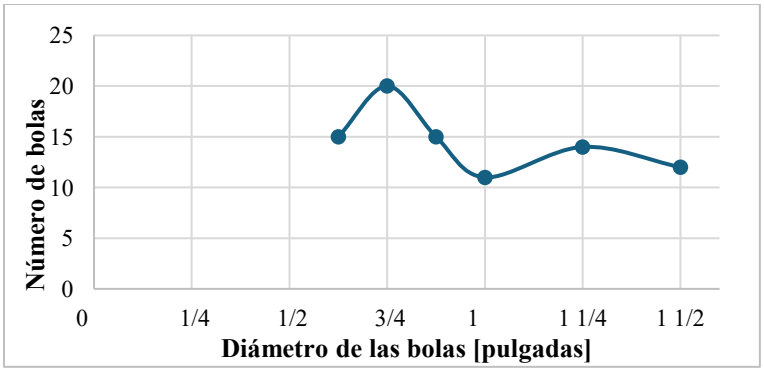


Figura 11. Curva de distribución del número de bolas según su diámetro en el Molino de Bolas tipo Marcy

El molino utilizado posee un volumen total de 5,4 litros, con dimensiones internas aproximadas de 17,5 cm de diámetro por 21 cm de largo, y fue operado a una velocidad constante de 80 revoluciones por minuto (R.P.M.) durante todas las series de molienda. Esta velocidad corresponde al 73 % de la velocidad crítica del equipo, lo que garantiza una molienda eficiente sin que se produzca centrifugación de la carga [50]. Para mayor detalle del cálculo, ver el Anexo 9.3.

4.3 Caracterización de materiales

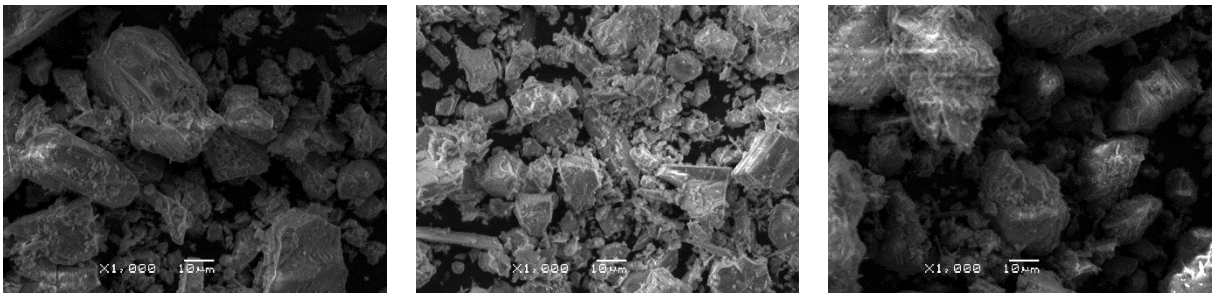
La caracterización de los materiales, en especial el relave de cobre y el árido fino, se realizó con el objetivo de comprender sus propiedades físicas y estructurales, fundamentales para evaluar su potencial como material cementante suplementario y como reemplazo parcial de árido fino. Para ello, se utilizaron distintas técnicas analíticas, las cuales se describen a continuación, junto con los resultados obtenidos antes de su utilización en la fabricación de morteros.

Microscopía Electrónica de Barrido (SEM): Se utilizó microscopía electrónica de barrido (SEM) para analizar la morfología del relave, enfocándose en los cambios producidos por la molienda en la forma, textura y angularidad de las partículas. Esta técnica permite identificar bordes agudos, fracturas y zonas amorfas asociadas a la activación mecánica [51]. El análisis

se aplicó tanto al relave sin tratamiento como a muestras molidas a distintos tiempos, con el objetivo de evaluar su comportamiento como material cementante fino.

En la Figura 12 se presentan las micrografías obtenidas mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) para tres condiciones del relave sin tratamiento previo: la muestra completa sin tamizar, la fracción fina (< 150 μm) y la fracción gruesa (>150 μm). En general, se observa una morfología angular e irregular, con partículas que presentan bordes definidos y superficies rugosas.

El relave completo (Figura 12, SEM a) muestra una combinación heterogénea de partículas con distintos tamaños y formas, lo que evidencia una amplia variabilidad granulométrica en el material original. En la fracción fina (Figura 12, SEM b) se distinguen partículas de menor tamaño, con bordes agudos y formas irregulares. Asimismo, se observa una mayor densidad superficial de partículas, lo que sugiere una mayor cohesión y contacto entre ellas, favoreciendo el empaquetamiento dentro de la matriz cementante. Por su parte, la fracción gruesa (Figura 12, SEM c) contiene partículas de mayor tamaño, con formas angulosas, bordes definidos y superficies fracturadas. Estas fracturas probablemente se originaron durante las etapas de conminución mecánica en el procesamiento del mineral en planta, o bien por características inherentes al depósito del relave.



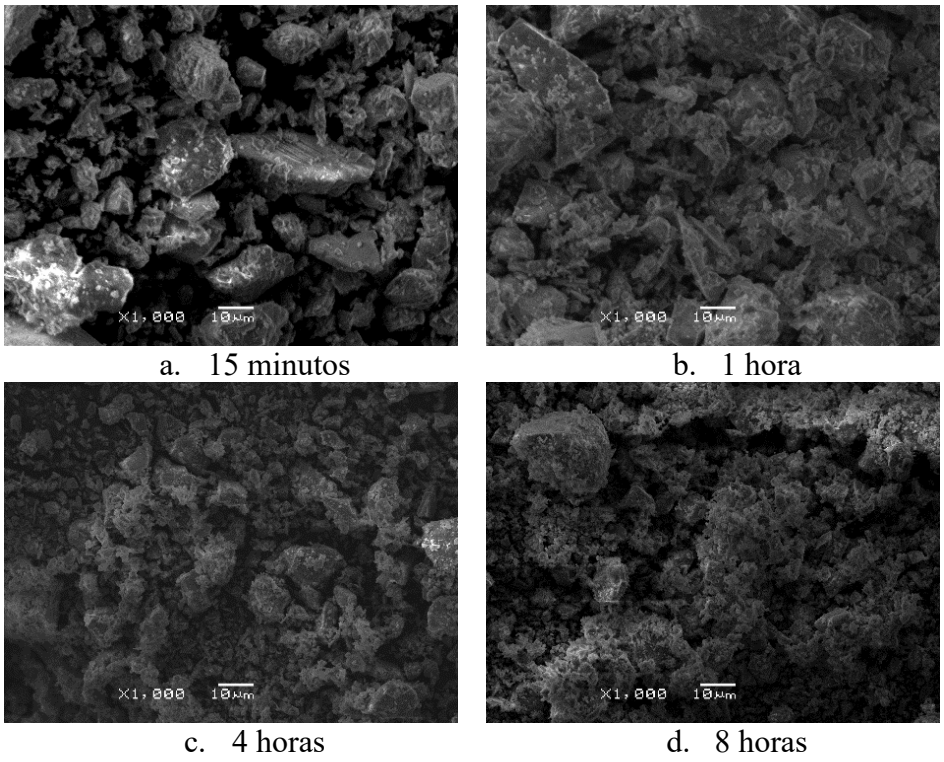
a. Relave completo b. Relave fino (<150 μm) c. Relave grueso (>150 μm)

Figura 12. Micrografía SEM para relave sin tratamiento previo

Por otro lado, la Figura 13 presenta las micrografías SEM correspondientes al relave fino (<150 μm) sometido a distintos tiempos de molienda. Las micrografías evidencian los cambios progresivos de la morfología de las partículas como resultado de la activación mecánica.

En la micrografía (Figura 13, SEM a), correspondiente a 15 minutos de molienda, las partículas conservan bordes bien definidos y superficies con poca alteración estructural, lo que indica una acción mecánica inicial leve. Al aumentar el tiempo de molienda a 1 hora (Figura 13, SEM b), se observa una mayor fragmentación, con presencia de bordes irregulares y una textura más rugosa. A las 4 horas de molienda (Figura 13, SEM c), las partículas presentan formas menos definidas, superficies erosionadas y mayor grado de desintegración, reflejando una intensificación de los mecanismos de impacto y fricción. Finalmente, tras 8 horas de molienda (Figura 13, SEM d), las partículas muestran un alto grado de pulverización, con bordes muy erosionados, pérdida de angularidad y una textura porosa, lo que puede estar asociado a la formación de zonas amorfas generadas por la intensa activación mecánica.

En el Anexo 9.4 se incluyen micrografías adicionales obtenidas con distintos niveles de aumento, lo que permite una observación más detallada de las estructuras superficiales.



a. 15 minutos b. 1 hora

c. 4 horas d. 8 horas

Figura 13. Micrografía SEM del relave fino molido a distintos tiempos

Difracción de Rayos X (DRX): Se empleó difracción de rayos X (DRX) para identificar y cuantificar las fases cristalinas presentes en el relave. Esta técnica, comúnmente utilizada en

el ámbito minero, permite detectar la composición mineralógica mediante el análisis de los patrones de difracción generados por la interacción de rayos X con la estructura interna del material. Además, fue útil para evaluar los posibles cambios estructurales inducidos por la molienda. En este estudio, el análisis DRX se aplicó para caracterizar tanto al relave como al árido fino. En el caso del relave, se analizaron muestras en su estado natural (sin tratamiento), como también aquellas sometidas a diferentes tiempo de molienda, con el fin de evaluar los efectos de la activación mecánica sobre la mineralogía del material y su posible influencia con la reactividad puzolánica. Para el árido fino, se aplicó DRX a la muestra original, identificando sus minerales dominantes.

En la Tabla 9 se presentan los resultados correspondientes al árido fino, donde se observó un predominio de las plagioclasas, seguido por piroxeno, cuarzo y, en menor proporción olivino, granate y hematita.

Tabla 9. Mineralogía de la arena por difracción de rayos X (%)

Minerales	Porcentaje [%]
Plagioclasas	64,9
Piroxeno	13,0
Cuarzo	11,8
Olivino	8,5
Granate	1,7
Hematita	0,1
Total	**100**

Respecto al análisis mineralógico mediante difracción de rayos X (DRX), la Tabla 10 presenta la proporción de cada mineral identificado en función del tiempo de molienda aplicado. Uno de los minerales más relevantes es la moscovita, dada su potencial reactividad frente a la activación mecánica. Este mineral se encuentra en una proporción cercana al 10% en el relave completo, lo que evidencia una presencia significativa. No obstante, al separar las fracciones por tamaño, se observa una disminución abrupta cerca de un 2% en la fracción fina (<150 μm), lo que indica que la moscovita se concentra preferentemente en la fracción gruesa (>150 μm). Este comportamiento coincide con lo reportado por Zhang et al. [33], quienes demostraron que la molienda prolongada genera una notable disminución de la cristalinidad de la moscovita y favorece la formación de productos cementantes como geles C-S-H, lo que refuerza su papel como mineral con potencial puzolánico.

Además de la moscovita, minerales como la labradorita, la oligoclasa y el cuarzo muestran una disminución en su contenido al aumentar los tiempos de molienda. Por su parte, el diópsido y la calcita presentan una variación irregular. Este análisis evidencia que la activación mecánica del relave afecta tanto la morfología superficial como la estructura interna y mineralógica del material, lo cual incide directamente en su potencial reactividad como material cementante suplementario. Los difractogramas obtenidos por DRX se encuentran el en Anexo 9.5, donde se observa la evolución de los máximos de difracción y la disminución progresiva de fases cristalinas asociadas a la activación mecánica.

Tabla 10. Mineralogía de los relaves utilizados para las mezclas de los morteros

Minerales	Relave completo [%]	Relave fino sin moler (< 150 μm) [%]	Relave de 15 minutos con molienda [%]	Relave de 1 hora con molienda [%]	Relave de 4 horas con molienda [%]	Relave de 8 horas con molienda [%]
Actinolita	4,3	5,24	2,65	3,37	5,31	4,19
Bornita	1,89	0,56	0,18	0,85	0,93	0,66
Clorita	2,08	1,51	2,99	1,16	0,44	1,12
Calcita	0,86	2,08	5,33	6,49	6,91	3,28
Calcopirita	0,47	1,37	0,44	0,46	0,38	0,54
Cuprita	0,42	0,03	0,20	0,19	0,41	0,29
Diópsido	1,59	8,68	10,69	10,81	11,62	8,05
Yeso	1,59	2,17	0,89	2,36	2,47	1,61
Caolinita	4,18	10,75	7,65	15,90	8,31	8,91
Moscovita	10,32	2,02	0,74	0,26	0,36	0,58
Piroxeno	3,33	2,91	1,94	3,15	3,27	1,42
Labradorita	37,41	5,83	6,70	9,47	8,53	8,33
Oligoclasa (anortita)	7,21	9,21	26,50	9,42	14,75	11,78
Albita	1,43	6,87	0,97	5,16	6,10	1,56
Pirita	0,71	0,43	0,57	0,66	0.64	0,62
Cuarzo	12,84	13,30	15,87	12,02	14,75	11,78
Titanita	5,87	2,93	2,62	4,49	2,17	3,69
Vermiculita	3,09	3,68	5,65	5,09	5,94	4,13
Total	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**	**100**

Distribución de tamaño de partícula mediante difracción láser: Con el objetivo de analizar la evolución del tamaño de partícula tras la molienda, se utilizó la técnica de difracción láser mediante un equipo PSA 990 LD. Este método permite determinar con alta

precisión la distribución y el rango de tamaños en materiales finos, a partir de los patrones de dispersión generados por un haz láser al atravesar una suspensión de partículas sólidas [52]. Esta técnica permitió obtener los diámetros efectivos (D10, D30, D50, D60 y D80), así como los coeficientes de uniformidad (C_u) y curvatura (C_c), permitiendo evaluar comparativamente el efecto del tratamiento mecánico sobre la distribución de tamaños.

Para facilitar la lectura de los resultados en las Figuras 14, 15 y 16, se empleó una nomenclatura abreviada que identifica las condiciones de tratamiento del relave. La sigla "SM" corresponde al relave sin molienda, mientras que "15M", "1H", "4H" y "8H" indican relaves molidos durante 15 minutos, 1, 4 y 8 horas, respectivamente. Las condiciones "Grueso_15M" y "Grueso_1H" refieren a la fracción gruesa del relave (> 150 µm) molida por 15 minutos y 1 hora, y las siglas "Total_15M" y "Total_1H" indican el relave total (sin clasificación granulométrica) molido por los mismos intervalos. Finalmente, "GF_15M" y "GF_1H" representan una mezcla de relave grueso molido (> 150 µm) y fino (< 150 µm), combinados en proporciones iguales.

La Figura 14 presenta la evolución de los diámetros efectivos para los diferentes tipos de relaves utilizados. Se observa que el tamaño medio de partícula (D50) disminuye progresivamente a medida que aumenta el tiempo de molienda, pasando de 42,90 µm en el relave sin molienda a 6,92 µm tras 8 horas de molienda. Esta disminución es más pronunciada durante los primeros 15 minutos y 1 hora, estabilizándose posteriormente, lo que refleja una reducción significativa del tamaño como efecto de la activación mecánica mediante molienda.

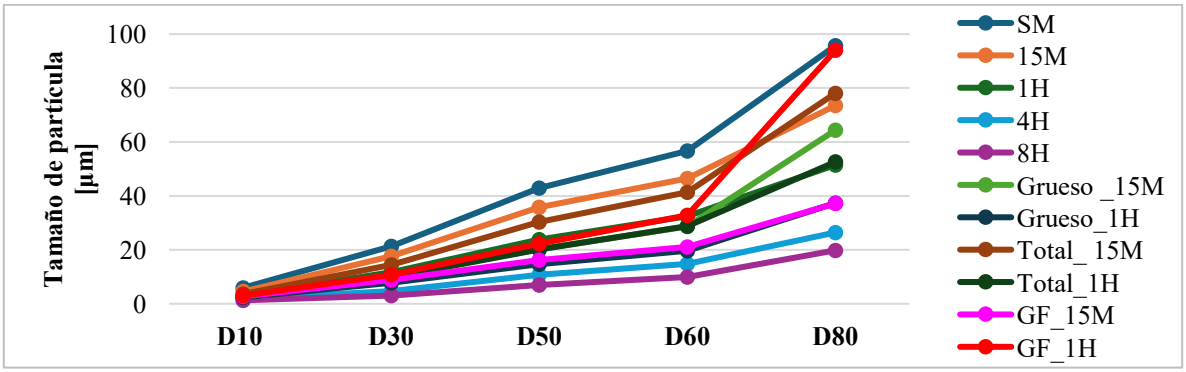


Figura 14. Diámetros efectivos para distintos tipos de relaves

La Figura 15 muestra la distribución de tamaño de partícula obtenida por difracción láser, expresada en función del porcentaje en volumen para cada clase de tamaño. Se observa que, a medida que aumenta el tiempo de molienda, las curvas tienden a desplazarse hacia la izquierda, lo que refleja una reducción progresiva en el tamaño de partícula. En particular, las muestras molidas por 4 y 8 horas presentan máximos definidos en la fracción inferior a 10 µm, donde se identifica la presencia de al menos tres familias de tamaños de partículas predominantes: una en la zona submicrométrica (< 1 µm), otra alrededor de las 10 µm, y una tercera entre los 50 y 100 µm. En contraste, las fracciones gruesas y totales presentan curvas más amplias y heterogéneas, lo que evidencia una mayor diversidad en la distribución granulométrica. Por su parte, las curvas correspondientes las fracciones combinadas (GF) presentan una distribución más continua y extendida, resultado de la mezcla entre partículas finas y gruesas previamente molidas.

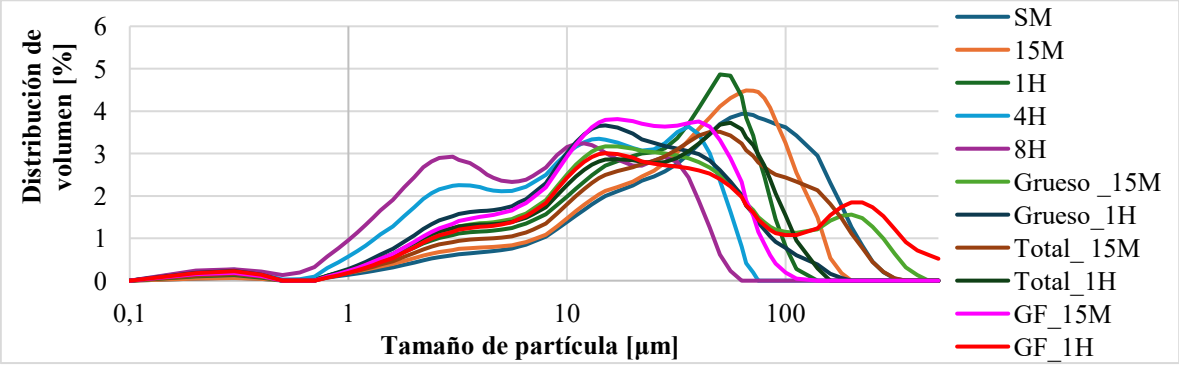


Figura 15. Distribución de tamaño de partícula por difracción láser

Por otro lado, la Figura 16 presenta los valores de los coeficientes C_u y C_c. En general, todos los relaves evaluados cumplen con los criterios referenciales de la norma ASTM D2487 [53], la cual considera que un material es bien graduado si $C_u \geq 4$ y C_c se encuentra entre 1 y 3. Aunque esta norma está dirigida a suelos, su aplicación orientativa resulta útil para comparar la calidad granulométrica de materiales finos como los relaves.

Se aprecia que las muestras combinadas (GF) presentan coeficientes consistentes con distribución más continua, mientras que las muestras molidas por 4 y 8 horas exhiben valores más bajos de C_u, asociados a distribuciones más uniformes. Los valores completos de diámetros y coeficientes se presentan en el Anexo 9.6, Tabla A- 9.

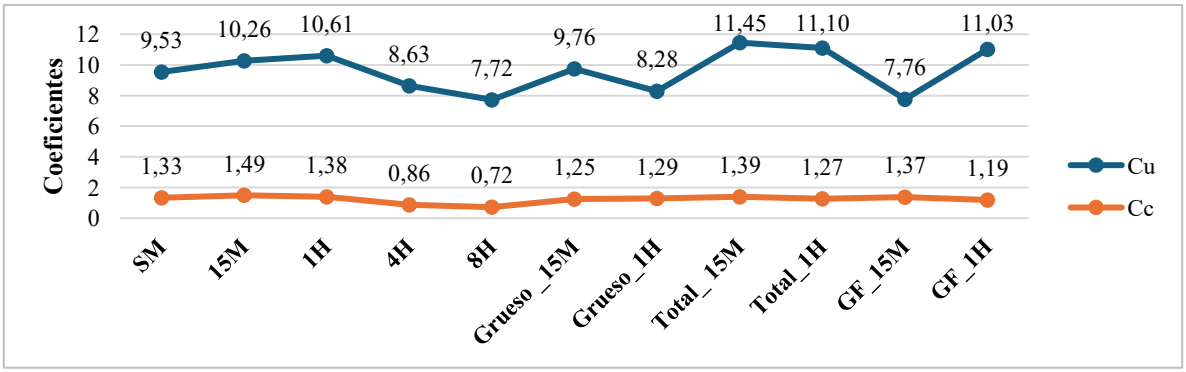


Figura 16. Coeficientes granulométricos según tipo de relave activado

En el caso de las mezclas con reemplazo de árido por relave, la Figura 17 muestra la evolución de los diámetros efectivos según el porcentaje de reemplazo de árido por relave grueso (> 150 µm). Se observa un aumento progresivo de los valores de D10, D30, D50, D60 y D80 a medida que incrementa el porcentaje de reemplazo, reflejando una mayor presencia de partículas gruesas en la mezcla total. En particular, las mezclas con 50%, 65%, 85% y 100% de reemplazo destacan por presentar una curva continua y progresiva en todos los diámetros efectivos, lo que indica una distribución de partículas más homogénea que en las demás mezclas, las cuales muestran variaciones más marcadas en los diámetros iniciales.

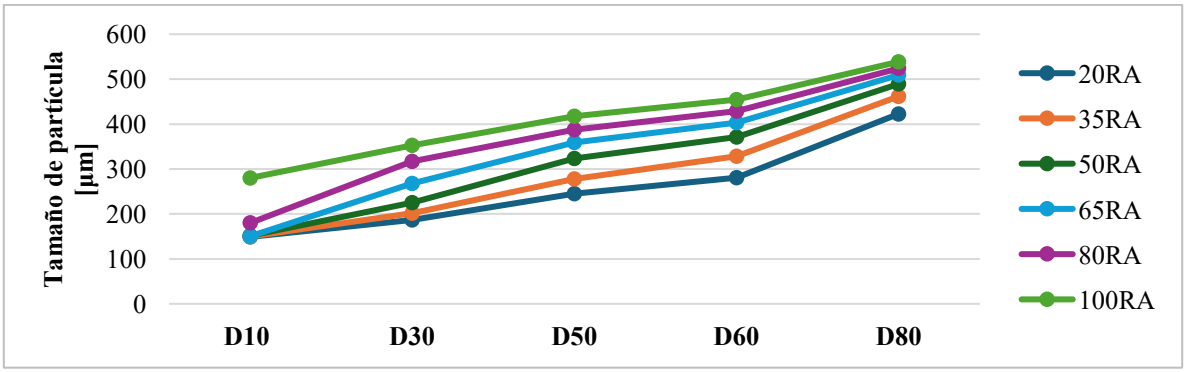


Figura 17. Diámetros efectivos para las mezclas de reemplazo de áridos por relave

La Figura 18 presenta los valores de los coeficientes de uniformidad (C_u) y de curvatura (C_c) para las mezclas con reemplazo de árido por relave. Se observa una tendencia ascendente en ambos coeficientes hasta el 65% de reemplazo, lo que indica una mejor distribución de tamaños de partícula en ese rango. En particular, la mezcla "65RA" alcanza valores elevados de C_u y C_c, lo que sugiere una gradación más equilibrada. A partir del 80% y 100% de reemplazo ambos coeficientes disminuyen, reflejando una distribución menos favorable. Aunque los valores no cumplen con los criterios establecidos por la norma ASTM D2487

[53], la evolución observada permite identificar dosificaciones con mayor uniformidad y mejor distribución granulométrica, especialmente en los reemplazos del 65% y 80%. Los valores completos de diámetros y coeficientes se presentan en el Anexo 9.6, Tabla A- 10.

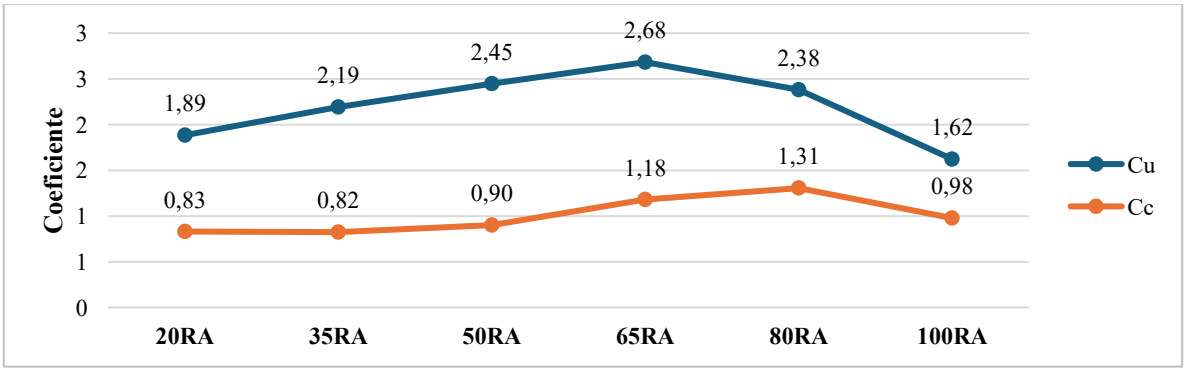


Figura 18. Coeficientes granulométricos para mezclas con reemplazo de árido por relave

4.4 Preparación de las probetas

La preparación de las probetas se efectuó conforme a la norma NCh 158 [54], que regula la confección de morteros para ensayos de laboratorio. Los materiales de cada dosificación fueron pesados individualmente en balanza digital, según las proporciones previamente definidas.

El mezclado se realizó en una batidora eléctrica de eje vertical, aplicando el procedimiento y tiempos indicados en la norma NCh 158 [56]. Luego, se evaluó la trabajabilidad mediante el ensayo del Cono de Abrams (Flow Table Test), conforme a la norma ASTM C1437 [55]. Alcanzada la consistencia deseada, el mortero se vertió en moldes prismáticos de 40 × 40 × 160 mm, colocados sobre una mesa de compactación. Se distribuyó en dos capas, cada una compactada mediante golpes estándar y vibración mecánica durante 7 a 10 segundos, con el fin de eliminar burbujas de aire y mejorar la densificación.

Finalmente, se alisó la superficie del molde utilizando una regla metálica. Las probetas fueron colocadas sobre una mesa rígida y cubiertas con lámina plástica, evitando así la pérdida de humedad durante el fraguado inicial. Este proceso se extendió por 24 horas, tras lo cual las probetas fueron desmoldadas, pesadas y medidas. A continuación, se procedió al curado por inmersión, siguiendo las especificaciones de la norma NCh 1017 [56], con periodos de 28 y 56 días.

Finalizando el curado, las muestras fueron retiradas, secadas y nuevamente pesadas, según lo indicado en la norma ASTM C642 [57]. El procedimiento completo, junto con imágenes de los equipos y las etapas del proceso, se presenta en el Anexo 9.7.

4.5 Ensayos de resistencia

Una vez completados los periodos de curado por inmersión, las probetas se secaron superficialmente para ser sometidas a los ensayos de resistencia a la flexión y compresión, los cuales fueron realizados conforme a lo establecido por las normas ASTM C78/C78M [58] y NCh 158 [54], respectivamente.

El ensayo de flexión fue efectuado mediante el método de carga en tres puntos, utilizando la máquina INSTRON modelo 8801, diseñada para aplicaciones de precisión en materiales cementantes. Este procedimiento permite evaluar la capacidad del mortero para resistir esfuerzos de tracción indirecta. La Figura 19 (a) ilustra la ejecución de este ensayo sobre una probeta. Posteriormente, las mitades resultantes de la ruptura por flexión fueron sometidas al ensayo de compresión, empleando una prensa hidráulica MATEST modelo C088-11N. Las probetas fueron colocadas con las superficies de rotura orientadas hacia las placas de carga, y se aplicó una fuerza axial constante hasta alcanzar la falla, siguiendo lo indicado en la norma NCh 158. La Figura 19 (b) muestra este procedimiento del ensayo de compresión.

Para cada mezcla se utilizaron al menos tres probetas, y los resultados se expresaron en megapascales (MPa). Imágenes de los equipos y procedimientos aplicados se presentan en el Anexo 9.8.

a. b.

Figura 19. Aplicación de ensayos de resistencia mecánica sobre morteros (a) Ensayo de flexión con máquina INSTRON 8801; (b) Ensayo de compresión con prensa MATEST C088-11N

Capítulo 5: Resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos del análisis de trabajabilidad, densidad y resistencia mecánica en morteros con reemplazo parcial de cemento y árido por relave minero, conforme a las dosificaciones y condiciones experimentales descritas en el Capítulo 4. El desempeño de las mezclas se evaluó a los 28 y 56 días de curado. En el caso de la resistencia a compresión, se incluye también el cálculo del índice de actividad puzolánica (IAR), con el objetivo de cuantificar la contribución del relave como material cementante suplementario.

5.1 Trabajabilidad del mortero

La trabajabilidad se evaluó mediante el ensayo de cono de Abrams, conforme a la norma ASTM C1437 [55], considerando los distintos tipos de reemplazo y condiciones de activación mecánica. Los resultados se presentan según la etapa experimental (preliminar o complementaria), y los valores específicos se detallan en el Anexo 9.9.

5.2.1 Etapa preliminar

En la Figura 20, correspondiente al reemplazo de cemento por relave fino (< 150 µm), se observa que la fluidez varía según el porcentaje de reemplazo y el tiempo de molienda, sin seguir una tendencia clara. No obstante, para mayores tiempos de activación mecánica se registra un incremento en la fluidez, especialmente en los reemplazos del 40%.

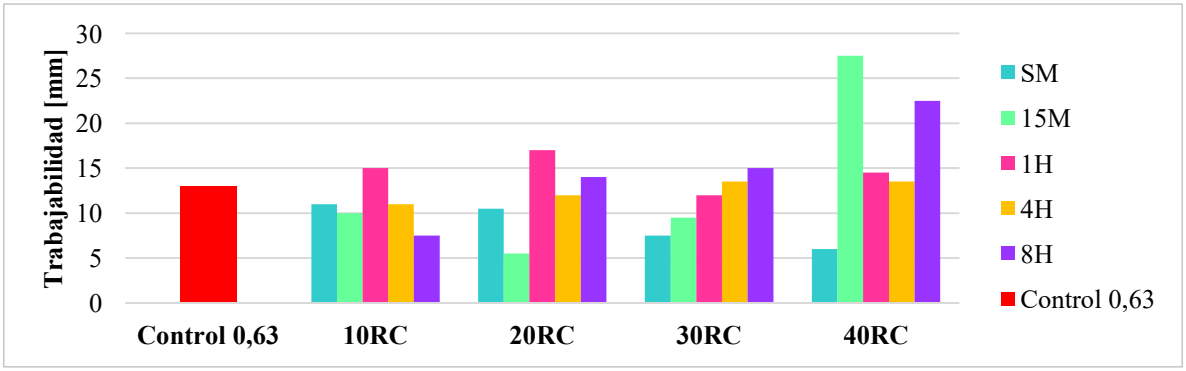


Figura 20. Resultados de la trabajabilidad para el reemplazo de cemento < 150 µm

En Figura 21, que muestra el comportamiento para el reemplazo de árido fino por relave grueso (> 150 µm), se evidencia una disminución progresiva de la fluidez al aumentar el porcentaje de reemplazo de árido.

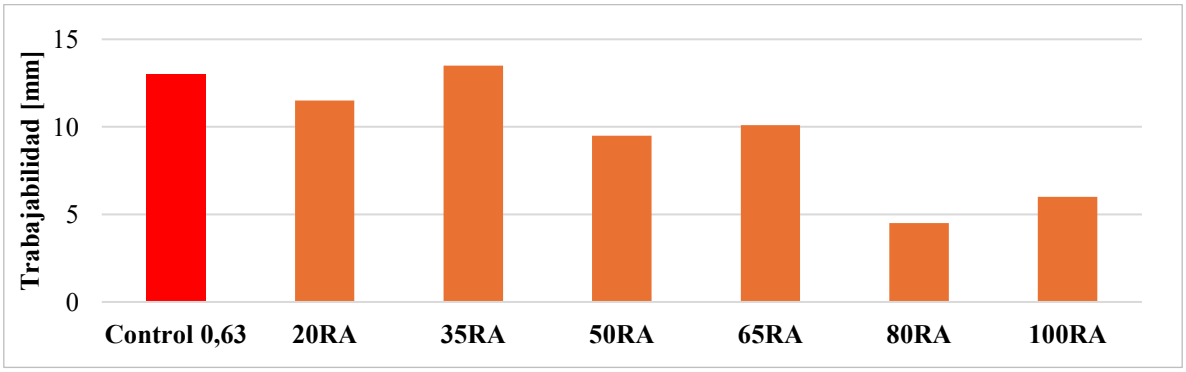


Figura 21. Resultados de la trabajabilidad para el reemplazo de árido > 150 µm

5.2.2 Etapa complementaria

La Figura 22 presenta el efecto de incorporar fibra sintética en mezclas con reemplazo de cemento por relave fino (< 150 µm). Se aprecia una mejora significativa de la fluidez respecto a las mezclas preliminares sin fibras (Figura 20), lo que se evidencia al comparar los resultados de trabajabilidad con las correspondientes muestras de control.

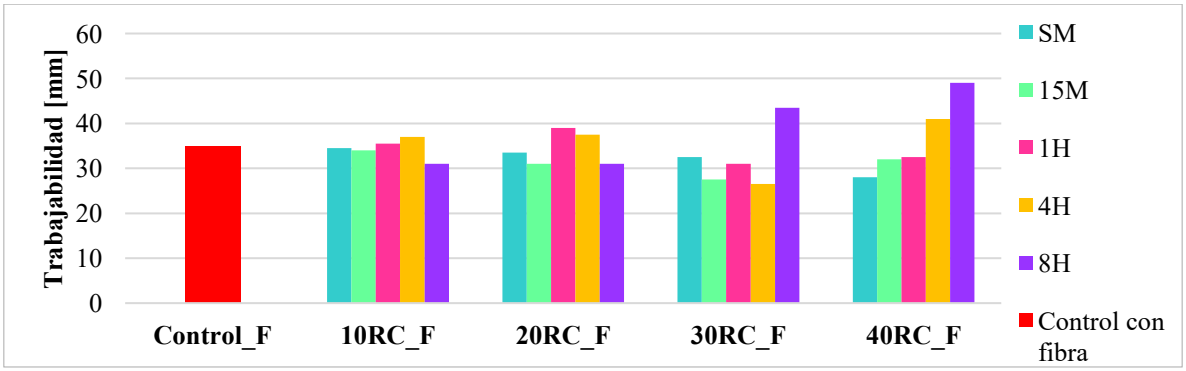


Figura 22. Resultados de la trabajabilidad para el reemplazo de cemento < 150 µm con fibra sintética

En la Figura 23, se muestran los resultados de la trabajabilidad de las mezclas con un 20% de reemplazo de cemento por relave fino (< 150 µm), ajustando la relación agua/cemento (A/C). Se comparan los resultados frente a dos mezclas control: una con A/C = 0,63 (valor preliminar) y otra con A/C = 0,70, que representa la condición ajustada. Se observa que el aumento en el contenido de agua mejora considerablemente la fluidez, alcanzando e incluso superando los valores de trabajabilidad de las mezclas control. Esta mejora es particularmente significativa en los relaves molidos durante 4 y 8 horas, cuyos valores superan los 35 mm.

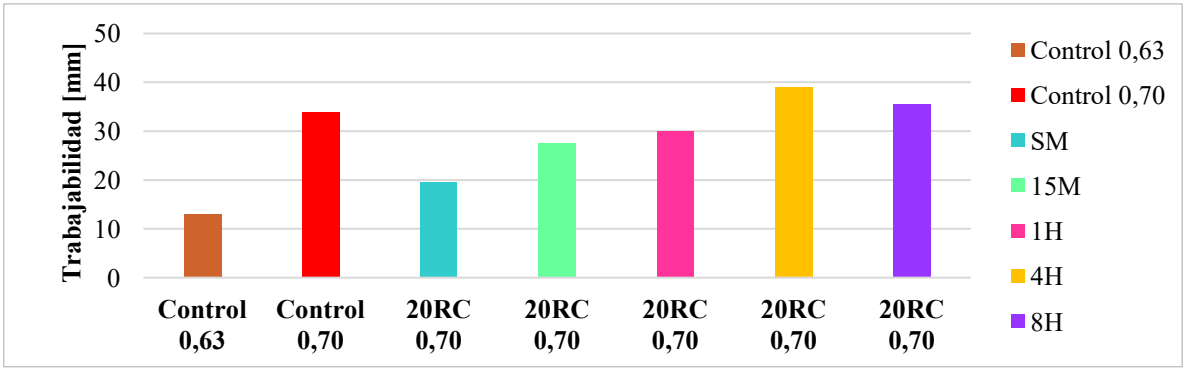


Figura 23. Resultados de la trabajabilidad para el reemplazo de cemento del 20 % < 150 µm con ajuste en la relación agua/cemento

Por otra parte, la Figura 24 evidencia los efectos de incorporar cal viva en mezclas del 10% de reemplazo de cemento por relave fino (< 150 µm). En general, se observa una disminución de la fluidez en comparación con la mezcla control. No obstante, en el caso de 4 horas de molienda, se aprecia un leve aumento respecto a los demás tiempos evaluados.

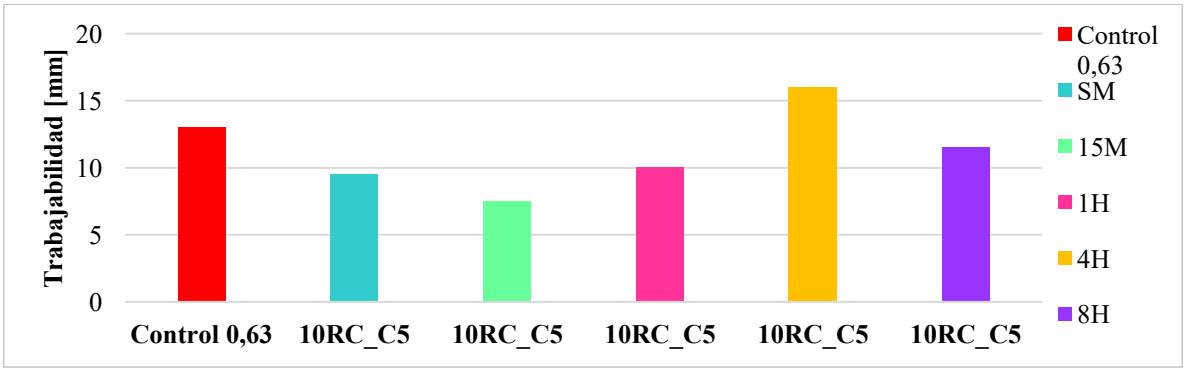


Figura 24. Resultados de la trabajabilidad para el reemplazo de cemento del 10 % < 150 µm con cal viva

En cuanto a la Figura 25, se comparan distintas fracciones granulométricas del relave utilizadas en un 20% de reemplazo de cemento. Las mezclas que combinan relave grueso molido y fino (GF) alcanzan los valores más altos de trabajabilidad, seguidas por aquellas con relave grueso. En contraste, el uso de relave total molido genera una fluidez inferior en comparación con las demás condiciones evaluadas.

Por último, la Figura 26 muestra los resultados del ajuste en la relación agua/ cemento (A/C) en mezclas con un 65% de reemplazo de árido por relave grueso (> 150 µm). Se comparan tres condiciones: A/C = 0,63, A/C = 0,70 y A/C = 0,75. Se observa que la trabajabilidad mejora progresivamente a medida que aumenta el contenido de agua, siendo más notoria en la mezcla con A/C = 0,75, la cual superó los 35 mm de fluidez.

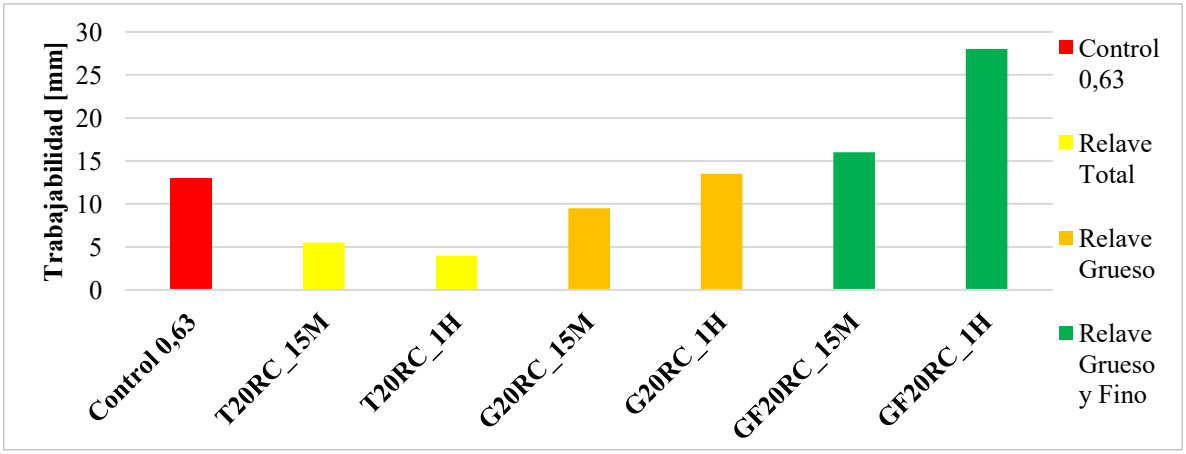


Figura 25. Resultados de la trabajabilidad para el reemplazo de cemento del 20 % para distintos tipos de relaves molidos

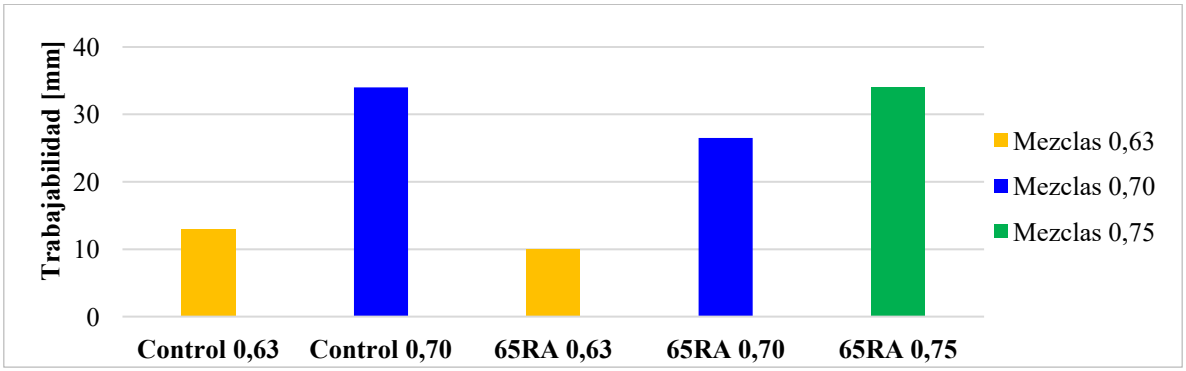


Figura 26. Resultados de la trabajabilidad para el reemplazo de árido > 150 µm con ajuste en la relación agua/cemento

5.3 Densidad

La densidad de cada una de las mezclas de mortero fue determinada antes del proceso de curado, una vez desmoldadas las probetas tras 24 horas. Este valor se calculó a partir de la masa y dimensiones de las probetas, con el propósito de estimar cuán compactas resultaron las mezclas al momento de su elaboración. Los resultados obtenidos para cada dosificación se encuentran detallados en el Anexo 9.10, Tabla A- 18 a Tabla A- 24.

En términos generales, no se observaron diferencias significativas entre las densidades de las distintas mezclas. La mayoría se mantuvo dentro del rango de 2,08 a 2,14 g/cm³, lo que refleja un comportamiento relativamente constante en cuanto a la compacidad inicial, independientemente del tipo de reemplazo o del tiempo de molienda aplicado. No obstante, en ciertas mezclas específicas se evidencia un leve aumento en la densidad, como es el caso de los morteros con incorporación de fibra sintética o el relave molido durante 1 hora. Esta

condición, si bien no puede garantizar por sí sola una mayor resistencia, puede contribuir positivamente al desarrollo del desempeño mecánico del mortero al favorecer un mejor empaquetamiento de partículas.

La Figura 27 presenta la relación entre la densidad de las mezclas con reemplazo de árido por relave grueso y los coeficientes de uniformidad (C_u) y curvatura (C_c) obtenidos a partir de la caracterización granulométrica. Se observa que las mezclas "65RA" y "80RA" alcanzaron los valores más altos de C_u y C_c; sin embargo, estas mismas presentaron una disminución en la densidad en comparación con las demás mezclas. Esta divergencia sugiere que una gradación granulométrica más favorable no necesariamente se traduce en una mayor densidad.

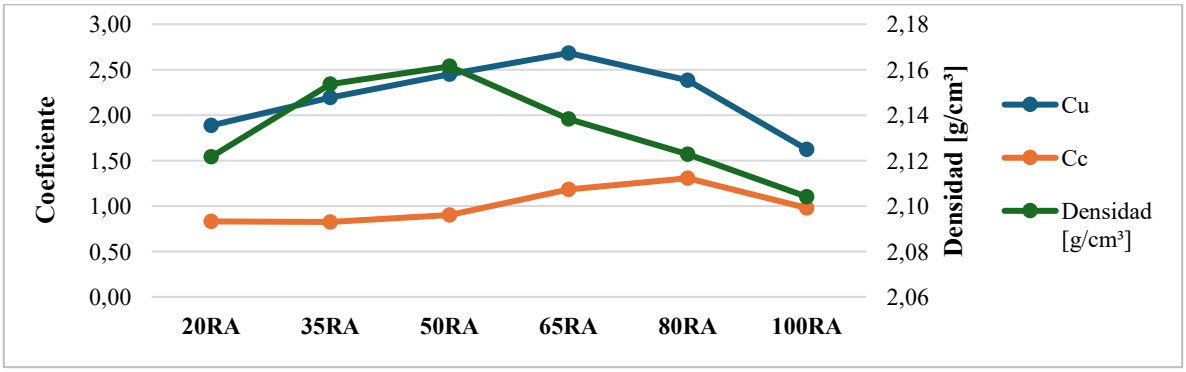


Figura 27. Relación entre la densidad y coeficientes para mezclas con reemplazo de árido > 150 µm

5.4 Flexión

Los resultados completos de los ensayos de resistencia a la flexión obtenidos para cada mezcla evaluada se presentan en el Anexo 9.11.

5.4.1 Etapa preliminar: 28 días de curado

En la Figura 28, correspondiente al reemplazo de cemento por relave fino (< 150 µm), se observa que la incorporación de relave genera una disminución en la resistencia a la flexión respecto a la mezcla control. Sin embargo, las mezclas con un 10% y 20% de reemplazo de cemento, molido durante 15 minutos o 1 hora, presentan valores relativamente cercanos a la mezcla control, superando los 5 MPa. En contraste, las mezclas con mayores porcentajes de reemplazo (30% y 40%) muestran una tendencia decreciente, especialmente cuando se aplican tiempos de molienda prolongados.

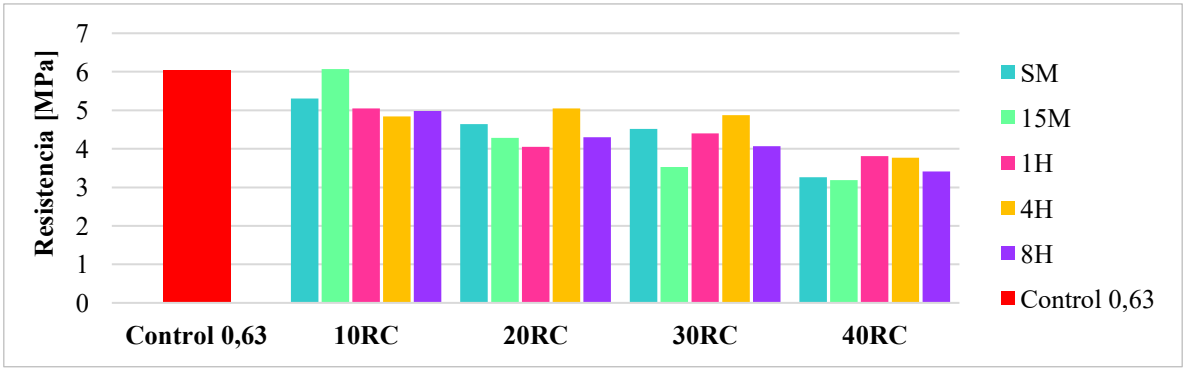


Figura 28. Resultados de resistencia a la flexión para el reemplazo de cemento < 150 µm para 28 días de curado

En la Figura 29, que presenta los resultados para el reemplazo de árido por relave grueso (> 150 µm), se observa que las mezclas con 35 % y 50 % de reemplazo superan la resistencia a la flexión del mortero control (6,04 MPa), alcanzando valores cercanos a los 8 MPa. El resto de las mezclas mantiene resistencias similares o levemente inferiores al control, evidenciando una tendencia decreciente en reemplazos superiores al 65 %.

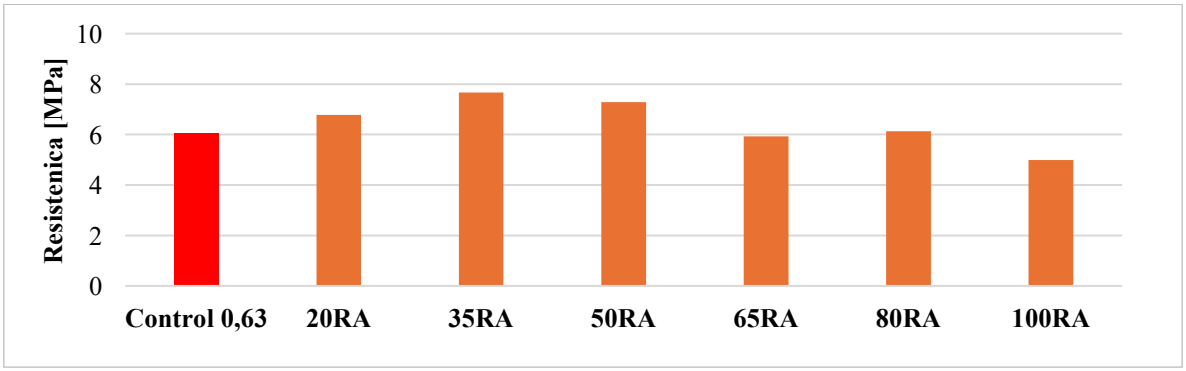


Figura 29. Resultados de resistencia a la flexión para el reemplazo de árido > 150 µm para 28 días de curado

5.4.2 Etapa complementaria: 28 y 56 días de curado

La Figura 30 muestra los resultados para las mezclas con reemplazo de cemento por relave fino (< 150 µm) y adición de fibra sintética. En general, se mantienen las tendencias observadas en la etapa preliminar (Figura 28), aunque se aprecia un aumento en la resistencia al incorporar fibra, especialmente en los reemplazos del 10 % y 20 %, donde se superaron los 7 MPa. Al comparar los curados a 28 y 56 días de curado, se evidencian variaciones: la mezcla control y los reemplazos del 10 % y 20 % presentan una leve disminución con el tiempo, mientras que en reemplazos mayores (30 % y 40 %) la resistencia es más estable.

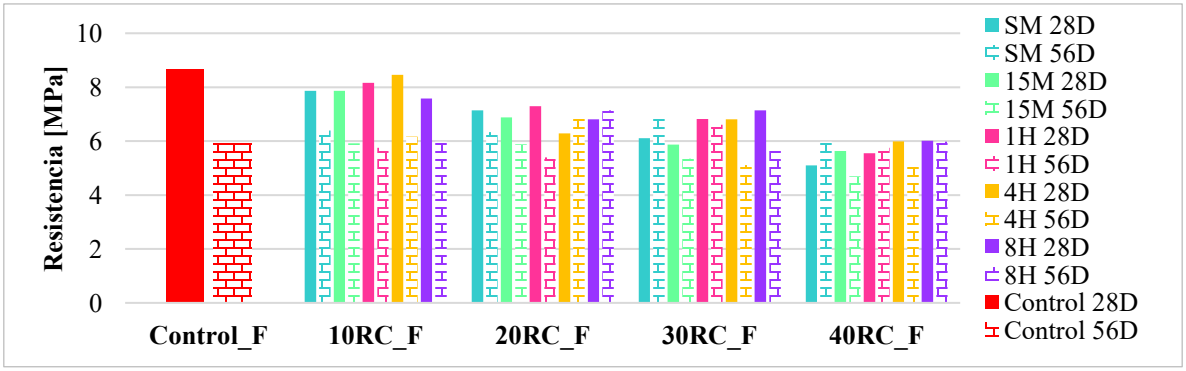


Figura 30. Resultados de resistencia a la flexión para el reemplazo de cemento < 150 µm con fibra sintética para 28 y 56 días de curado

La Figura 31 presenta los resultados de resistencia a la flexión para mezclas con un 20 % de reemplazo de cemento por relave fino (<150 µm), con ajuste en la relación agua/cemento. Las resistencias obtenidas, entre 4 y 5 MPa, son similares a las de la etapa preliminar (Figura 28), indicando que el aumento del contenido de agua no generó mejoras significativas. A los 56 días de curado, se observa una leve disminución en la resistencia para todas las condiciones de molienda, manteniéndose la tendencia registrada a los 28 días.

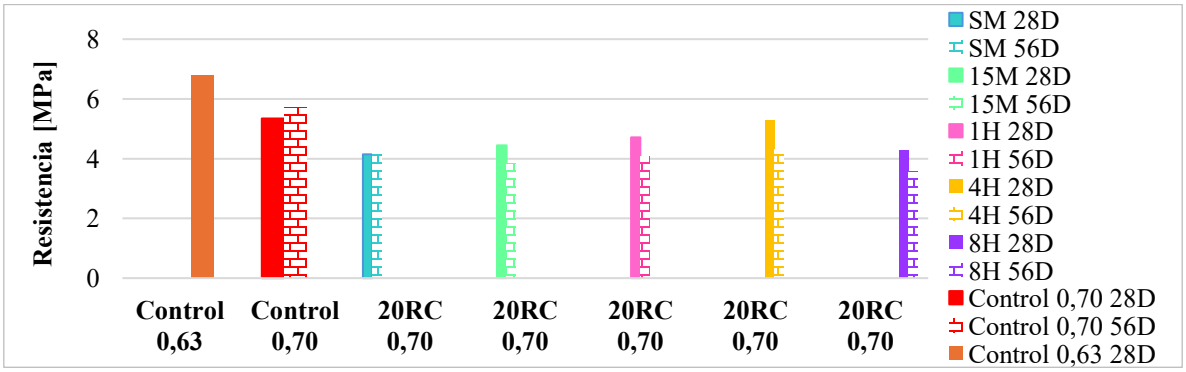


Figura 31. Resultados de resistencia a la flexión para el reemplazo de cemento del 20 % < 150 µm con ajuste en la relación agua/cemento para 28 y 56 días de curado

En la Figura 32 se exponen los resultados correspondientes a las mezclas con 10% de reemplazo de cemento (< 150 µm) y adición de cal viva. A diferencia de lo observado en la etapa preliminar (Figura 28), donde las resistencias disminuyen con el aumento del tiempo de molienda, estas mezclas muestran una tendencia opuesta. A los 56 días de curado, las resistencias aumentan progresivamente con el tiempo de molienda, destacando la dosificación con 8 horas, que supera al control y alcanza un valor de 8,18 MPa.

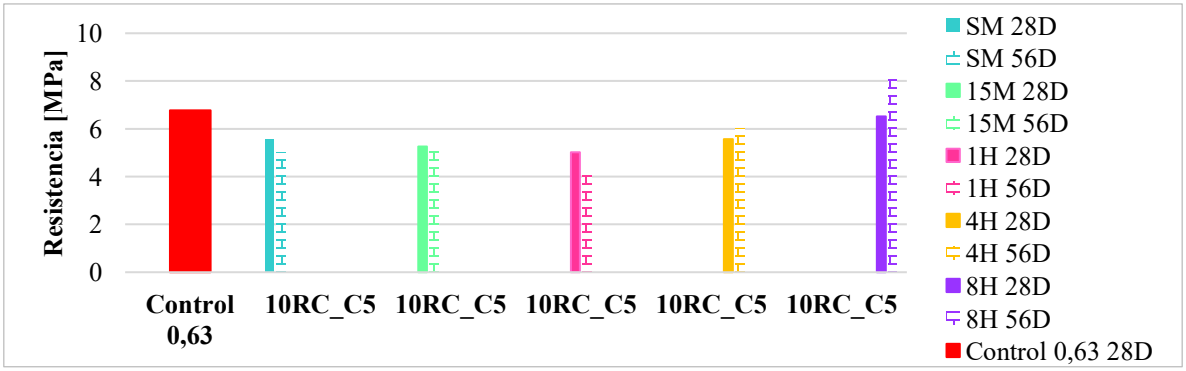


Figura 32. Resultados de resistencia a la flexión para el reemplazo de cemento del 10 % < 150 µm con cal viva para 28 y 56 días de curado

La Figura 33 compara el comportamiento de diferentes fracciones de relave molido para un 20% de reemplazo de cemento. A 28 días de curado, las mezclas con relave total molido y relave grueso molido presentan valores inferiores al control, sin superar los 4 MPa. Por el contrario, las mezclas con relave combinado (relave grueso molido con relave fino) alcanzan resistencias superiores, llegando a los 6 MPa a 56 días de curado.

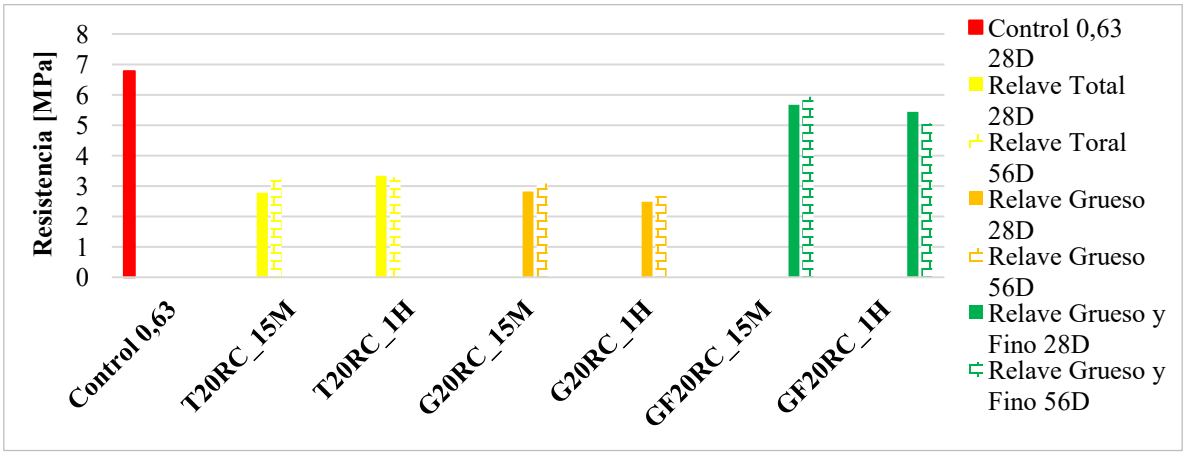


Figura 33. Resultados de resistencia a la flexión para el reemplazo de cemento del 20 % con distintos tipos de relaves molidos para 28 y 56 días de curado

Por último, en la Figura 34 se presentan los resultados para las mezclas con reemplazo de árido (> 150 µm), con ajuste en la relación agua/cemento. A los 28 días de curado, la mezcla "65RA 0,70" alcanzó valores cercanos a los 9 MPa, superando notablemente al "Control 0,63"de la etapa preliminar, así como al "Control 0,70" con la misma relación agua/cemento. De manera similar, la mezcla "65RA 0,75" también mostró un desempeño superior.

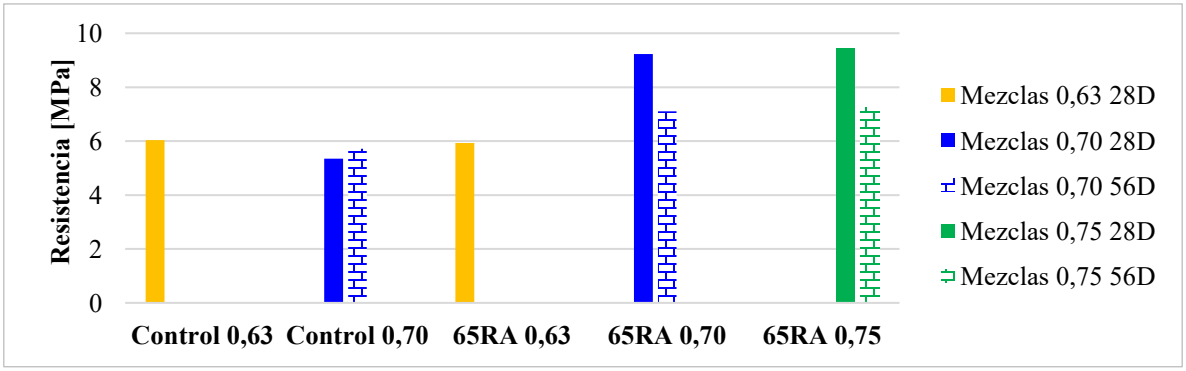


Figura 34. Resultados de resistencia a la flexión para el reemplazo de árido > 150 µm con ajuste en la relación de agua/cemento para 28 y 56 días de curado

5.5 Compresión

Esta sección presenta los resultados de resistencia a la compresión de los morteros con reemplazo parcial de cemento y árido por relave, evaluados a 28 y 56 días de curado. Para las mezclas con reemplazo de cemento, se calculó además el índice de actividad puzolánica (IAR), con el objetivo de estimar la contribución del relave a la resistencia mecánica. El IAR se determinó según la norma ASTM C618 [40], que considera puzolánico a un material cuando supera el 75 %. Este valor se utilizó como referencia para evaluar la reactividad de las mezclas con relave activado. Los resultados completos y sus respectivas comparaciones se encuentran en el Anexo 9.12.

5.5.1 Etapa preliminar: 28 días de curado

La Figura 35 presenta os resultados de compresión para mezclas con reemplazo de cemento por relave fino (<150 µm) a los 28 días de curado. Se observa una disminución progresiva de la resistencia con el aumento del porcentaje de reemplazo, especialmente en mezclas con mayores tiempos de molienda. Sin embargo, las dosificaciones con 10 % de reemplazo y moliendas de 15 minutos o 1 hora alcanzaron valores cercanos a 23 MPa, similares a la mezcla control. A partir del 30 % de reemplazo, la resistencia disminuye de forma notoria. El análisis del IAR (Figura A- 29) mostró que solo las mezclas con hasta 20 % de reemplazo cumplieron con el umbral del 75 %, mientras que las de mayor reemplazo no alcanzaron dicho criterio.

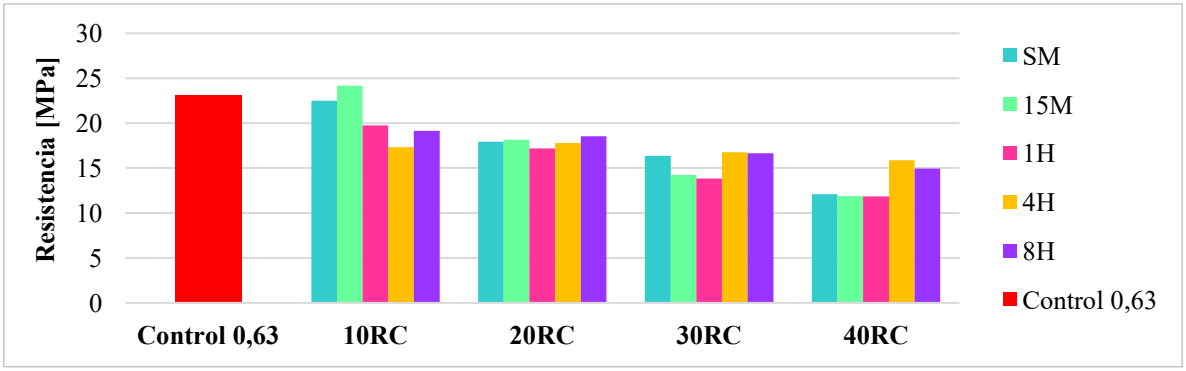


Figura 35. Resultados de resistencia a la compresión para el reemplazo de cemento < 150 µm con 28 días de curado

Por otro lado, la Figura 36 muestra los resultados para mezclas con reemplazo de árido (>150 µm). Las dosificaciones entre 20 % y 100 % superaron o igualaron la resistencia del mortero control (23,07 MPa), destacando los reemplazos del 35 % y 65 %, con valores de 26,21 MPa y 24,47 MPa, respectivamente. En contraste, el reemplazo del 100 % obtuvo la menor resistencia, con 21,53 MPa.

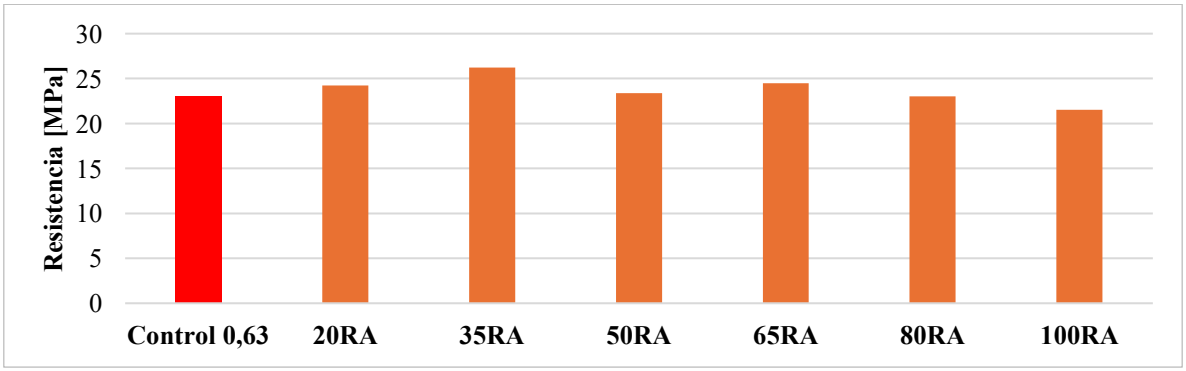


Figura 36. Resultados de resistencia a la compresión para el reemplazo de árido > 150 µm con 28 días de curado

5.5.2 Etapa complementaria: 28 y 56 días de curado

La Figura 37 muestra los resultados para mezclas con reemplazo de cemento por relave fino (<150 µm) y fibra sintética. Las dosificaciones con 10 % y 20 %, molidas por 15 minutos o 1 hora, superaron los 26 MPa, acercándose al control (32,77 MPa) a los 28 días. No se observaron diferencias significativas entre los curados, lo que sugiere que la resistencia se estabiliza antes de los 56 días. En reemplazos mayores (30 % y 40 %), las resistencias muestran una tendencia decreciente más marcada en comparación al control. Respecto al IAR (Figura A- 30 y Figura A- 31), a los 28 días de curado la mayoría de las mezclas con 10 % y

20 % de reemplazo superan el umbral del 75 %, salvo la mezcla con 20 % y 15 minutos de molienda. Por otra parte, las mezclas con 30 % y 40 % no cumplen con el criterio. A 56 días de curado, solo tres mezclas con 10 % de reemplazo alcanzan el valor mínimo.

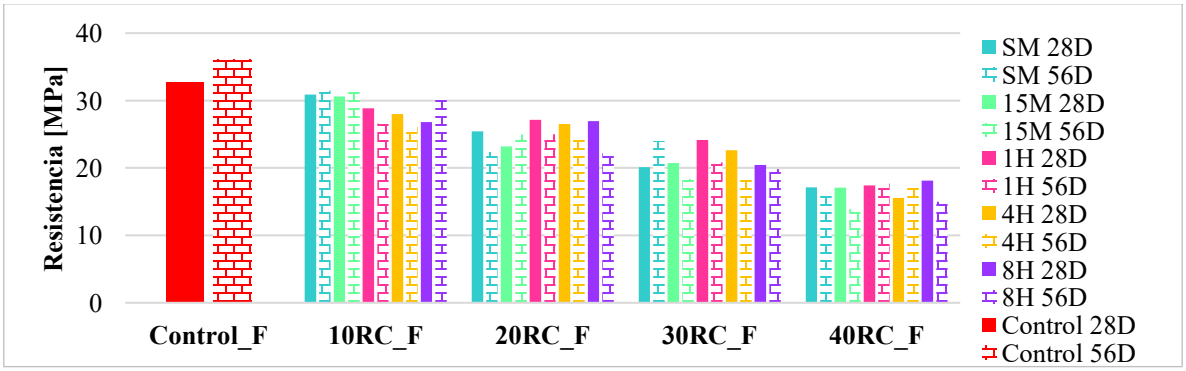


Figura 37. Resultados de resistencia a la compresión para el reemplazo de cemento < 150 µm con fibra sintética para 28 y 56 días de curado

En la Figura 38 se presentan los resultados para mezclas con 20 % de reemplazo de cemento por relave fino (<150 µm) y ajuste en la relación agua/cemento. Las resistencias, entre 12 y 18 MPa, muestran una leve disminución respecto a la etapa preliminar (Figura 35), sin mejoras significativas a pesar del mayor contenido de agua. La resistencia más alta se obtuvo con 4 horas de molienda a 28 días de curado (18,66 MPa), valor cercano al "Control 0,70". Las mezclas evaluadas a 56 días mantuvieron un comportamiento similar, sin variaciones relevantes, en línea con los resultados de flexión (Figura 31). Para el IAR (Figura A- 32 y Figura A- 33) los 28 días de curado todas las mezclas con molienda mayor a 15 minutos superaron el 75 %, cumpliendo con la norma. En cambio, a 56 días solo las mezclas con 4 y 8 horas de molienda superaron este umbral, evidenciando una menor reactividad en las demás condiciones.

En la Figura 39 se presentan los resultados para mezclas con 10 % de reemplazo de cemento por relave fino (<150 µm) y adición de cal viva. A diferencia de la etapa preliminar (Figura 35), donde las resistencias disminuían con el tiempo de molienda, estas mezclas muestran una tendencia inversa: a 56 días de curado, la resistencia aumenta progresivamente con el tiempo de molienda, destacando la mezcla de 8 horas con 35,28 MPa, superando al "Control 0,63". La dosificación con 4 horas también alcanzó un valor cercano al control. Respecto al IAR (Figura A- 34), a los 28 días de curado todas las mezclas superaron el 75 % exigido por

la norma, con un incremento progresivo según el tiempo de molienda. Este índice no fue calculado a 56 días de curado, ya que el valor de referencia del control solo se midió a 28 días.

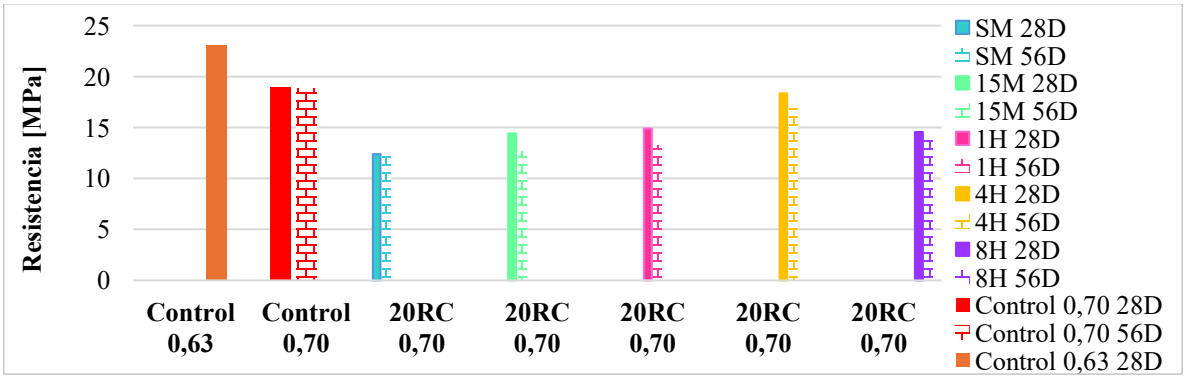


Figura 38. Resultados de resistencia a la compresión para el reemplazo de cemento del 20 % < 150 µm con ajuste en la relación agua/cemento para 28 y 56 días de curado

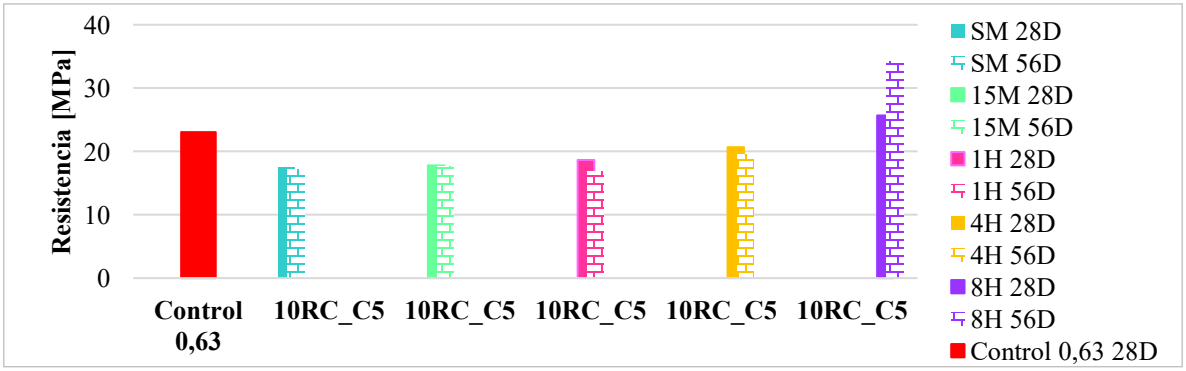


Figura 39. Resultados de resistencia a la compresión para el reemplazo de cemento del 10 % < 150 µm con cal viva para 28 y 56 días de curado

La Figura 40 corresponde a las mezclas con un 20% de reemplazo de cemento utilizando distintas fracciones granulométricas de relave molido. Se observa un comportamiento diferenciado según el tipo de fracción utilizada. A los 28 días de curado, las mezclas con relave total molido y relave grueso molido presentan valores inferiores al "Control 0,63", sin superar los 12 MPa incluso tras haber alcanzado los 56 días de curado. Por el contrario, las mezclas con relave combinado (relave grueso molido con relave fino) exhiben un desempeño destacado, alcanzando valores de hasta 27 MPa. Según el IAR Figura A- 35, solo las mezclas con relave combinado superan el 75 % exigido por la norma ASTM C618, confirmando su mayor reactividad puzolánica frente al resto de las fracciones evaluadas.

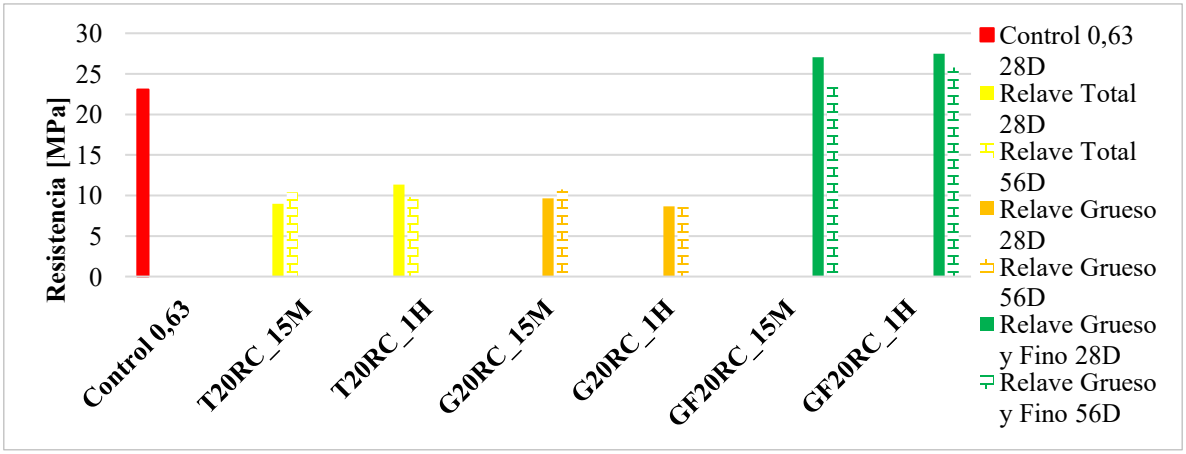


Figura 40. Resultados de resistencia a la compresión para el reemplazo de cemento del 20 % para distintos tipos de relaves molidos para 28 y 56 días de curado

Finalmente, en la Figura 41 se presentan los resultados de resistencia a la compresión para las mezclas con 65% de reemplazo de árido (> 150 µm), con ajuste en la relación agua/cemento. En primer lugar, se observa que la mezcla "65RA 0,63" alcanzó valores similares al "Control 00,63" para los 28 días de curado en la etapa preliminar. Sin embargo, las mezclas con mayor contenido de agua mostraron un comportamiento superior. En particular, la mezcla "65RA 0,70" superó los 38 MPa a los 28 días de curado, manteniéndose estable a los 56 días. De forma similar, la mezcla "65RA 0,75" alcanzó una resistencia elevada, cercana a los 36 MPa. Este comportamiento contrasta con la disminución de resistencia observada en la mezcla "Control 0,70" al incrementarse la relación agua/cemento, lo que evidencia que, en mezclas con un alto porcentaje de reemplazo de árido, este ajuste puede tener un efecto favorable en el desarrollo de la resistencia a compresión.

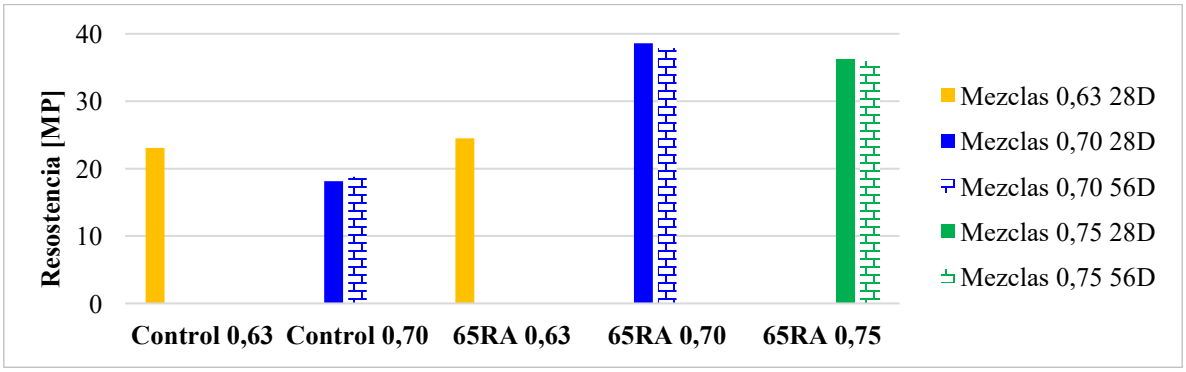


Figura 41. Resultados de resistencia a la compresión para el reemplazo de árido > 150 µm con ajuste en la relación agua/cemento para 28 y 56 días de curado

Capítulo 6: Discusión

En este capítulo se interpretan los resultados obtenidos para las distintas mezclas de mortero, considerando el efecto del reemplazo parcial de cemento y árido por relave activado mecánicamente. Se analizan variables como la trabajabilidad, resistencia mecánica, tiempo de molienda, tipo de fracción utilizada, densidad, índice de actividad puzolánica y parámetros granulométricos, así como la incorporación de aditivos. Además, se contrastan los principales hallazgos con antecedentes de la literatura técnica, destacando su relevancia y alcance.

6.1 Evaluación de la etapa preliminar

En el análisis de las mezclas con reemplazo parcial de cemento por relave fino molido (<150 μm), se observaron mejoras significativas en la resistencia mecánica a los 28 días de curado, particularmente para los reemplazos del 10 % y 20 %, cuando el relave fue activado mediante molienda durante 15 minutos o 1 hora. En estas condiciones, las resistencias a la flexión (Figura 28) alcanzaron valores iguales o superiores al "Control 0,63" (6,04 MPa), con un rango de 4 a 6 MPa. En cuanto a la compresión (Figura 35), se obtuvieron valores entre 17 y 24 MPa, también comparables o superiores al control (23,07 MPa).

Este comportamiento se atribuye al aumento de la reactividad puzolánica (IAR > 75 %) y a una mayor compacidad del mortero endurecido (densidades entre 2,11 y 2,16 g/cm³), probablemente por efecto de relleno, donde las partículas finas del relave ocupan vacíos en la matriz cementante, mejorando la estructura y favoreciendo el desarrollo de la resistencia.

En cuanto a la trabajabilidad (Figura 20), no se identificó una tendencia clara respecto al porcentaje de reemplazo ni al tiempo de molienda. No obstante, para el 40 % de reemplazo con 8 horas de molienda se registró un aumento notable de la fluidez (>22 mm). Este comportamiento podría asociarse a variaciones granulométricas del relave, especialmente por la presencia de partículas ultrafinas observadas en el análisis SEM (Figura 13), que pueden haber influido en la distribución del agua o en la ejecución del ensayo.

Estudios previos respaldan en parte estos resultados. Ramanathan et al. [34] evaluaron relaves activados por molienda con discos (1–15 minutos) y bolas (30 minutos), obteniendo hasta un 27 % de contenido amorfo y una reducción del 38 % en hidróxido de calcio, lo que fue atribuido a mayor reactividad. En este estudio, si bien se observaron buenos resultados

para el 10 % y 20 %, los reemplazos del 30 % y 40 % evidenciaron una disminución de resistencia, atribuible a una dilución del contenido cementante efectivo.

De forma similar, Zhang et al. [35] evaluaron morteros con reemplazos de entre 5 % y 35 % de cemento por relave de cobre molido, observando mejoras en la resistencia mecánica hasta un 15 % de reemplazo. Estos resultados se atribuyeron a una menor porosidad y a una microestructura más densa, producto de la reactividad puzolánica y del efecto de relleno del relave. No obstante, al superar ese umbral, las resistencias disminuyeron, comportamiento que concuerda con lo observado en este estudio, donde los mejores resultados se obtuvieron con reemplazos del 10 % y 20 %.

Para el reemplazo de árido fino por relave grueso (> 150 µm), se evaluaron proporciones entre 20 % y 100 %. A los 28 días de curado (Figura 36), las resistencias a compresión mejoraron progresivamente hasta un 65 % de reemplazo, alcanzando hasta 26 MPa, superiores al "Control 0,63" (23,07 MPa). Sin embargo, desde el 80 % en adelante, las resistencias disminuyeron, con el valor más bajo para el 100 % (21,53 MPa). Para la flexión (Figura 29), se observó un comportamiento similar: los reemplazos del 35 % y 50 % superaron al control (6,04 MPa), con valores cercanos a los 8 MPa, disminuyendo más allá del 65 %. Este desempeño se relaciona con el efecto de relleno y la morfología angular del relave grueso (Figura 12), que favorecen un buen empaquetamiento y una matriz más densa. Las mezclas entre 35 % y 50 % de reemplazo presentaron las mayores densidades (~2,16 g/cm³), mientras que aquellas con 65% y 80% mostraron valores más altos de los coeficientes granulométricos, alcanzando hasta 2,53 en C_u y 1,16 en C_c, lo que refleja una distribución más heterogénea de tamaños. Esta divergencia entre densidad y gradación sugiere que una mejor combinación granulométrica no siempre implica una mayor compacidad, posiblemente por un incremento en la porosidad interna. Asimismo, los diámetros efectivos (D10–D80) aumentaron con el porcentaje de reemplazo, indicando una mezcla más estructurada y con mayor presencia de partículas gruesas.

En contraste, la trabajabilidad disminuyó con el aumento del reemplazo, cayendo por debajo de 10 mm a partir del 65 %, debido a la forma angular y rugosa del relave, que eleva la fricción interna y demanda mayor contenido de agua. Estos resultados coinciden con lo reportado por Vargas y Ríos [36], quienes observaron buenos desempeños mecánicos con

reemplazo de árido por relave aglomerado de hasta un 30%, logrando resistencias a compresión de 24,6 MPa a los 28 días de curado, superiores al control (22,7 MPa). Sin embargo, a partir del 45% de reemplazo, las resistencias comenzaron a disminuir. De manera similar, Cuit et al. [38] evaluaron morteros con reemplazos de arena natural por relave de cobre, registrando un descenso progresivo en las resistencias a compresión desde 55,7 MPa en el control hasta 39,6 MPa para el 35% de reemplazo. Los autores concluyeron que, si bien los relaves contribuyen a generar una microestructura más densa en bajos porcentajes, a mayores proporciones incrementan la porosidad y la retracción por secado, afectando negativamente la compacidad del mortero.

En conjunto, esta etapa preliminar permitió identificar configuraciones óptimas para ambos tipos de reemplazo. En el caso del cemento, el uso de relave fino activado en proporciones del 10 % y 20 %, con molienda de 15 minutos y 1 hora, resultó eficaz para mantener e incluso mejorar las propiedades mecánicas del mortero. Se alcanzaron resistencias a la compresión de hasta 24,17 MPa y a la flexión de hasta 6,07 MPa, ambas superiores a las de la mezcla control. Por su parte, el reemplazo de árido fino por relave grueso presentó el mejor comportamiento con valores entre el 35 % y 65 % de reemplazo, logrando una resistencia a la compresión cercana a 26 MPa y a la flexión cercana a los 8 MPa, también por sobre el control. Estos resultados respaldan el potencial del relave como material cementante suplementario y como sustituto del árido fino, siempre que se mantengan proporciones adecuadas de dosificación y condiciones de molienda óptimas, evitando así los efectos negativos que pueden presentarse con niveles excesivos de reemplazo.

6.2 Evaluación de la etapa complementaria

Mezclas con fibra sintética: En el caso del 10 % de reemplazo por relave fino activado con incorporación de fibra (“10RC_F”), se observaron mejoras relevantes respecto a las mezclas sin fibra. A los 28 días de curado, la resistencia a la compresión (Figura 37) alcanzó 30,59 MPa con 15 minutos de molienda y 28,86 MPa con 1 hora, superando los 23,15 MPa de la mezcla “10RC” sin fibra, y acercándose al valor de la mezcla “Control_F” (32,77 MPa). Esta tendencia se mantuvo a los 56 días, lo que sugiere un desarrollo temprano de la resistencia. Además, todas las dosificaciones mantuvieron índices de actividad puzolánica (IAR) superiores al 75 %, lo que confirma una adecuada reactividad del sistema cementante.

Respecto a la resistencia a la flexión (Figura 30), también se observaron mejoras. La mezcla "10RC_F2" con 1 hora de molienda alcanzó 8,16 MPa a los 28 días, mientras que su equivalente sin fibra no superó los 6 MPa. Este aumento se asocia al efecto puente de las fibras, que mejora la ductilidad y la resistencia a tracción, como reportan Nayak et al. [59], quienes observaron que la incorporación de fibras sintéticas mejora la cohesión interna del mortero, controla la fisuración y contribuye al desarrollo progresivo de resistencia hasta los 56 días de curado. En cuanto a la densidad, las mezclas "10RC_F" mantuvieron valores cercanos a 2,15 g/cm³ (Tabla A- 20), similares a los de la etapa preliminar, indicando que la incorporación de fibras no afectó negativamente la compacidad. En lo referente a la trabajabilidad, se registraron valores menores que en el "Control_F" (35 mm), sin comprometer la fluidez. Esta reducción se atribuye al aumento de fricción interna generado por la presencia de fibras, efecto también descrito por Viera et al. [60], quienes señalaron una mayor porosidad en mezclas con fibras sintéticas debido a la incorporación de aire durante el mezclado.

Mezclas con ajuste en la relación agua/cemento: En las mezclas con 20 % de reemplazo de cemento y ajuste en la relación agua/cemento, no se observó un aumento en la resistencia, sino una leve disminución respecto a la etapa preliminar. En compresión, la mezcla "Control 0,70" alcanzó 19,93 MPa (Figura 38), mientras que en la etapa preliminar la mezcla "Control 0,63" logró 23,07 MPa (Figura 35). La única dosificación que se acercó al valor del control ajustado fue "20RC_4H 0,70", con 18,36 MPa. Para la resistencia a la flexión se observó un comportamiento similar: "Control 0,70" obtuvo 5,35 MPa (Figura 31), por debajo de los 6,04 MPa de "Control 0,63" (Figura 28). Estos resultados fueron consistentes también a los 56 días de curado, sin mejoras significativas. Aun así, la mezcla "20RC_4H 0,70" fue la única que superó el 75 % de IAR a 56 días, lo que evidencia un adecuado potencial cementante en esa condición.

En cuanto a la trabajabilidad (Figura 23), se registró una mejora significativa al incrementar la relación agua/cemento, especialmente en las mezclas con 4 y 8 horas de molienda, que superaron los 35 mm de asentamiento. Esto se atribuye a una mayor cantidad de agua libre y al efecto lubricante de las partículas finas generadas por la molienda. Zhang et al.[61], señalan que mezclas con alta proporción de finos requieren más agua, por lo que ajustar la

relación a/c resulta clave para mantener la fluidez. En cuanto a la densidad, se observó una leve mejora respecto a las mezclas sin ajuste, destacando las condiciones con 4 y 8 horas de molienda, que alcanzaron valores de 2,119 y 2,159 g/cm³, respectivamente. Esta variación sugiere una mejor compactación, posiblemente por una distribución granulométrica más uniforme. Según Olubajo et al. [62], una mayor relación a/c puede favorecer la hidratación y mejorar la densificación en sistemas con materiales finos y reactivos, como el relave molido.

Mezclas con incorporación de cal viva: En las mezclas con incorporación de cal viva ("10RC_C5"), se observó un incremento progresivo en la resistencia a medida que aumentó el tiempo de molienda del relave. A los 56 días de curado, la mezcla con 8 horas de molienda alcanzó 34,23 MPa (Figura 39), superando incluso al "Control 0,63" (Figura 35) de la etapa preliminar. Esto sugiere que la combinación de cal viva con una activación mecánica prolongada favorece significativamente el desarrollo de la resistencia a compresión. Todas las mezclas evaluadas en esta condición presentaron índices de actividad puzolánica (IAR) superiores al 75 %, lo que confirma una alta reactividad del sistema cementante.

Este comportamiento concuerda con lo reportado por Antiohos y Tsimas [63], quienes demostraron que la cal viva actúa como activador químico eficaz en sistemas con materiales puzolánicos, elevando el pH del medio e intensificando las reacciones de hidratación, lo cual promueve la formación de productos cementantes que mejoran la cohesión y la resistencia del mortero. En cuanto a la resistencia a la flexión (Figura 32), las mezclas "10RC_C5" mostraron un desempeño destacado, alcanzando 6,51 MPa a los 28 días y 8,18 MPa a los 56 días de curado para 8 horas de molienda, superando tanto a la mezcla control con cal como a la sin cal. Este resultado se asocia a las mayores densidades registradas en este tipo de mezcla (Tabla A- 22), cercanas a 2,10 g/cm³. Respecto a la trabajabilidad (Figura 24), la adición de cal viva no generó una disminución crítica en la fluidez, por lo que no se comprometió la manejabilidad. Esto sugiere que, con una dosificación adecuada, la cal viva no afecta negativamente la consistencia del mortero.

Mezclas con variación del tipo de fracción del relave: Se evaluó el efecto del tipo de fracción del relave utilizado para reemplazar el 20 % del cemento, mediante tres variantes: relave total molido (T20RC), fracción gruesa molida (G20RC) y combinación de fracción gruesa molida con fracción fina (GF20RC), todas con tiempos de molienda de 15 minutos y

1 hora. Los mejores resultados se obtuvieron en las mezclas combinadas (GF20RC), que alcanzaron resistencias a la compresión de 27,04 MPa (15 minutos) y 27,46 MPa (1 hora) a los 28 días de curado, y superaron los 25 MPa a los 56 días (Figura 40). Estas cifras superaron ampliamente a las obtenidas en T20RC (<12 MPa) y G20RC (<10 MPa). En flexión también se observaron mejoras destacadas, con valores superiores a 5 MPa (Figura 33), especialmente en la mezcla "GF20RC_15M" con 5,67 MPa a 28 días. Solo las mezclas GF20RC superaron ampliamente el 75 % en el índice de actividad puzolánica (IAR), alcanzando hasta 119 % (Tabla A- 42), mientras que las demás se mantuvieron por debajo del umbral, con valores menores al 50 %.

Este comportamiento se atribuye a una distribución granulométrica más equilibrada al combinar partículas gruesas molidas con finas, favoreciendo un empaquetamiento denso y menor porosidad. Las curvas de tamaño (Figura 15) mostraron una distribución continua y extendida, mientras que los coeficientes granulométricos (Figura 16) indicaron una graduación favorable ($C_u > 11$ y $C_c \approx 1{,}2$), en concordancia con lo planteado por Zhang et al. [61], [64], quienes destacan que una distribución bien graduada mejora la compacidad, trabajabilidad y reactividad del sistema. Asimismo, las mezclas GF presentaron mayores densidades, alcanzando hasta 2,11 g/cm³ (Tabla A- ***23***), y mejor trabajabilidad, con asentamientos de 16 mm y 28 mm para "GF20RC_15M" y "GF20RC_1H" (Figura 25), superando ampliamente al resto.

Por último, según la Tabla 10, uno de los factores que podría haber contribuido al mejor desempeño de estas mezclas es la presencia de moscovita, mineral que se concentra principalmente en la fracción gruesa del relave. Se presume que la molienda durante 15 minutos y 1 hora habría incrementado su reactividad puzolánica, favoreciendo así la formación de productos cementantes y mejorando la cohesión de la matriz, lo que también se traduce en un mejor comportamiento mecánico del mortero.

Mezclas para el 65% de reemplazo de árido con ajuste en la relación agua/cemento: Las mezclas con 65 % de reemplazo de árido por relave grueso (>150 μm) y ajuste en la relación agua/cemento ("65RA 0,70" y "65RA 0,75") presentaron los mejores resultados entre todas las dosificaciones. A los 28 días de curado, alcanzaron resistencias a la compresión de 38,61 MPa y 36,29 MPa, respectivamente (Figura 41), superando ampliamente tanto al

control ajustado (“Control 0,70”:18,12 MPa) como al control sin ajuste (“Control 0,63”: 23,07 MPa). Esta tendencia se mantuvo a los 56 días, confirmando un desarrollo sostenido de la resistencia. Este comportamiento puede atribuirse a la mayor capacidad del relave grueso para retener agua en comparación con un árido natural, debido a su porosidad, forma angular y textura superficial. En condiciones de igual contenido de agua, esta absorción reduce la cantidad de agua libre disponible para la hidratación del cemento, lo que puede afectar negativamente el desarrollo de la matriz. El ajuste en la relación agua/cemento compensa esta pérdida, permitiendo una hidratación más completa y favoreciendo la formación de una estructura más densa y cohesionada. Este efecto también fue señalado por Vargas y Ríos et al. [36] y Cui el al. [38], quienes reportaron mejoras en la resistencia mecánica al optimizar el contenido de agua en mezclas con áridos derivados de relaves. En cuanto a la resistencia a la flexión, las mezclas ajustadas superaron los 9 MPa a los 28 días y mantuvieron más de 7 MPa a los 56 días (Figura 34), frente a los 5,93 MPa observados en la mezcla sin ajuste (Figura 29), evidenciando mejoras también en tracción.

La trabajabilidad aumentó notablemente, con asentamientos entre 26,5 mm y 34 mm (Figura 26), muy superiores a los <11 mm de las mezclas sin ajuste (Figura 21). Además, se registraron densidades ligeramente superiores (2,10-2,13 g/cm³), asociadas a una mejor compactación, una distribución granulométrica más eficiente (Figura 18), y a la presencia de partículas gruesas que requieren un control adecuado del contenido de agua para consolidar correctamente la matriz cementante, tal como señalan Cui et al. [38].

6.3 Influencia de la activación mecánica del relave

La activación mecánica del relave mediante molienda indujo transformaciones notables en su morfología, mineralogía y distribución de tamaños de partícula (Figura 12-Figura 18), lo que impacto directamente en el comportamiento de los morteros. A nivel morfológico, el análisis por SEM (Figura 12 y Figura 13) evidenció que los tiempos de molienda de 15 minutos y 1 hora generaron partículas más angulosas, con bordes bien definidos y superficies rugosas, lo que favoreció la adherencia en el matriz cementante y mejoró la cohesión interna. En cambio, para las moliendas de 3 y 8 horas produjeron partículas excesivamente finas y con pérdida de angularidad, lo que se tradujo en una menor cohesión y compacidad, coincidiendo con una reducción de las resistencias mecánicas.

Desde el punto de vista mineralógico, el análisis DRX mostró una disminución progresiva en la concentración de minerales potencialmente reactivos, como la caolinita y especialmente la moscovita, a medida que aumentó el tiempo de molienda (Figura 10). Estos resultados son coherentes con lo señalado por Zhang et al. [33], quienes demostraron que la molienda prolongada reduce la cristalinidad de la moscovita y favorece la formación de fases amorfas con mayor reactividad puzolánica. Para este estudio, la moscovita se concentró principalmente en la fracción gruesa del relave (>150 μm), lo que explica el buen desempeño observado en mezclas como "GF20RC", donde se activó esta fracción. En particular, se observó que la molienda fue más efectiva en la reducción de la moscovita que de la caolinita, lo que sugiere que este mineral tiene mayor potencial de activación mecánica. En términos granulométricos, las Figura 14 hasta la Figura 16 mostraron que las moliendas de 15 minutos y 1 hora ofrecieron una distribución más favorable para el empaquetamiento de partículas. Se alcanzaron los mejores coeficientes de uniformidad y curvatura ($C_u \approx 11{,}4$; y $C_c \approx 1{,}3$), los cuales contribuyeron una mejor compactación al sistema. En cambio, los tiempos de molienda superiores a 1 hora redujeron estos valores ($C_c < 1$), indicando una distribución menos efectiva y una sobre pulverización del material, con efectos negativos sobre la resistencia y la densidad del mortero.

En conjunto, se concluye que la activación mecánica mediante molienda es eficaz solo hasta cierto punto. Se identifican tres efectos principales: (i) la modificación morfológica, donde partículas más angulosas obtenidas con tiempos cortos favorecen la resistencia; (ii) el efecto de relleno, relacionado con la curva granulométrica del material, donde tiempos prolongados afectan negativamente la compacidad debido a la sobrepulverización ($C_c < 1$ y valores bajos de C_u Figura 16); y (iii) la amorfización de fases minerales como la moscovita, que mejora la reactividad hasta cierto umbral. Todos estos efectos interactúan entre sí, permitiendo concluir, en base a los resultados de resistencia obtenidos, que los tiempos óptimos de molienda se sitúan entre los 15 minutos y 1 hora para emplear el relave como reemplazo parcial de cemento en morteros.

6.4 Limitaciones del estudio

Si bien los resultados obtenidos fueron en general positivos y coherentes, el estudio presenta ciertas limitaciones que deben ser consideradas al interpretar los hallazgos. En primer lugar,

las mezclas con incorporación de cal viva se evaluaron únicamente en una proporción fija, lo que impidió analizar el efecto de diferentes dosificaciones o condiciones de curado sobre su desempeño. Esta limitación restringe la posibilidad de extrapolar los resultados a otras proporciones óptimas o a distintos escenarios de aplicación.

Por otro lado, aunque se consideraron tiempos de molienda extensos, la escasez de estudios previos que aborden relaves molidos por más de 2 horas dificultó una comparación directa con la literatura, y limitó el respaldo técnico para interpretar los efectos de sobre pulverización observados. Asimismo, no se exploraron tiempos de molienda inferiores a 15 minutos, los cuales han demostrado ser efectivos en otros estudios utilizando molino de discos, evidenciando un potencial aún no evaluado en esta investigación. Además, no se estudió en profundidad la capacidad de absorción o retención de agua del relave, lo cual podría influir significativamente en la trabajabilidad y el comportamiento del mortero en estado fresco. Algunas variaciones en los resultados también podrían estar asociadas a diferencias en la calidad o en la composición química y mineralógica del relave entre muestras, aspecto que no fue abordado en este estudio.

A partir de lo anterior, se sugieren como líneas de investigación futuras:

- Evaluar una gama más amplia de dosificaciones con cal viva y diferentes condiciones de curado.
- Estudiar el comportamiento del relave activado con tiempos de molienda inferiores a 15 minutos, especialmente mediante molino de discos o de bolas, considerando su potencial para mejorar la reactividad en períodos más breves.
- Determinar la capacidad de absorción de agua del relave y su efecto sobre la trabajabilidad del mortero.
- Analizar con mayor detalle la composición y variabilidad del relave entre muestras, con el fin de comprender mejor su influencia en las propiedades físicas y mecánicas del mortero.

Estas acciones permitirían complementar los hallazgos de esta investigación y avanzar hacia una caracterización más integral del uso de relaves activados mecánicamente en materiales cementantes.

Capítulo 7: Conclusiones y recomendaciones

Este estudio surge como respuesta a dos problemáticas ambientales relevantes, por un lado, el elevado impacto del cemento Portland en términos de emisiones de CO_2 y por otro, la acumulación masiva de relaves mineros en el territorio nacional. Ante ello, se investigó la posibilidad de reutilizar relaves de cobre activados mecánicamente como parte de la mezcla de mortero, reemplazando parcialmente tanto el cemento como el árido fino.

En las mezclas con reemplazo de cemento por relave fino activado (<150 μm), se logró mantener o mejorar la resistencia mecánica hasta un 20 % de reemplazo, siempre que el relave fuese molido durante 15 minutos o 1 hora. Reemplazos superiores al 30 % o moliendas prolongadas redujeron significativamente la resistencia, debido a una pérdida de compacidad y reactividad. La incorporación de fibra sintética en mezclas con 10 % de reemplazo mejoró la resistencia a compresión y flexión gracias al refuerzo estructural de las fibras, sin afectar negativamente la densidad ni la trabajabilidad. El ajuste en la relación agua/cemento no mejoró la resistencia, aunque sí aumentó la fluidez en mezclas con alto contenido de finos.

Las mezclas con cal viva mostraron un incremento progresivo en la resistencia a medida que se extendió el tiempo de molienda, destacando la combinación con 8 horas, que superó ampliamente a la mezcla control. Esto se atribuye al efecto activador de la cal, que favorece las reacciones puzolánicas sin comprometer la densidad ni la manejabilidad. Las mezclas con fracciones combinadas de relave (gruesa molida y fina sin moler) ofrecieron uno de los mejores desempeños del estudio, con resistencias superiores a 27 MPa y una distribución granulométrica más eficiente, mayor compacidad y reactividad, posiblemente asociadas a la activación de la moscovita presente en la fracción gruesa.

Respecto al reemplazo de árido fino por relave grueso (>150 μm), se alcanzó un desempeño óptimo hasta un 65 % de reemplazo, con resistencias de 26 MPa en compresión y cercanas a 8 MPa en flexión, gracias a su forma angular y efecto de relleno. Reemplazos mayores redujeron el rendimiento. Las mezclas con 65 % de reemplazo de árido y ajuste en la relación agua/cemento fueron las más eficientes, logrando hasta 38,61 MPa en compresión y más de 9 MPa en flexión, además de buena trabajabilidad y densidad. Esto confirma que un control adecuado del contenido de agua es fundamental para compensar la absorción del relave y favorecer la hidratación del sistema.

En conjunto, se identificó que los tiempos de molienda de 15 minutos y 1 hora fueron los más efectivos para activar el relave, permitiendo modificar su morfología y mineralogía favorablemente, sin llegar a sobre pulverizar el material. Las moliendas prolongadas redujeron la cristalinidad de minerales clave como la moscovita, pero también afectaron negativamente la distribución granulométrica y la compacidad del sistema. Por tanto, la activación mecánica es eficaz solo dentro de un rango óptimo de tiempo, que preserve la angularidad, reduzca parcialmente la cristalinidad y mejore la distribución de tamaños de partícula.

Además, se observó que la mayoría de las mezclas alcanzaron su mayor desarrollo de resistencia a los 28 días, sin incrementos relevantes a los 56 días, lo que indica que la reactividad inducida por la molienda ocurre principalmente en las primeras etapas del curado. Este comportamiento debe considerarse al proyectar su uso en obra, especialmente en aplicaciones que requieren un rápido desarrollo de resistencia inicial.

Se sugiere continuar desarrollando mezclas que incorporen cal viva, evaluando distintos porcentajes y condiciones de curado para optimizar su efecto como activador. Asimismo, es necesario profundizar el estudio de la absorción de agua del relave y su influencia en la trabajabilidad y durabilidad del mortero, considerando ajustes en la relación agua/cemento y el uso de aditivos. También se recomienda extender esta investigación a otros tipos de relaves de diferentes yacimientos, a fin de validar esta estrategia en distintos contextos geológicos y operacionales. Estas acciones permitirían ampliar el uso de relaves activados en la industria de la construcción, especialmente en infraestructura minera subterránea, como shotcrete, revestimiento de túneles y elementos de soporte, contribuyendo a reducir los pasivos ambientales y la huella de carbono del sector.

Capítulo 8: Bibliografía

[1] Consejo Minero, “Minería en números.” [Online]. Available: https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2020/07/Mineria_en_numeros_2020_web.pdf

[2] C. Colunga Martínez, “El Sector de la Minería en Chile 2024,” Santiago de Chile, May 2024. [Online]. Available: http://chile.oficinascomerciales.es/

[3] Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), “Plataforma Pública de Relaves.” [Online]. Available: https://www.sernageomin.cl/plataforma-publica-de-relaves/

[4] Universidad de Chile, “ Andacollo, La Higuera, Copiapó e Illapel concentran el 42,5% de los relaves mineros del país,” Universidad de Chile. [Online]. Available: https://uchile.cl/noticias/207257/andacollo-la-higuera-copiapo-e-illapel-concentran-42-de-los-relaves

[5] Electrominería, “La problemática de los relaves mineros en Chile y el método Meci como alternativa sostenible.” [Online]. Available: https://electromineria.cl/la-problematica-de-los-relaves-mineros-en-chile-y-el-metodo-meci-como-alternativa-sostenible/

[6] L. Y. Shen, W. S. Lu, H. Yao, and D. H. Wu, “A computer-based scoring method for measuring the environmental performance of construction activities,” *Autom Constr*, vol. 14, no. 3, Jun. 2005, [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580504001037?via=ihub

[7] J. Lehne and F. Preston, *Chatham House Report Making Concrete Change Innovation in Low-carbon Cement and Concrete*. 2018. [Online]. Available: www.chathamhouse.org

[8] Consejo Minero, “Minería en más de 280 caracteres: Información para un debate fundado,” Santiago, Chile, 2022. [Online]. Available: https://consejominero.cl/wp-content/uploads/2023/04/mineria-280-caracteres.pdf

[9] Ministerio de Minería de Chile, “Plan Nacional Depósitos de Relaves para una Minería Sostenible,” Santiago de Chile, 2019. [Online]. Available: www.minmineria.gob.cl/

[10] J. Menéndez and S. Muñoz, “Contaminación del agua y suelo por los relaves mineros,” *Paideia XXI*, vol. 11, no. 1, pp. 141–154, Feb. 2021, doi: 10.31381/paideia.v11i1.3622.

[11] Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), “Preguntas frecuentes sobre relaves mineros.” [Online]. Available: https://www.sernageomin.cl/preguntas-frecuentes-sobre-relaves/

[12] Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2), “Estudios revelan el impacto ambiental de la minería en la Región de Antofagasta desde los 90.” [Online]. Available: https://www.cr2.cl/estudios-revelan-el-impacto-ambiental-de-la-mineria-en-la-region-de-antofagasta-desde-los-90-radio-bio-bio/

[13] Universidad Tecnológica Metropolitana (UTEM), “¿Cuál es el impacto ambiental de los relaves mineros?” [Online]. Available: https://admision.utem.cl/2021/11/08/cual-es-el-impacto-ambiental-de-los-relaves-mineros/

[14] I. Ojeda-Pereira, “Relaves mineros bajo cambio climático: gestión de riesgo de desastres, gobernanza e innovación.” [Online]. Available: https://www.ciperchile.cl/2022/04/13/relaves-mineros-bajo-cambio-climatico-gestion-de-riesgo-de-desastres-gobernanza-e-innovacion/#_ftnref1

[15] F. C. Equipo Programa Tranque, “Avances y retos para la gestión de los depósitos de relaves en Chile,” Santiago, 2018. [Online]. Available: https://fch.cl/wp-content/uploads/2019/05/TRANQUE-2018-1.pdf

[16] Ministerio de Minería, “Decreto Supremo N.º 132: Aprueba Reglamento de Seguridad Minera,” Santiago de Chile, 2004. [Online]. Available: https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=221064

[17] Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile (ICH), “Materiales para el Hormigón.” [Online]. Available: https://ich.cl/unidades/02-materiales-para-el-hormigon/

[18] Cemix, “Características del cemento y sus principales aplicaciones en la construcción.” [Online]. Available: https://www.cemix.com/caracteristicas-cemento-aplicaciones/#Caracteristicas_principales_del_cemento

[19] Instituto Nacional de Normalización (INN), “NCh148.Of68: Cemento – Terminología, clasificación y especificaciones generales,” Santiago de Chile, 1968. [Online]. Available: https://www.cesmec.cl/medios/DIC/normas/NCh148Of68.pdf

[20] BECOSAN, “Cemento Portland: qué es, usos y fabricación.” [Online]. Available: https://www.becosan.com/es/cemento-portland/#Cualidades_del_Cemento_Portland

[21] Promart, “¿Qué es el cemento Portland? Propiedades y usos.” [Online]. Available: https://www.promart.pe/blog/que-es-el-cemento-

portland?srsltid=AfmBOopV3Wv63Z4nrW8EabsWIbfa06q3UDPIeR-pmphg43HJgKvCOnNW

[22] Francisco Soria Santamaría, “Las puzolanas y el ahorro energético en los materiales de construcción,” *Materiales de Construcción*, vol. 33, 1983, [Online]. Available: http://materconstrucc.revistas.csic.es

[23] Francisco Soria Santamaría, “Puzolanas y cementos puzolánicos,” vol. 13, 1963, [Online]. Available: ttp://materconstrucc.revistas.csic.es

[24] Instituto Nacional de Normalización, “NCh161.Of69: Cemento – Puzolana para uso en cementos – Especificaciones,” Santiago de Chile, 1969. [Online]. Available: https://www.inn.cl

[25] M. A. & C. S. Sanjuán, “Introducción a la fabricación y normalización del cemento Portland,” 2014. [Online]. Available: https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/45347/1/2014_Sanjuan_Chinchon_Cemento-Portland.pdf

[26] Instituto Nacional de Normalización (INN), “NCh2256/1.Of2001: Morteros – Morteros para albañilería – Parte 1: Requisitos,” Santiago de Chile, 2001. [Online]. Available: https://www.cesmec.cl/medios/DIC/normas/NCh2256_1Of2001.pdf

[27] E. A. Blanco, “Bloque II: Capítulo 8 - Molienda,” in *Tecnología Mineralúrgica. Bloque II*, 1st ed., España: Universidad Politécnica de Madrid, 2014. [Online]. Available: https://ocw.unican.es/pluginfile.php/2439/course/section/2474/8._molienda.pdf

[28] Codelco Educa, “Molienda: Todo a la juguera,” Codelco Educa. [Online]. Available: https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/artic/20190109/asocfile/20190109005343/molienda_media_t__cnico_060119.pdf

[29] F. Vargas and M. Lopez, “Development of a new supplementary cementitious material from the activation of copper tailings: Mechanical performance and analysis of factors,” *J Clean Prod*, vol. 182, pp. 427–436, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.01.223.

[30] R. Jhajharia, D. Jain, A. Sengar, A. Goyal, and P. R. Soni, “Synthesis of copper powder by mechanically activated cementation,” *Powder Technol*, vol. 301, pp. 10–15, Nov. 2016, doi: 10.1016/j.powtec.2016.05.031.

[31] Z. Wang, H. Chu, J. Wang, E. Feng, Y. Zhang, and X. Lyu, “Mechanical activation of siliceous tailings and its application as cement admixtures,” *Miner Eng*, vol. 177, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.mineng.2021.107366.

[32] A. Saedi, A. Jamshidi-Zanjani, M. Mohseni, A. Khodadadi Darban, and H. Nejati, “Mechanical activation of lead–zinc mine tailings as a substitution for cement in concrete construction,” *Constr Build Mater*, vol. 364, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.129973.

[33] G. Yao, H. Zang, J. Wang, P. Wu, J. Qiu, and X. Lyu, “Effect of mechanical activation on the pozzolanic activity of muscovite,” *Clays Clay Miner*, vol. 67, no. 3, pp. 209–216, Jun. 2019, doi: 10.1007/s42860-019-00019-y.

[34] S. Ramanathan, P. Perumal, M. Illikainen, and P. Suraneni, “Mechanically activated mine tailings for use as supplementary cementitious materials,” *RILEM Technical Letters*, vol. 6, pp. 61–69, Mar. 2021, doi: 10.21809/rilemtechlett.2021.143.

[35] C. Zhang, T. Zhou, Q. Wu, H. Zhu, and P. Xu, “Mechanical Performances and Microstructures of Cement Containing Copper Tailings,” *Asian Journal of Chemistry*, vol. 26, no. 5, pp. 1371–1375, 2014, doi: 10.14233/ajchem.2014.17234.

[36] F. Vargas and G. Rios, “Use of Artificial fine aggregates from copper tailings in mortar: Mechanical Performance,” *Revista Ingeniería de Construcción*, vol. 39, pp. 1–9, 2024, doi: 10.7764/RIC.00133.21.

[37] ASTM International, “ASTM C109/C109M-20: Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens),” 2020. [Online]. Available: https://store.astm.org/c0109_c0109m-20.html

[38] L. Cui, L. Wang, Y. Xu, X. Lou, and H. Wang, “Feasibility evaluation of replacing river sand with copper tailings,” *Sustainability (Switzerland)*, vol. 13, no. 14, Jul. 2021, doi: 10.3390/su13147575.

[39] S. M. Hernández-Ramos *et al.*, “Characterization and effect of mechanical and thermal activation in mining tailings for use as supplementary cementitious material,” *Case Studies in Construction Materials*, vol. 20, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.cscm.2023.e02770.

[40] ASTM International, “ ASTM C618-22: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete,” 2022. [Online]. Available: https://store.astm.org/c0618-22.html

[41] G. Yao, Z. Wang, J. Yao, X. Cong, C. Anning, and X. Lyu, “Pozzolanic activity and hydration properties of feldspar after mechanical activation,” *Powder Technol*, vol. 383, pp. 167–174, May 2021, doi: 10.1016/j.powtec.2021.01.042.

[42] M. G. ; St. J. H. D. Alexander, *Durability of Concrete: Design and Construction*. 2017.

[43] Y. Diaz-Rosero, L. González-Salcedo, and J. Diaz Rosero, “Caracterización de escoria de cobre secundaria y evaluación de su actividad puzolánica,” *Informador Técnico*, vol. 84, no. 2, Mar. 2020, doi: 10.23850/22565035.2696.

[44] Cbb Cementos, “Ficha técnica: Cemento Especial Puzolánico,” Mar. 2023. [Online]. Available: https://cbb.cl/wp-content/uploads/2023/03/Cbb-Ficha-saco-especial-1.pdf

[45] Instituto Nacional de Normalización, “NCh163.Of79: Áridos para morteros y hormigones - Requisitos generales,” 1979. [Online]. Available: https://www.cesmec.cl/medios/DIC/normas/NCh163Of79.pdf

[46] Instituto Nacional de Normalización, “NCh 1498:Hormigón y mortero - Agua de amasado - Clasificación y requisitos,” Santiago de Chile, 2012. [Online]. Available: www.inn.cl

[47] Sika S.A. Chile, “Ficha Técnica: SikaFiber P-6,” Feb. 2014. [Online]. Available: www.sika.cl

[48] ASTM International, “ASTM C1116/C1116M-10a(2015) Standard Specification for Fiber-Reinforced Concrete,” 2015. [Online]. Available: https://store.astm.org/c1116_c1116m-10ar15.html

[49] Asociación Española de Normalización, “UNE-EN 14488-7:2007 - Ensayos de hormigón proyectado. Parte 7: Contenido en fibras del hormigón reforzado con fibras,” 2007. [Online]. Available: https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0038686

[50] V. M. J. V. G. F. Yepes, “Velocidad crítica de giro de un molino de bolas,” 2005.

[51] Atria Innovation, “Microscopía electrónica de barrido (SEM), ¿para qué me sirve?” [Online]. Available: https://atriainnovation.com/blog/microscopia-electronica-de-barrido-sem-utilidades/

[52] GuíaLab, “Determinación de tamaño y distribución de partículas por difracción láser.” [Online]. Available: https://www.guialab.com.ar/notas-tecnicas/determinacion-de-tamano-y-distribucion-de-particulas-por-difraccion-laser/

[53] ASTM International, “Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System),” vol. 11, no. ASTM International, 2011, doi: 10.1520/D2487--11.

[54] Instituto Nacional de Normalización (INN), “NCh158.Of67 Cementos - Ensayo de flexión y compresión de morteros de cemento,” Santiago de Chile, 1968. [Online]. Available: https://tecnohorm.weebly.com/uploads/9/6/2/7/9627075/nch0158-1967.pdf

[55] ASTM International, “ASTM C1437-20. Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar.,” 2020.

[56] Instituto Nacional de Normalización (INN), “NCh1017.Of2009: Hormigón – Confección en obra y curado de probetas para ensayos de compresión, tracción por flexión y por hendimiento,” 2009.

[57] ASTM International, “ASTM C642-21: Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete,” 2021. [Online]. Available: https://store.astm.org/c0642-21.html

[58] ASTM International, “ASTM C78/C78M-18: Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading),” 2018. [Online]. Available: https://store.astm.org/c0078_c0078m-18.html

[59] J. Rashmi Nayak, J. Bochen, and M. Gołaszewska, “Experimental studies on the effect of natural and synthetic fibers on properties of fresh and hardened mortar,” *Constr Build Mater*, vol. 347, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128550.

[60] P. Viera, D. Morillo, and J. Parion, “Influencia de fibras naturales y sintéticas en la permeabilidad de morteros de cemento - arena, y cemento, cal y arena,” *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*, vol. 13, no. 1, pp. 59–71, Jan. 2022, doi: 10.29166/revfig.v13i1.3410.

[61] X. Zhang, H. Wang, and A. Wu, “Study on Correlations between Tailings Particle Size Distribution and Rheological Properties of Filling Slurries,” *Minerals*, vol. 13, no. 9, Sep. 2023, doi: 10.3390/min13091134.

[62] O. Olubajo, O. Osha, O. O. O, O. A. O, E.-N. U. A, and A. H. A, “Effect of water-cement ratio on the mechanical properties of blended cement containing bottom ash and limestone,” vol. 6, no. 12, 2014, [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/334596542

[63] S. Antiohos and S. Tsimas, “Activation of fly ash cementitious systems in the presence of quicklime: Part I. Compressive strength and pozzolanic reaction rate,” *Cem Concr Res*, vol. 34, no. 5, pp. 769–779, May 2004, doi: 10.1016/j.cemconres.2003.08.008.

[64] J. Zhang, Q. Wei, N. Zhang, S. Zhang, and Y. Zhang, “Comparative Study of Iron-Tailings-Based Cementitious Mortars with Incorporated Graphite Ore and Graphite Tailings: Strength Properties and Microstructure,” *Materials*, vol. 16, no. 10, May 2023, doi: 10.3390/ma16103743.

Capítulo 9: Anexos

Anexo 9.1 Curvas granulométricas de los materiales

Aquí se presentan los gráficos de las curvas granulométricas de los materiales esenciales para la fabricación de los morteros.

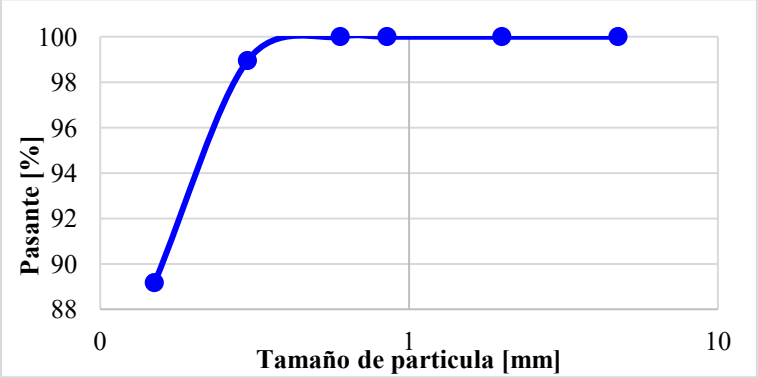


Figura A- 1. Curva granulométrica del cemento

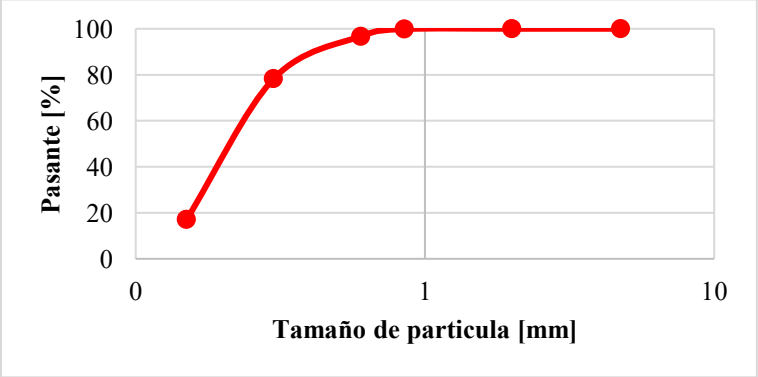


Figura A- 2. Curva granulométrica del relave

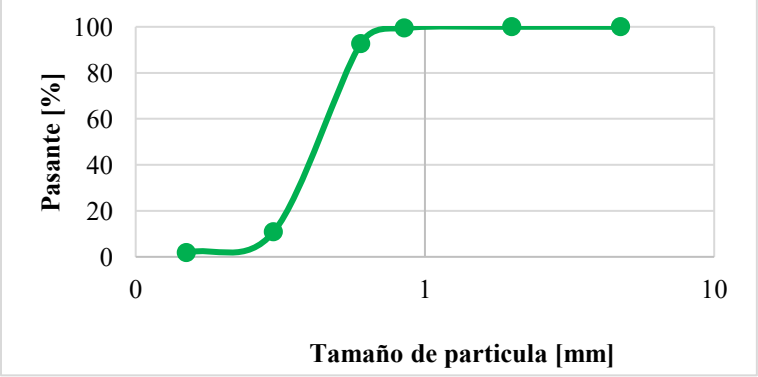


Figura A- 3. Curva granulométrica de la arena

Anexo 9.2 Detalles de las dosificaciones

Este anexo presenta el detalle completo de las dosificaciones utilizadas en las distintas mezclas de mortero elaboradas durante el estudio. Se incluyen las cantidades medidas de cada componente (cemento, relave fino, árido fino y agua), así como las relaciones de diseño empleadas para cada caso.

A continuación, se identifican las abreviaciones utilizadas en las tablas:

- RC: reemplazo de cemento
- C: cemento
- RF: relave fino (< 150 μm)
- AF: árido fino
- A/C: relación agua/cemento
- A/(C+RF): relación agua respecto a la suma de cemento más relave fino
- C/AF: relación entre el cemento y el árido fino
- F: fibra sintética

Asimismo, la nomenclatura de cada muestra incluye una codificación asociada al tiempo de molienda del relave, indicado con las siguientes siglas:

- SM: sin molienda
- 15M: 15 minutos de molienda
- 1H: 1 hora de molienda
- 4H: 4 horas de molienda
- 8H: 8 horas de molienda

A continuación, se presentan las tablas con las diferentes series de dosificaciones:

Tabla A- 1. Dosificación de probetas para el reemplazo de cemento < 150 µm

Muestra	RC [%]	C [g]	RF [g]	AF [g]	Agua [g]	A/C	A/C+RF	C/AF
Control 0,63	0	400	0	1172,82	250	0,63	0,63	0,34
10RC_SM	10	360	40	1172,82	250	0,69	0,63	0,31
20RC_SM	20	320	80	1172,82	250	0,78	0,63	0,27
30RC_SM	30	280	120	1172,82	250	0,89	0,63	0,24
40RC_SM	40	240	160	1172,82	250	1,04	0,63	0,20
10RC_15M	10	360	40	1172,82	250	0,69	0,63	0,31
20RC_15M	20	320	80	1172,82	250	0,78	0,63	0,27
30RC_15M	30	280	120	1172,82	250	0,89	0,63	0,24
40RC_15M	40	240	160	1172,82	250	1,04	0,63	0,20
10RC_1H	10	360	40	1172,82	250	0,69	0,63	0,31
20RC_1H	20	320	80	1172,82	250	0,78	0,63	0,27
30RC_1H	30	280	120	1172,82	250	0,89	0,63	0,24
40RC_1H	40	240	160	1172,82	250	1,04	0,63	0,20
10RC_4H	10	360	40	1172,82	250	0,69	0,63	0,31
20RC_4H	20	320	80	1172,82	250	0,78	0,63	0,27
30RC_4H	30	280	120	1172,82	250	0,89	0,63	0,24
40RC_4H	40	240	160	1172,82	250	1,04	0,63	0,20
10RC_8H	10	360	40	1172,82	250	0,69	0,63	0,31
20RC_8H	20	320	80	1172,82	250	0,78	0,63	0,27
30RC_8H	30	280	120	1172,82	250	0,89	0,63	0,24
40RC_8H	40	240	160	1172,82	250	1,04	0,63	0,20

Tabla A- 2. Dosificación de probetas para el reemplazo de cemento < 150 µm con fibra sintética

Muestra	RC [%]	C [g]	RF [g]	AF [g]	Agua [g]	F [g]	A/C	A/C+ RF	C/AF
Control_F	0	400	0	1172,82	280	0,51	0,70	0,70	0,34
10RC_SM_F	10	360	40	1172,82	280	0,51	0,70	0,70	0,31
20RC_SM_F	20	320	80	1172,82	280	0,51	0,70	0,70	0,27
30RC_SM_F	30	280	120	1172,82	280	0,51	0,70	0,70	0,24
40RC_SM_F	40	240	160	1172,82	280	0,51	0,70	0,70	0,20
10RC_15M_F	10	360	40	1172,82	280	0,51	0,70	0,70	0,31
20RC_15M_F	20	320	80	1172,82	280	0,51	0,70	0,70	0,27
30RC_15M_F	30	280	120	1172,82	280	0,51	0,70	0,70	0,24
40RC_15M_F	40	240	160	1172,82	280	0,51	0,70	0,70	0,20
10RC_1H_F	10	360	40	1172,82	280	0,51	0,70	0,70	0,31
20RC_1H_F	20	320	80	1172,82	280	0,51	0,70	0,70	0,27
30RC_1H_F	30	280	120	1172,82	280	0,51	0,70	0,70	0,24
40RC_1H_F	40	240	160	1172,82	280	0,51	0,70	0,70	0,20
10RC_4H_F	10	360	40	1172,82	280	0,51	0,70	0,70	0,31
20RC_4H_F	20	320	80	1172,82	280	0,51	0,70	0,70	0,27
30RC_4H_F	30	280	120	1172,82	280	0,51	0,70	0,70	0,24
40RC_4H_F	40	240	160	1172,82	280	0,51	0,70	0,70	0,20
10RC_8H_F	10	360	40	1172,82	280	0,51	0,70	0,70	0,31
20RC_8H_F	20	320	80	1172,82	280	0,51	0,70	0,70	0,27
30RC_8H_F	30	280	120	1172,82	280	0,51	0,70	0,70	0,24
40RC_8H_F	40	240	160	1172,82	280	0,51	0,70	0,70	0,20

Tabla A- 3. Dosificación de probetas para el reemplazo de cemento del 20 % < 150 µm con ajuste en la relación de agua/cemento

Muestra	RC [%]	C [g]	RF [g]	AF [g]	Agua [g]	A/C	A/C+RF	C/AF
Control 0,70	0	400	0	1172,82	280	0,70	0,70	0,34
20RC_SM0,70	20	320	80	1172,82	280	0,88	0,70	0,27
20RC_15M0,70	20	320	80	1172,82	280	0,88	0,70	0,27
20RC_1H0,70	20	320	80	1172,82	280	0,88	0,70	0,27
20RC_4H0,70	20	320	80	1172,82	280	0,88	0,70	0,27
20RC_8H0,70	20	320	80	1172,82	280	0,88	0,70	0,27

Tabla A- 4. Dosificación de probetas para el reemplazo de cemento del 10 % < 150 µm con cal viva

Muestra	RC [%]	C [g]	RF [g]	AF [g]	Agua [g]	A/C	A/C+RF	C/AF
10RC_SM_C5	10	360	40	1172,82	250	0,69	0,63	0,31
10RC_15M_C5	10	360	40	1172,82	250	0,69	0,63	0,31
10RC_1H_C5	10	360	40	1172,82	250	0,69	0,63	0,31
10RC_4H_C5	10	360	40	1172,82	250	0,69	0,63	0,31
10RC_8H_C5	10	360	40	1172,82	250	0,69	0,63	0,31

Tabla A- 5. Dosificación de probetas para el reemplazo de cemento del 20 % para distintos tipos de relaves molidos

Muestra	RC [%]	C [g]	RF [g]	AF [g]	Agua [g]	A/C	A/C+RF	C/AF
T20RC_15M	20	320	80	1172,82	250	0,78	0,63	0,27
T20RC_1H	20	320	80	1172,82	250	0,78	0,63	0,27
G20RC_15M	20	320	80	1172,82	250	0,78	0,63	0,27
G20RC_1H	20	320	80	1172,82	250	0,78	0,63	0,27
GF20RC_15M	20	320	80	1172,82	250	0,78	0,63	0,27
GF20RC_1H	20	320	80	1172,82	250	0,78	0,63	0,27

Tabla A- 6. Dosificación de probetas para el reemplazo de árido > 150 µm

Muestra	RA [%]	C [g]	AF [g]	AG [g]	Agua [g]	A/C	A/C+RF	C/AF
20RA	20	400	938,26	234,56	250	0,63	0,63	0,43
35RA	35	400	762,33	410,49	250	0,63	0,63	0,52
50RA	50	400	586,41	586,41	250	0,63	0,63	0,68
65RA	65	400	410,49	762,33	250	0,63	0,63	0,97
80RA	80	400	234,56	938,26	250	0,63	0,63	1,71
100RA	100	400	0,00	1172,83	250	0,63	0,63	-

Tabla A- 7. Dosificación de probetas para el reemplazo de árido > 150 µm con ajuste en la relación agua/cemento

Muestra	RA [%]	C [g]	AF [g]	AG [g]	Agua [g]	A/C	A/C+RF	C/AF
65RA 0,70	65	400	410,49	762,33	280	0,70	0,70	0,97
65RA 0,75	65	400	410,49	762,33	300	0,75	0,75	0,97

Anexo 9.3 Molienda de los relaves

Se detallan a continuación en la tabla las cantidades de bolas según el diámetro y una imagen del molino utilizado.

Tabla A- 8. Número de bolas en el molino

Diámetro de las bolas (in)	N° de bolas
1 1/2	12
1 1/4	14
1	11
7/8	15
3/4	20
5/8	15

Figura A- 4. Molino de bolas utilizado para la molienda

Para la determinación de la velocidad crítica se utilizó la siguiente ecuación 2:

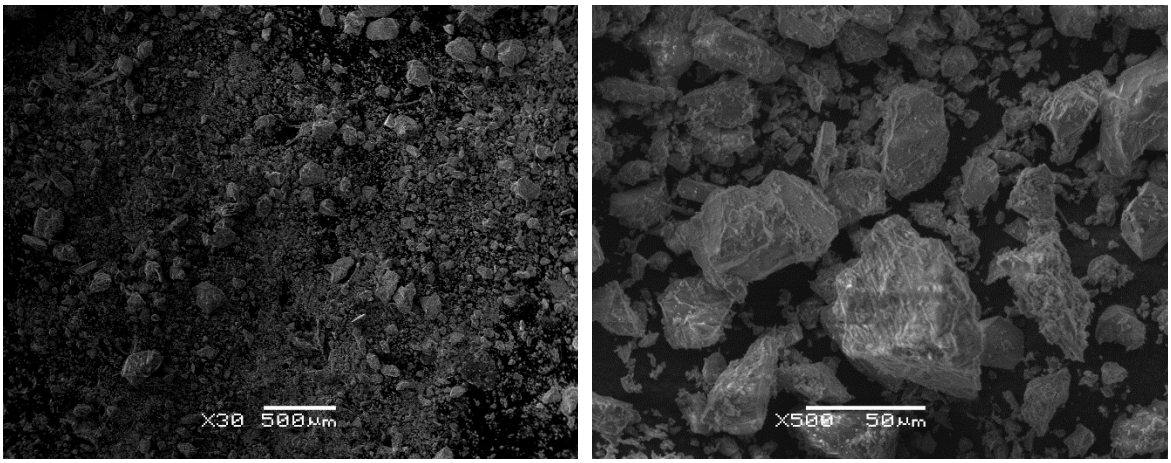
$$N_c = \frac{76{,}6}{\sqrt{D}} \tag{2}$$

- N_c: velocidad crítica del molino, en revoluciones por minuto
- D: diámetro interno del molino, en metros

Anexo 9.4 Imágenes SEM

Este anexo presenta las micrografías SEM que fueron capturadas con aumentos variables con el fin de observar en detalle la morfología superficial, textura y efectos del tratamiento mecánico sobre las partículas. A continuación, se muestran todas las figuras clasificadas por tipo de muestra y condición de molienda.

- Relave completo, sin tamizaje.

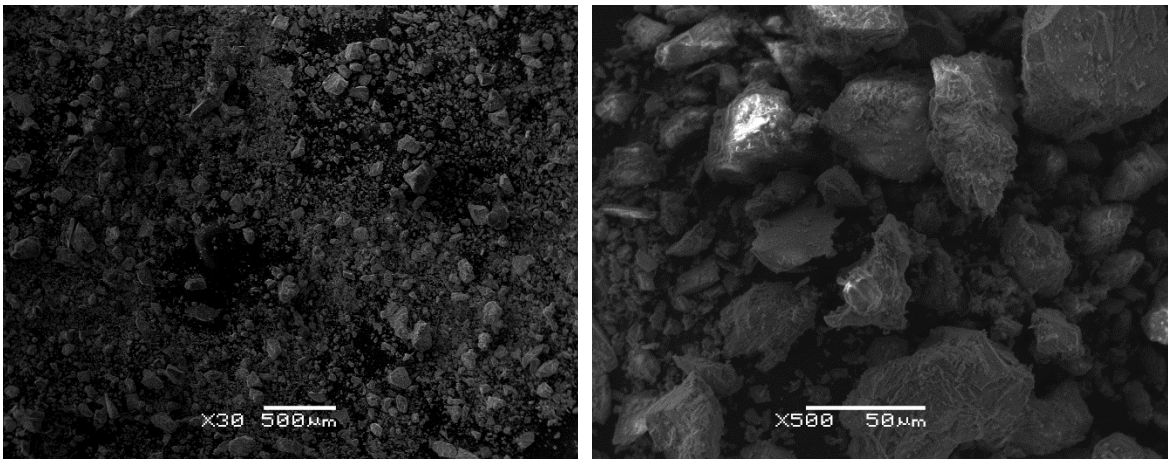


a. Aumento de X30 con escala a 500 µm

b. Aumento de X500 con escala a 50 µm

Figura A- 5. SEM del relave completo

- Relave fino (< 150 µm)

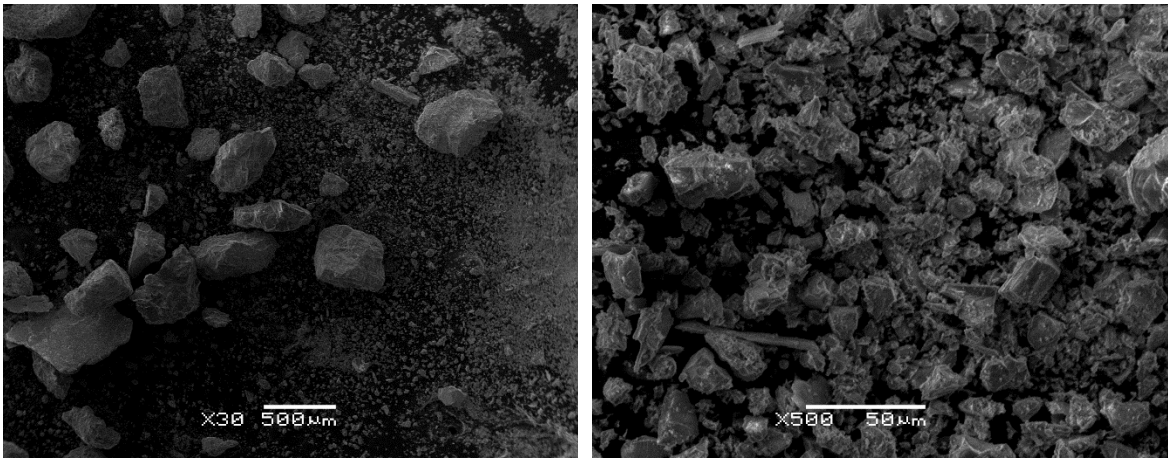


a. Aumento de X30 con escala a 500 µm

b. Aumento de X500 con escala a 50 µm

Figura A- 6. SEM del relave fino (< 150 µm)

- Relave grueso (> 150 µm)



a. Aumento de X30 con escala a 500 µm

b. Aumento de X500 con escala a 50 µm

Figura A- 7. SEM del relave grueso (> 150 µm)

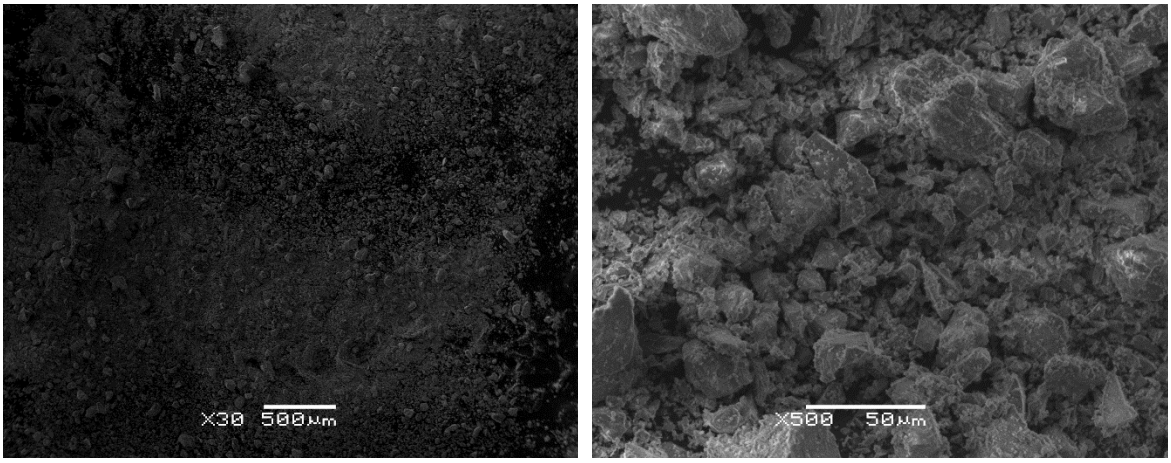
- Relave fino molido a 15 minutos

a. Aumento de X30 con escala a 500 µm

b. Aumento de X500 con escala a 50 µm

Figura A- 8. Relave fino molido a 15 minutos

- Relave fino molido a 1 hora

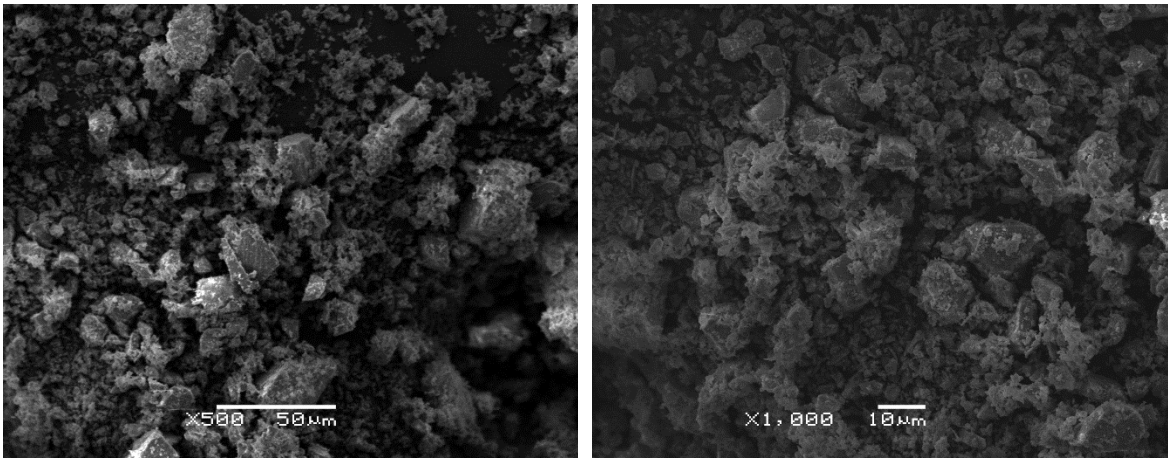


a. Aumento de X30 con escala a 500 µm

b. Aumento de X500 con escala a 50 µm

Figura A- 9. Relave fino molido a 1 hora

- Relave fino molido a 4 horas

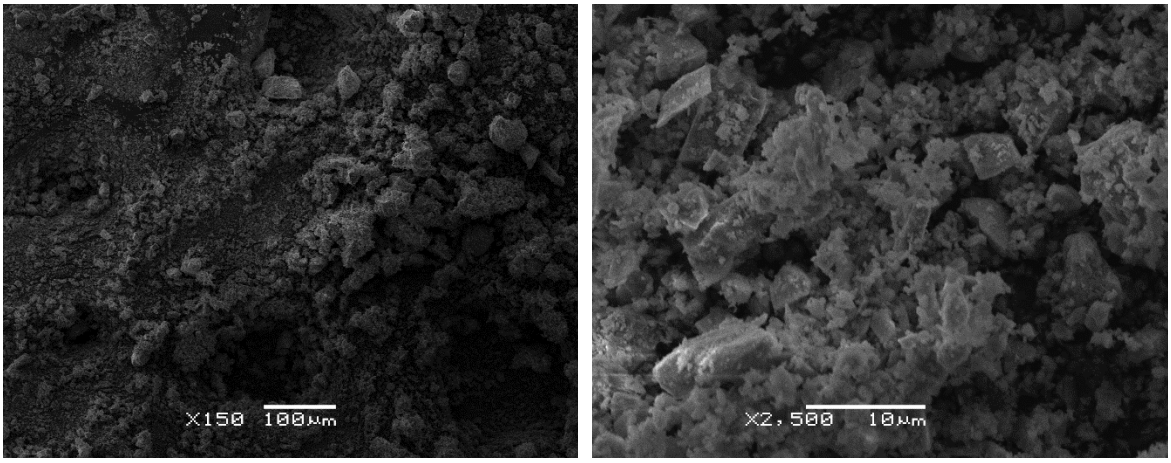


a. Aumento de X500 con escala a 50 µm

b. Aumento de X1,000 con escala a 10 µm

Figura A- 10. Relave fino molido a 4 horas

- Relave fino molido a 8 horas



a. Aumento de X150 con escala a 100 µm

Aumento de X2,500 con escala a 10 µm

Figura A- 11. Relave fino molido 8 horas

Anexo 9.5 Resultados de DRX

Este anexo presenta los difractogramas obtenidos mediante análisis de Difracción de Rayos X (DRX), correspondientes a las muestras de relave sometidas a distintos tiempos de molienda.

Estos datos respaldan datos mineralógicos entregados en la Tabla 10 del Capítulo 4, contribuyendo al análisis de la influencia del proceso de molienda sobre la reactividad potencial del mineral.

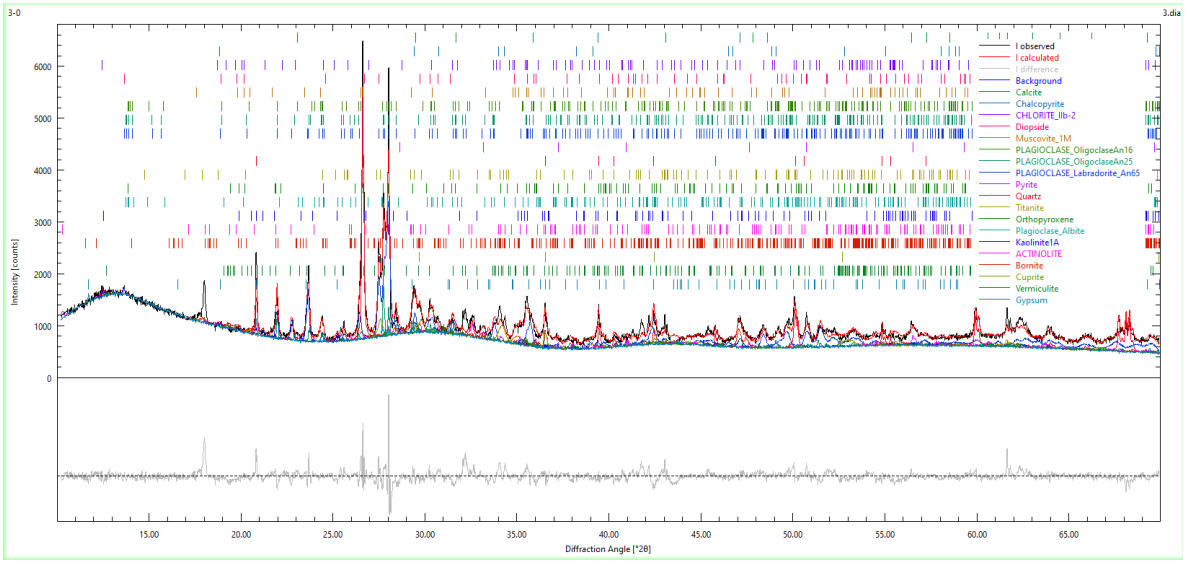


Figura A- 12. Difractograma DRX del relave completo

Figura A- 13. Difractograma DRX del relave fino sin moler (<150 µm)

Figura A- 14. Difractograma DRX del relave de 15 minutos con molienda

Figura A- 15. Difractograma DRX del relave de 1 hora con molienda

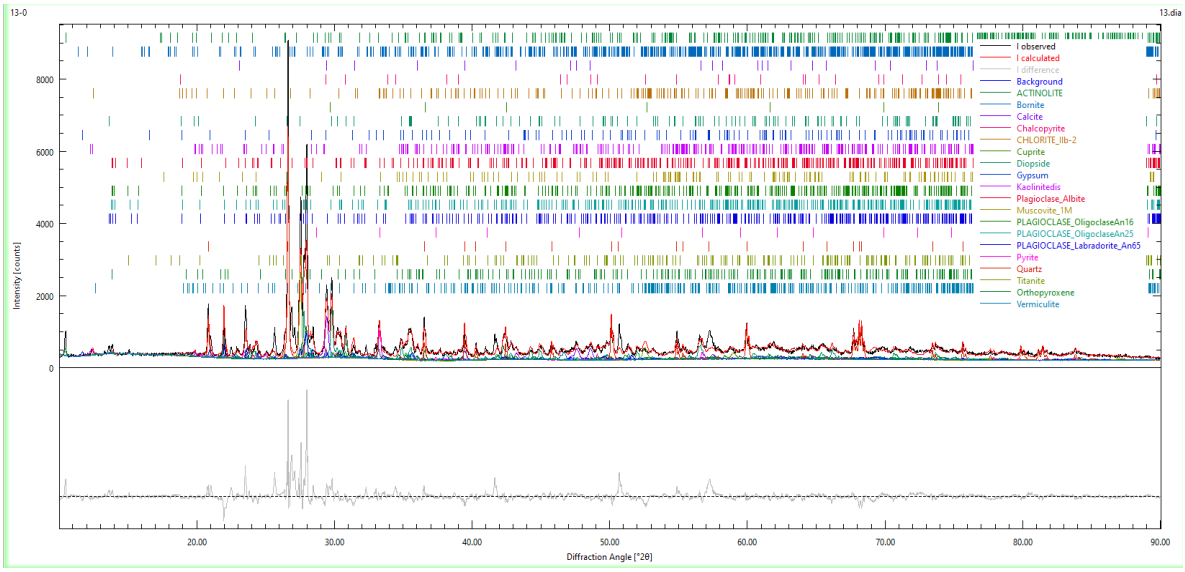


Figura A- 16. Difractograma DRX del relave de 4 horas con molienda

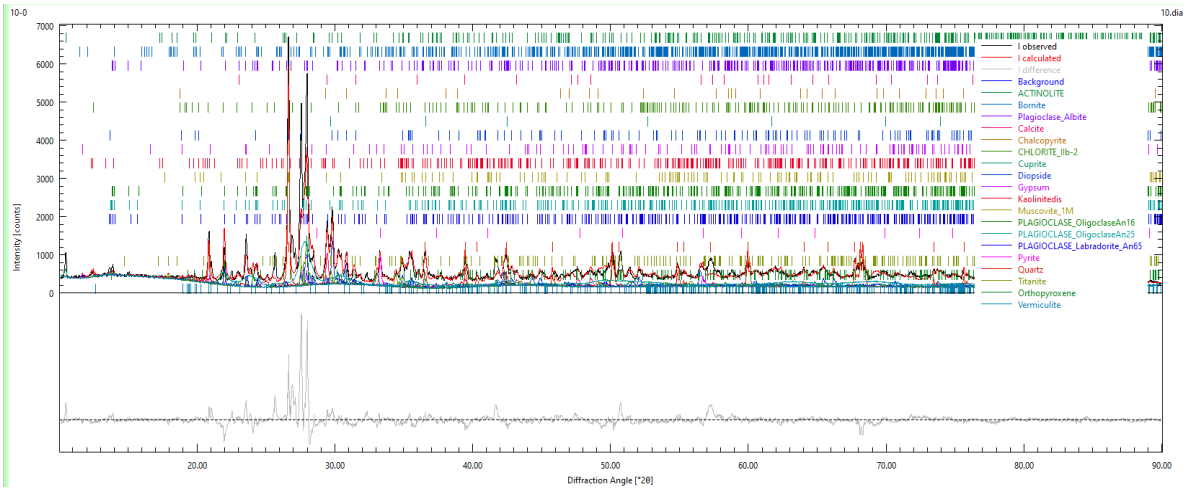


Figura A- 17. Difractograma DRX del relave de 8 horas con molienda

Anexo 9.6 Resultados de difracción láser

Para determinar el coeficiente de uniformidad y curvatura de los relaves, fue necesario determinar los diámetros de tamaño de partícula según la siguiente ecuación:

$$D_x = \frac{D_2 - D_1}{log_{\%2} - log_{\%1}} * (log_{\%x} - log_{\%1}) + D_1 \quad (3)$$

Donde:

- D_x es el diámetro del tamaño de las partículas
- D_1 y D_2 corresponden al diamtro de la aberturas de los tamices conocidos que definen el intervalo en el que se encuentra el valor deseado D_x
- $\%_1$ y $\%_2$ son los porcentajes de material pasante correspondientes a D_1 y D_2, respectivamente
- $\%_x$ es el porcentaje del material pasante, que corresponde al valor D_x

Finalmente, mediante las ecuaciones 4 y 5 se calculan los coeficientes de uniformidad y curvatura:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (4)$$

$$C_C = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} * D_{60}} \quad (5)$$

- C_u es el coeficiente de uniformidad
- C_C es el coeficiente de curvatura

Así los resultados obtenidos por estas ecuaciones son los de la siguiente Tabla:

Tabla A- 9. Resultados de distribución de tamaño de partícula y coeficientes granulométricos para relaves según tiempo de molienda

Relaves	Diámetros efectivos					Coeficientes	
	D80 [µm]	D60 [µm]	D50 [µm]	D30 [µm]	D10 [µm]	Cu	Cc
Sin molienda	95,70	56,67	42,90	21,30	5,91	9,527	1,318
15 minutos	73,50	46,43	35,76	17,67	4,53	10,26	1,49
1 hora	51,48	32,41	23,86	11,71	3,06	10,61	1,38
4 horas	26,42	14,82	10,80	4,68	1,72	8,63	0,86
8 horas	19,80	9,92	6,92	3,02	1,28	7,72	0,72
Grueso 15 minutos	64,39	28,62	20,25	10,25	2,93	9,76	1,25
Grueso 1 hora	37,35	19,61	14,67	7,75	2,37	8,28	1,29
Total 15 minutos	78,09	41,35	30,34	14,38	3,61	11,45	1,39
Total 1 hora	52,61	28,78	20,14	9,74	2,59	11,10	1,27
Grueso y fino 15 minutos	37,22	21,05	16,16	8,85	2,71	7,76	1,37
Grueso y fino 1 hora	94,03	32,81	22,25	10,77	2,98	11,03	1,19

Tabla A- 10. Resultados de distribución de tamaño de partícula y coeficientes granulométricos para las mezclas con reemplazo de árido por relave

Relaves	Diámetros efectivos					Coeficientes	
	D80 [µm]	D60 [µm]	D50 [µm]	D30 [µm]	D10 [µm]	Cu	Cc
20RA	422,82	280,93	245,08	186,52	149,01	1,89	0,83
35RA	461,86	328,37	278,08	201,38	149,85	2,19	0,82
50RA	489,43	371,21	323,28	224,97	151,64	2,45	0,90
65RA	509,15	403,56	359,28	267,75	150,40	2,68	1,18
80RA	523,95	428,76	387,87	317,40	180,04	2,38	1,31
100RA	538,75	454,77	417,83	352,71	280,20	1,62	0,98

Anexo 9.7 Procedimiento de cómo hacer los morteros

Este anexo detalla el procedimiento completo seguido de la confección de los morteros utilizados en el presente estudio, conforme a la norma NCh 158.

1. Pesaje de materiales:

   Cada componente (cemento, relave, árido fino, agua y aditivos como cal o fibra) fue pesado de forma individual utilizando una balanza digital de precisión, según las proporciones establecidas para cada dosificación. En la Figura A- 18 se presentan los materiales principales pesados.

a. Agua b. Cemento c. Relave fino d. Áridos finos

Figura A- 18. Peso de materiales para realizar una mezcla

2. Mezclado de la dosificación:

   La mezcla de los morteros fue realizada siguiendo lo establecido en la norma, utilizando una batidora eléctrica de eje vertical, como se ve en la Figura A- 19. El proceso se desarrolló siguiendo los pasos:

   I. Se vierte el agua y el cemento en el recipiente del mezclador.
   II. Se pone en marcha el mezclador a velocidad lenta durante 30 segundos.
   III. Pasado ese tiempo, se incorpora gradualmente la arena y/o relave desde la fracción más fina a la más gruesa, en un lapso aproximado de 30 segundos.
   IV. Una vez agregados todos los materiales secos, se aumenta a velocidad alta durante 30 segundos.

V. Luego, se detiene el mezclador por 1 minuto y 30 segundos, durante el cual se raspa el mortero adherido a las paredes y se deja reposar,

VI. Finalmente, se reanuda la mezcla a velocidad alta durante 1 minuto.

Este procedimiento asegura la homogeneidad del mortero y su adecuada trabajabilidad para los siguientes pasos del modelo.

Figura A- 19. Batidora de eje vertical utilizada para la elaboración de las mezclas

3. Evaluación de trabajabilidad:

La trabajabilidad fue determinada mediante el ensayo de flujo, conforme a la norma ASTM C1437 (Flow Table Test). El procedimiento fue el siguiente:

I. Introducir aproximadamente 25 mm de mezcla en el molde tipo cono y apisonar con 20 golpes uniformes.

II. Llenar el resto de molde y aplicar nuevamente 20 golpes.

III. Retirar el exceso y alisar la superficie.

IV. Retirar el molde y dejar reposar 1 minuto.

V. Aplicar 25 golpes en 15 segundos con la mesa de flujo.

VI. Medir los cuatro diámetros del mortero expandido.

En la Figura A- 20 muestra una de las mezclas evaluadas inmediatamente después de retirar el molde.

Figura A- 20. Medición del mortero tras el ensayo de trabajabilidad (Flow Test)

4. Moldeo de probetas:

   El moldeo de las probetas se realizó utilizando moldes prismáticos de tres compartimientos con dimensiones de 40 x 40 x 160 mm, conforme a lo establecido por la norma NCh 158.

   En la Figura A- 21 se observa la mesa vibratoria eléctrica utilizada durante el moldeo de las probetas. La mezcla se colocó en dos capas y fue compactada aplicando vibración por aproximadamente 7 a 10 segundos, con el objetivo de asegurar una adecuada compactación y eliminación de burbujas.

Figura A- 21. Máquina vibratoria utilizada para el moldeo de probetas

5. Fraguado y curado:

   Las probetas fueron cubiertas con una lámina plástica y dejadas en reposo durante 24 horas para permitir el fraguado inicial, evitando la perdida de humedad, como se aprecia en la Figura A- 22.

Luego, se desmoldaron, se pesaron (como se observa en la Figura A- 23) y midieron con un pie de metro, y fueron sometidas a curado por inmersión según la norma NCh 1017, por periodos de 28 y 56 días.

Una vez finalizado el curado, se secaron en un horno y se volvieron a pesar, conforma a la norma ASTM C642, como se ve en la Figura A- 24.

Figura A- 22. Probeta después del fraguado, previo a ser medida y pesada

Figura A- 23. Probeta siendo pesada luego del curado

Figura A- 24. Horno utilizado para el secado de muestras

Anexo 9.8 Ensayos de resistencia

Una vez finalizado el proceso de curado y secado, las probetas sometidas a los ensayos de resistencia a la flexión y a la compresión, de acuerdo con lo indicado en la sección 4.6 del presente informe.

El ensayo de flexión se realizó mediante el método de carga en tres puntos, utilizando la maquina INSTRON modelo 8801. En la Figura A- 25 muestra como quedan las probetas después de haber ejecutado el ensayo de flexión y la Figura A- 26 se encuentra el equipo utilizado para este ensayo.

Figura A- 25. Probetas luego del ensayo de flexión

Figura A- 26. Máquina de flexión INSTRON 8801

Tras la rotura por flexión, cada probeta fue divida en dos mitades, las cuales fueron ensayadas a compresión en la maquina MATEST modelo C088-11N. En la Figura A- 27 se observa como quedan las muestras después del ensayo realizado y en la Figura A- 28 se encuentra el equipo utilizado.

Figura A- 27. Probetas después de terminar en el ensayo de compresión

Figura A- 28. Máquina de compresión MATEST modelo C088-11N

Anexo 9.9 Resultados de los ensayos de trabajabilidad

En este anexo se presentan los valores numéricos obtenidos del ensayo del cono de Abrams según la norma ASTM C1437, para todas las mezclas realizadas. Estos datos corresponden a los mismo utilizados para construir las figuras del apartado 5.1 del Capítulo 5.

Tabla A- 11. Resultados del cono de Abrams para el reemplazo de cemento < 150 µm

Muestra	Trabajabilidad [mm]				
	Sin molienda	15 minutos de molienda	1 hora de molienda	4 horas de molienda	8 horas de molienda
Control 0,63	13,00	-	-	-	-
10RC	11,00	10,00	15,00	11,00	7,50
20RC	10,50	5,50	17,00	12,00	14,00
30RC	7,50	9,50	12,00	13,50	15,00
40RC	6,00	27,50	14,50	13,50	22,50

Tabla A- 12. Resultados del cono de Abrams para el reemplazo de árido > 150 µm

Muestra	Trabajabilidad [mm]
20RA	11,50
35RA	13,50
50RA	9,50
65RA	10,10
80RA	4,50
100RA	6,00

Tabla A- 13. Resultados del cono de Abrams para el reemplazo de cemento < 150 µm con fibra sintética

Muestra	Trabajabilidad [mm]				
	Sin molienda	15 minutos de molienda	1 hora de molienda	4 horas de molienda	8 horas de molienda
Control_F	35,00	-	-	-	-
10RC_F	34,50	34,00	35,50	37,00	31,00
20RC_F	33,50	31,00	39,00	37,50	31,00
30RC_F	32,50	27,50	31,00	26,50	43,40
40RC_F	28,00	32,00	32,50	41,00	49,00

Tabla A- 14. Resultados del cono de Abrams para el reemplazo de cemento del 20 % < 150 µm con ajuste en la relación agua/cemento

Muestra	Trabajabilidad [mm]				
	Sin molienda	15 minutos de molienda	1 hora de molienda	4 horas de molienda	8 horas de molienda
Control 0,70	34,00	-	-	-	-
20RC 0,70	19,50	27,50	30,00	39,00	35,50

Tabla A- 15. Resultados del cono de Abrams para el reemplazo de cemento del 10 % < 150 µm con cal viva

Muestra	Trabajabilidad [mm]				
	Sin molienda	15 minutos de molienda	1 hora de molienda	4 horas de molienda	8 horas de molienda
10RC_C5	9,50	7,50	10,00	16,00	11,50

Tabla A- 16. Resultados del cono de Abrams para el reemplazo de cemento del 20 % para distintos tipos de relaves molidos

Muestra	Trabajabilidad [mm]					
	Relave total molido		Relave grueso molido		Relave grueso y fino molido	
	15M	1H	15	1H	15M	1H
20RC 0,63	5,50	4,00	9,50	13,50	16,00	28,00

Tabla A- 17. Resultados del cono de Abrams para el reemplazo de árido > 150 µm con ajuste en la relación agua/cemento

Muestra	Trabajabilidad [mm]
65RA 0,70	26,50
65RA 0,75	34,00

Anexo 9.10 Resultados de la densidad

En este anexo se presentan los valores de densidad obtenidos para cada una de las mezclas de mortero evaluadas calculadas a partir de su masa y volumen luego de 24 horas desde su confección.

Primero se determina el volumen con la siguiente ecuación 4:

$$V = b * h * j \tag{6}$$

Donde:

- b: ancho promedio de la probeta medido en milímetro
- h: altura promedio de la probeta medido en milímetro
- l: largo promedio de la probeta medido en milímetro

Luego, para la densidad se utilizó la ecuación 7:

$$p = \frac{m}{v} \tag{7}$$

Donde:

- m: masa de la probeta en gramos
- v: volumen de la probeta en centímetros cúbicos

Tabla A- 18. Densidad para el reemplazo de cemento < 150 µm

Muestra	Densidad (g/m^3)				
	Sin molienda	15 minutos de molienda	1 hora de molienda	4 horas de molienda	8 horas de molienda
Control 0,63	2,134	-	-	-	-
10RC	2,073	2,121	2,112	2,107	2,097
20RC	2,085	2,084	2,116	2,087	2,111
30RC	2,106	2,083	2,121	2,108	2,111
40RC	2,110	2,111	2,123	2,134	2,133

Tabla A- 19. Densidad para el reemplazo de árido > 150 µm

Muestra	Densidad (g/m^3)
20RA	2,122
35RA	2,154
50RA	2,161
65RA	2,138
80RA	2,123
100RA	2,104

Tabla A- 20. Densidad para el reemplazo de cemento < 150 µm con fibra sintética

Muestra	Densidad (g/m^3)				
	Sin molienda	15 minutos de molienda	1 hora de molienda	4 horas de molienda	8 horas de molienda
Control_F	2,123	-	-	-	-
10RC_F	2,123	2,198	2,137	2,126	2,147
20RC_F	2,101	2,139	2,114	2,116	2,141
30RC_F	2,096	2,134	2,117	2,118	2,243
40RC_F	2,091	2,106	2,152	2,210	2,113

Tabla A- 21. Densidad para el reemplazo de cemento del 20 % < 150 µm con ajuste en la relación agua/cemento

Muestra	Densidad (g/m^3)				
	Sin molienda	15 minutos de molienda	1 hora de molienda	4 horas de molienda	8 horas de molienda
Control 0,70	2,323	-	-	-	-
20RC 0,70	2,091	2,108	2,127	2,119	2,159

Tabla A- 22. Densidad para el reemplazo de cemento del 10 % < 150 µm con cal viva

Muestra	Densidad (g/m^3)				
	Sin molienda	15 minutos de molienda	1 hora de molienda	4 horas de molienda	8 horas de molienda
10RC_C5	2,084	2,082	2,091	2,102	2,100

Tabla A- 23. Densidad para el reemplazo de cemento del 20 % para distintos tipos de relaves molidos

Muestra	Densidad (g/m^3)					
	Relave total molido		Relave grueso molido		Relave grueso y fino molido	
	15M	1H	15	1H	15M	1H
20RC 0,63	2,057	2,173	2,069	2,098	2,105	2,112

Tabla A- 24. Densidad para el reemplazo de árido > 150 µm con ajuste en la relación agua/cemento

Muestra	Densidad (g/m^3)
65RA 0,70	2,098
65RA 0,75	2,133

Anexo 9.11 Resultados de resistencia a la flexión

En este anexo se detallan los resultados para todas las dosificaciones de morteros que se realizaron.

Tabla A- 25. Resistencia a la flexión para el reemplazo de cemento < 150 µm

Muestra	Resistencia a la flexión [MPa]				
	Sin molienda	15 minutos de molienda	1 hora de molienda	4 horas de molienda	8 horas de molienda
Control 0,63	6,037	-	-	-	-
10RC	5,314	6,072	5,054	4,836	4,980
20RC	4,645	4,276	4,046	5,049	4,297
30RC	4,522	3,534	4,400	3,873	4,073
40RC	3,256	3,185	3,811	3,766	3.409

Tabla A- 26. Resistencia a la flexión para el reemplazo de árido > 150 µm

Muestra	Resistencia a la flexión [MPa]
20RA	6,778
35RA	7,664
50RA	7,288
65RA	5,931
80RA	6,134
100RA	4,990

Tabla A- 27. Resistencia a la flexión para el reemplazo de cemento < 150 µm con fibra sintética

Muestra	Resistencia a la flexión [MPa]				
	Sin molienda	15 minutos de molienda	1 hora de molienda	4 horas de molienda	8 horas de molienda
28 días de curado					
Control_F	8,677	-	-	-	-
10RC_F	7,863	7,860	8,160	8,457	7,577
20RC_F	7,136	6,880	7,294	6,289	6,811
30RC_F	6,112	5,870	6,817	6,812	7,114
40RC_F	5,102	5,628	5,554	5,990	6,008
56 días de curado					
Control_F	5,913	-	-	-	-
10RC_F	6,390	5,918	5,756	6,167	5,978
20RC_F	6,332	5,879	5,399	6,889	7,137
30RC_F	7,024	5,344	6,601	5,107	5,629
40RC_F	5,977	4,697	5,756	5,132	5,980

Tabla A- 28. Resultados a la flexión para el reemplazo de cemento del 20 % < 150 µm con ajuste en la relación agua/cemento

Muestra	Resistencia a la flexión [MPa]				
	Sin molienda	15 minutos de molienda	1 hora de molienda	4 horas de molienda	8 horas de molienda
28 días de curado					
Control 0,70	5,349	-	-	-	-
20RC 0,70	4,141	4,448	4,717	5,295	4,268
56 días de curado					
Control 0,70	5,721	-	-	-	-
20RC 0,70	4,310	3,839	4,062	4,318	3,571

Tabla A- 29. Resultados a la flexión para el reemplazo de cemento del 10 % < 150 µm con cal viva

Muestra	Resistencia a la flexión [MPa]				
	Sin molienda	15 minutos de molienda	1 hora de molienda	4 horas de molienda	8 horas de molienda
28 días de curado					
10RC_C5	5,563	5,257	5,013	5,567	6,516
56 días de curado					
10RC_C5	5,000	5,083	4,207	6,007	8,179

Tabla A- 30. Resultados a la flexión para el reemplazo de cemento del 20 % para distintos tipos de relaves molidos

Muestra	Resistencia a la flexión [MPa]					
	Relave total molido		Relave grueso molido		Relave grueso y fino molido	
	15M	1H	15	1H	15M	1H
28 días de curado						
20RC 0,63	2,775	3,332	2,822	2,885	5,670	5,436
56 días de curado						
20RC 0,63	3,280	3,289	3,079	2,678	5,934	5,061

Tabla A- 31. Resultados a la flexión para el reemplazo de árido > 150 µm con ajuste en la relación agua/cemento

Muestra	Resistencia a la flexión [MPa]
28 días de curado	
65RA 0,70	9,226
65RA 0,73	9,426
56 días de curado	
65RA 0,70	7,106
65RA 0,75	7,264

Anexo 9.12 resultados de resistencia a la compresión

En este anexo se detallan los resultados de las resistencia a compresión para todas las dosificaciones de morteros que se realizaron, junto con el Índice de actividad puzolánica (IAR).

Tabla A- 32. Resistencia a la compresión para el reemplazo de cemento < 150 µm para 28 días de curado

Muestra	Resistencia a la compresión [MPa]				
	Sin molienda	15 minutos de molienda	1 hora de molienda	4 horas de molienda	8 horas de molienda
Control 0,63	23,069	-	-	-	-
10RC	22,481	24,172	19,746	17,323	19,134
20RC	17,934	18,138	17,167	17,802	18,546
30RC	16,375	14,216	13,832	16,771	16,663
40RC	12,080	11,876	11,852	15,859	14,935

Tabla A- 33. Resultados de IAR [%] para el reemplazo de cemento < 150 µm para 28 días de curado

Muestra	IAR [%]				
	Sin molienda	15 minutos de molienda	1 hora de molienda	4 horas de molienda	8 horas de molienda
10RC	97	105	86	75	83
20RC	78	79	74	77	80
30RC	71	62	60	73	72
40RC	52	51	51	69	65

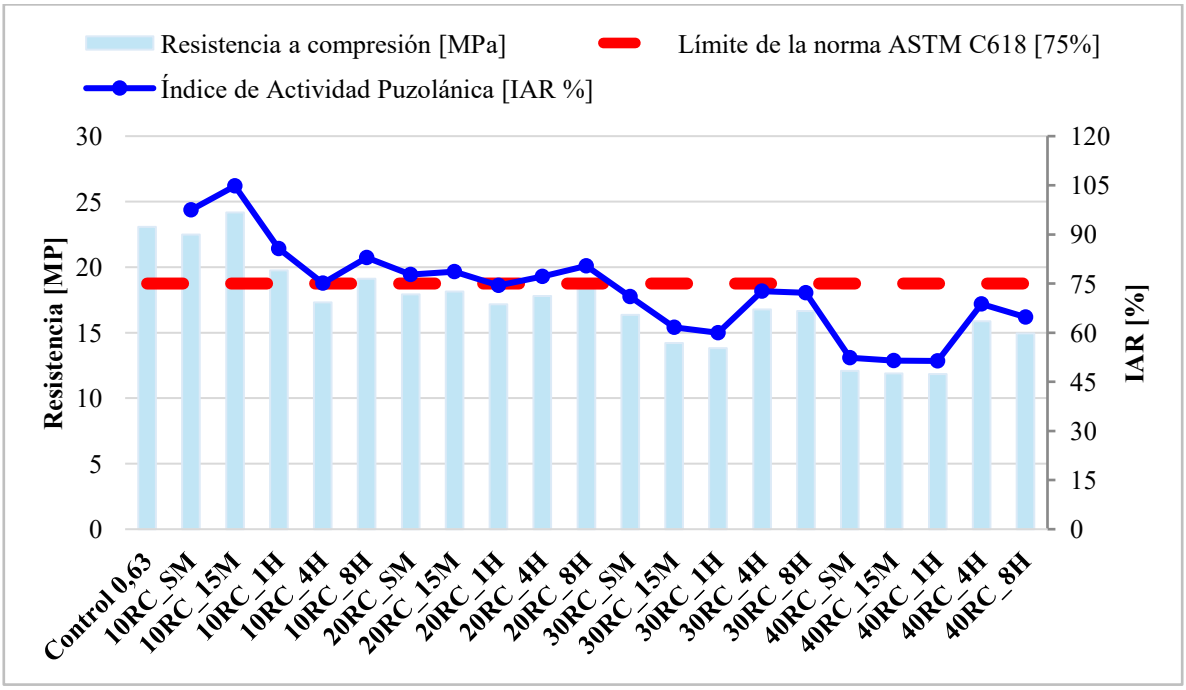


Figura A- 29. Comparación entre la resistencia a compresión y el índice de actividad puzolánica (IAR) para el reemplazo de cemento < 150 µm para 28 días de curado

Tabla A- 34. Resistencia a la compresión para el reemplazo de árido > 150 µm

Muestra	Resistencia a la compresión [MPa]
20RA	24,232
35RA	26,212
50RA	23,393
65RA	24,472
80RA	24,009
100RA	21,533

Tabla A- 35. Resistencia a la compresión para el reemplazo de cemento < 150 µm con fibra sintética para 28 y 56 días de curado

Muestra	Resistencia a la compresión [MPa]				
	Sin molienda	15 minutos de molienda	1 hora de molienda	4 horas de molienda	8 horas de molienda
28 días de curado					
Control_F	32,768	-	-	-	-
10RC_F	30,905	30,590	28,863	28,008	26,803
20RC_F	24,417	23,222	27,144	26,506	26,946
30RC_F	20,127	20,746	24,130	22,646	20,442
40RC_F	17,148	17,085	17,427	15,574	18,129
56 días de curado					
Control_F	36,186	-	-	-	-
10RC_F	31,454	32,030	26,578	26,110	30,536
20RC_F	22,367	24,940	24,994	24,706	22,204
30RC_F	24,022	18,354	20,819	18,948	19,848
40RC_F	16,572	13,910	17,707	17,670	14,971

Tabla A- 36.Resultados de IAR [%] para el reemplazo de cemento < 150 µm con fibra sintética para 28 y 56 días de curado

Muestra	IAR [%]				
	Sin molienda	15 minutos de molienda	1 hora de molienda	4 horas de molienda	8 horas de molienda
28 días de curado					
10RC_F	94	93	88	85	82
20RC_F	78	71	83	81	82
30RC_F	61	63	74	69	62
40RC_F	52	52	53	48	55
56 días de curado					
10RC_F	87	89	73	72	84
20RC_F	62	69	69	68	61
30RC_F	66	51	58	52	55
40RC_F	46	38	49	49	41

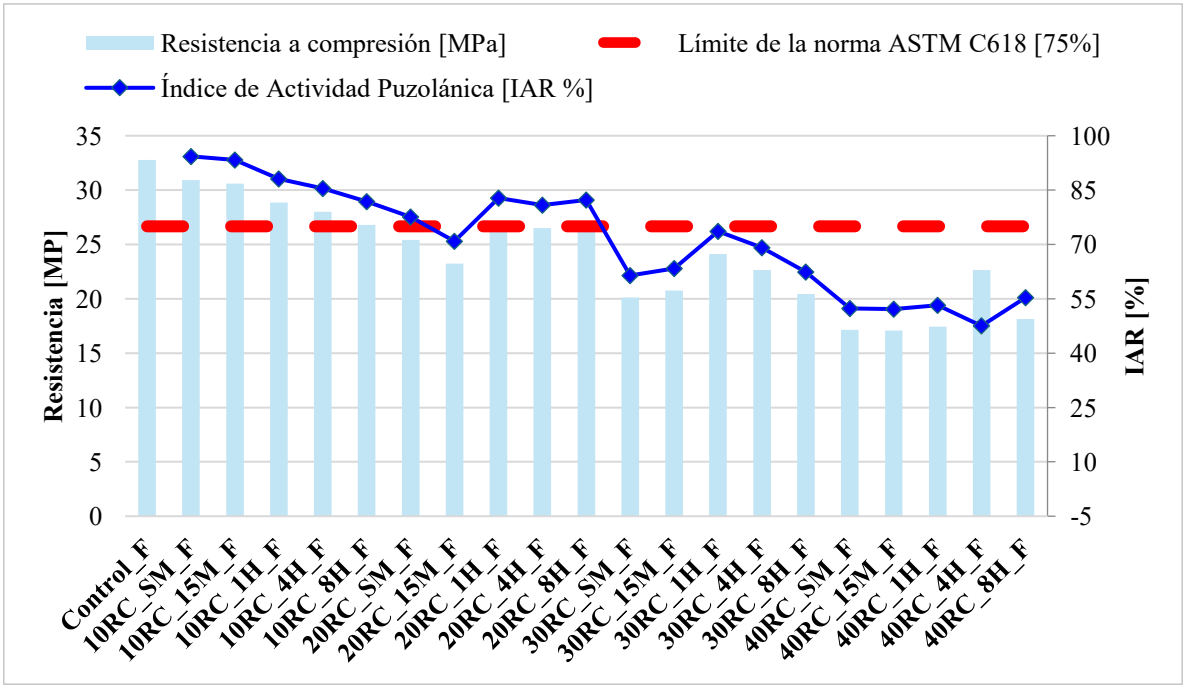


Figura A- 30. Comparación entre la resistencia a compresión y el índice de actividad puzolánica (IAR) para el reemplazo de cemento < 150 µm con fibra sintética para 28 días de curado

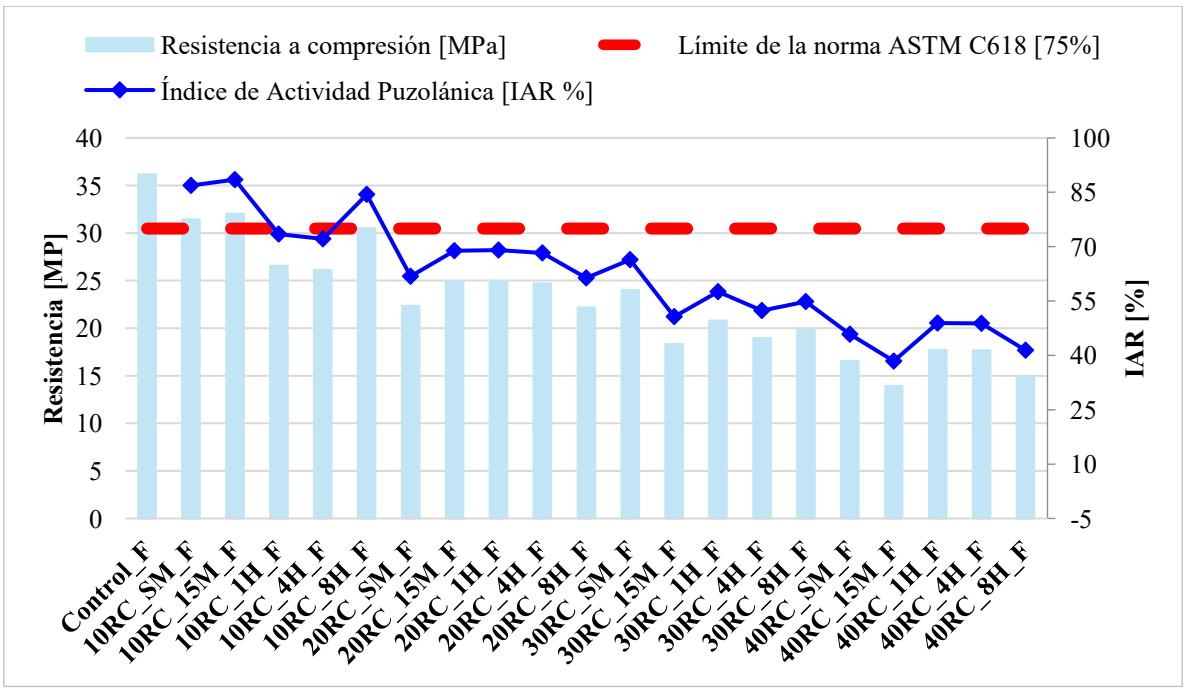


Figura A- 31. Comparación entre la resistencia a compresión y el índice de actividad puzolánica (IAR) para el reemplazo de cemento < 150 µm con fibra sintética para 25 días de curado

Tabla A- 37. Resultados a la compresión para el reemplazo de cemento del 20 % < 150 µm con ajuste en la relación agua/cemento para 38 y 56 días de curado

Muestra	Resistencia a la compresión [MPa]				
	Sin molienda	15 minutos de molienda	1 hora de molienda	4 horas de molienda	8 horas de molienda
28 días de curado					
Control 0,70	18,930	-	-	-	-
20RC 0,70	12,389	14,441	14,899	18,363	14,548
56 días de curado					
Control 0,70	18,786	-	-	-	-
20RC 0,70	12,272	12,614	13,244	16,915	14,342

Tabla A- 38. Resultados de IAR [%] para el reemplazo de cemento del 20 % < 150 µm con ajuste en la relación agua/cemento para 28 y 56 días de curado

Muestra	IAR [%]				
	Sin molienda	15 minutos de molienda	1 hora de molienda	4 horas de molienda	8 horas de molienda
28 días de curado					
20RC 0,70	65	76	79	97	77
56 días de curado					
20RC 0,70	65	67	70	90	76

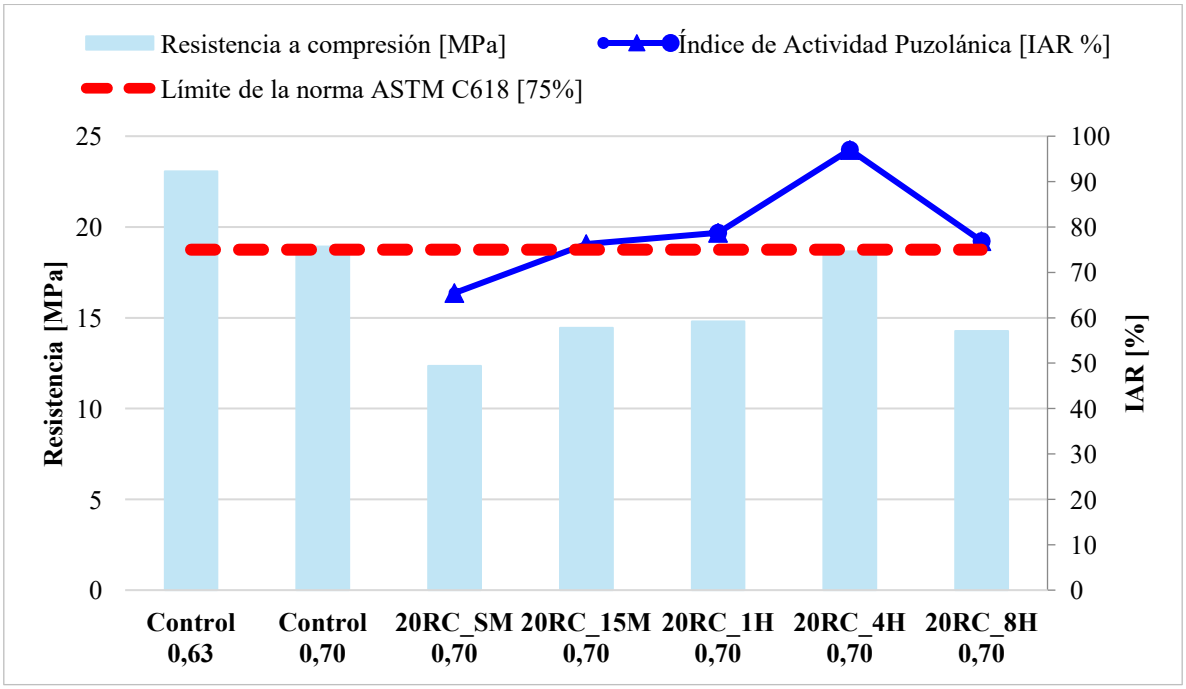


Figura A- 32. Comparación entre la resistencia a compresión y el índice de actividad puzolánica (IAR) para el reemplazo de cemento del 20 % < 150 µm con ajuste en la relación agua/cemento para 28 días de curado

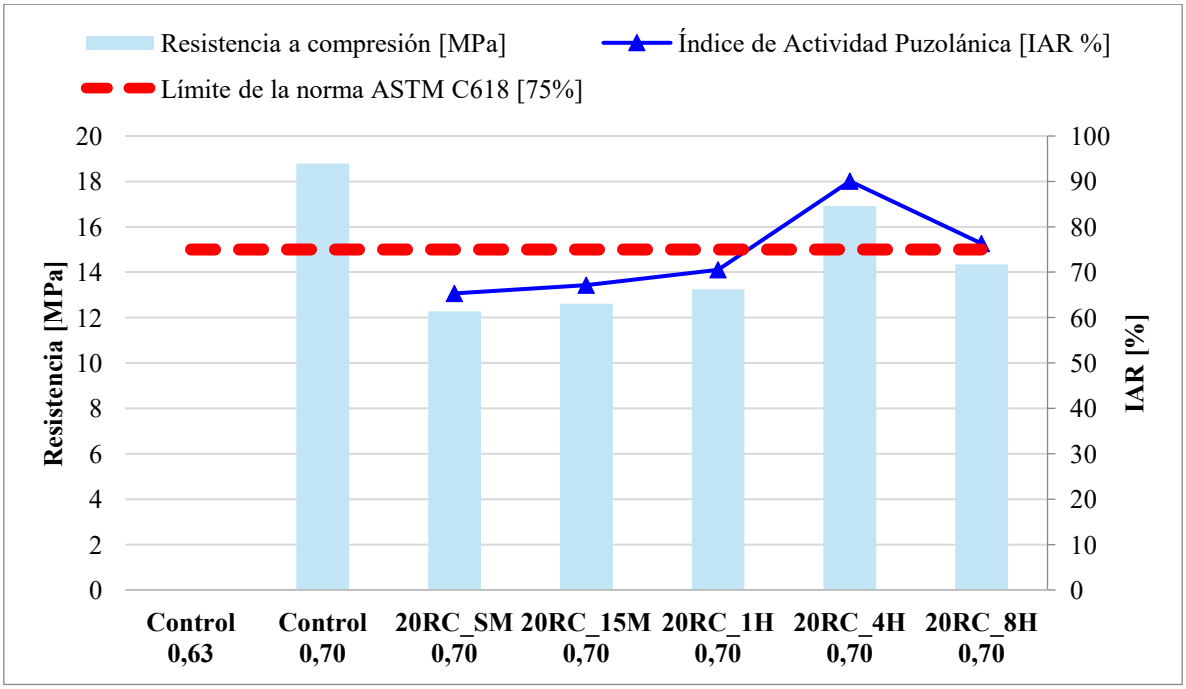


Figura A- 33. Comparación entre la resistencia a compresión y el índice de actividad puzolánica (IAR) para el reemplazo de cemento del 20 % < 150 µm con ajuste en la relación agua/cemento para 56 días de curado

Tabla A- 39. Resultados a la compresión para el reemplazo de cemento del 10 % < 150 µm con cal viva para 28 y 56 días de curado

Muestra	Resistencia a la compresión [MPa]				
	Sin molienda	15 minutos de molienda	1 hora de molienda	4 horas de molienda	8 horas de molienda
28 días de curado					
10RC_C5	17,454	17,805	18,633	20,675	25,678
56 días de curado					
10RC_C5	17,077	17,671	16,789	19,578	34,279

Tabla A- 40. Resultados de IAR [%] para el reemplazo de cemento del 10 % < 150 µm con cal viva para 28 días de curado

Muestra	IAR [%]				
	Sin molienda	15 minutos de molienda	1 hora de molienda	4 horas de molienda	8 horas de molienda
28 días de curado					
10RC_C5	76	77	81	90	111

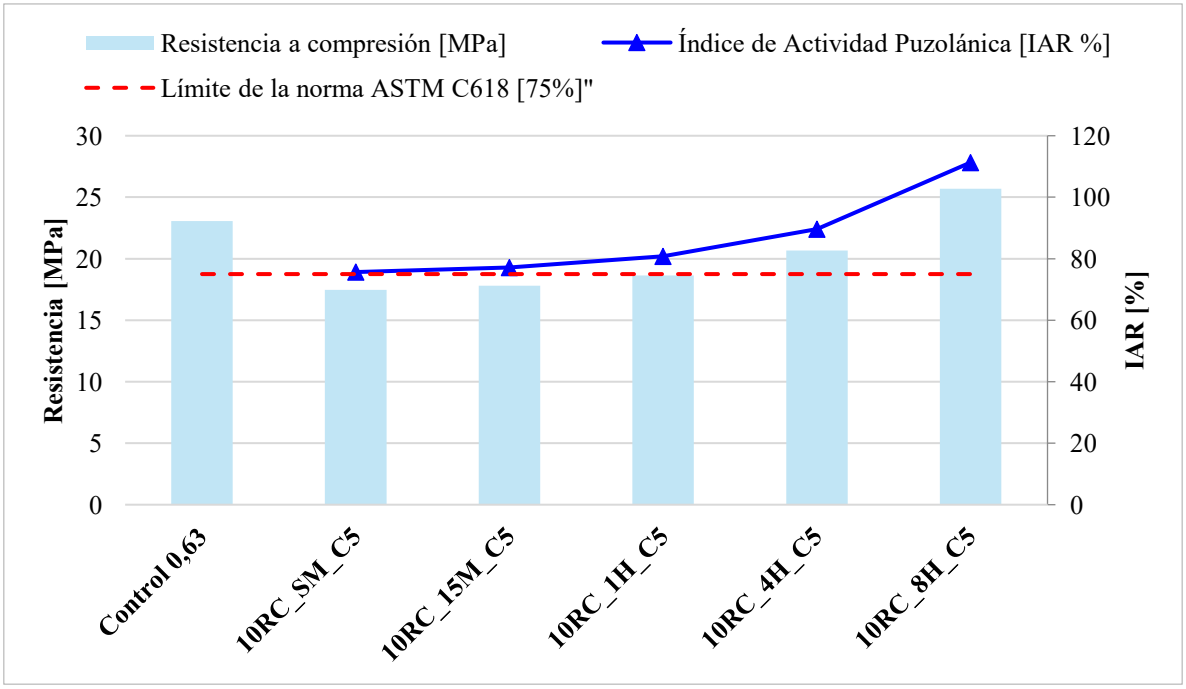


Figura A- 34. Comparación entre la resistencia a compresión y el índice de actividad puzolánica (IAR) para el reemplazo de cemento del 10 % < 150 µm con cal viva para 28 días de curado

Tabla A- 41. Resultados a la compresión para el reemplazo de cemento del 20 % para distintos tipos de relaves molidos para 28 y 56 días de curado

Muestra	Resistencia a la compresión [MPa]					
	Relave total molido		Relave grueso molido		Relave grueso y fino molido	
	15M	1H	15	1H	15M	1H
28 días de curado						
20RC 0,63	8,988	11,345	9,627	8,673	27,036	27,459
56 días de curado						
20RC 0,63	10,383	9,789	10,743	8,691	23,438	25,786

Tabla A- 42. Resultados de IAR [%] para el reemplazo de cemento del 20 % para distintos tipos de relaves molidos para 28 días de curado

Muestra	IAR [%]					
	Relave total molido		Relave grueso molido		Relave grueso y fino molido	
	15M	1H	15	1H	15M	1H
28 días de curado						
20RC 0,63	39	49	42	38	117	119

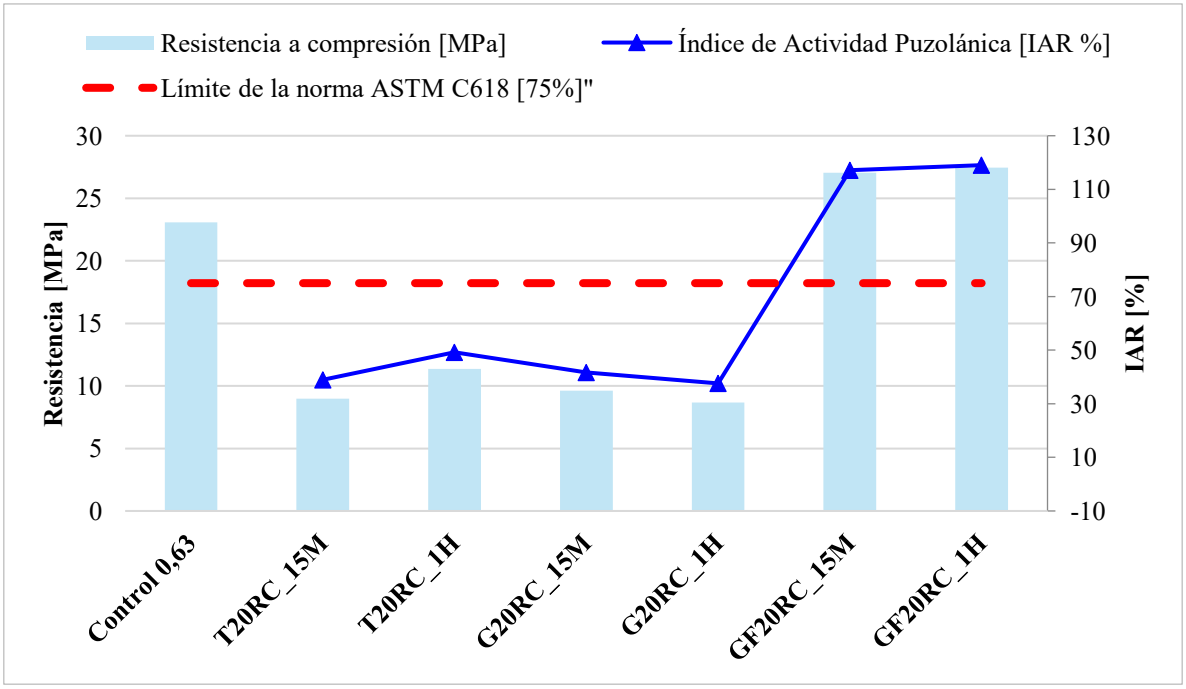


Figura A- 35. Comparación entre la resistencia a compresión y el índice de actividad puzolánica (IAR) para el reemplazo de cemento del 20 % para distintos tipos de relaves molidos para 28 días de curado

Tabla A- 43. Resultados a la compresión para el reemplazo de árido > 150 µm con ajuste en la relación agua/cemento

Muestra	Resistencia a la compresión [MPa]
28 días de curado	
65RA 0,70	38,607
65RA 0,73	36,294
56 días de curado	
65RA 0,70	37,878
65RA 0,73	35,945

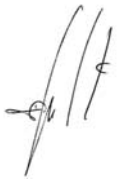
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN - FACULTAD DE INGENIERÍA
Departamento de Ingeniería Metalúrgica
Hoja Resumen Memoria de Título

Título: Evaluación de morteros con reemplazo de cemento y áridos utilizando relaves activados mecánicamente: proceso de molienda.

Nombre Memorista:

Modalidad	**Investigación**
Concepto	EXCELENTE
Calificación	7.0
Fecha	13.06.2025

Profesor (es) Patrocinante (s)



Prof. Roberto Gómez E.

Ingeniero Supervisor:

Institución:

Prof. Ramón Díaz N.

Comisión (Nombre y Firma)

Prof. René Gómez P.	**Ing. María Vanessa Gutiérrez S.**

Resumen

Este estudio evalúa la incorporación de relaves de cobre, activados puzolánicamente de manera mecánica, como reemplazo parcial de cemento y árido fino en mezclas de mortero. La investigación surge como respuesta a la necesidad de reducir las emisiones asociadas al cemento Portland y de aprovechar los residuos mineros acumulados en el país.

Para ello, se elaboraron distintas dosificaciones de mortero con porcentajes variables de reemplazo, empleando relaves molidos con bolas de acero por tiempos de 15 minutos, 1, 4 y 8 horas. Se analizaron propiedades como la trabajabilidad, la densidad y las resistencias a flexión y compresión a los 28 y 56 días de curado. Además, se analizaron variables adicionales como fibra sintética, cal viva, agua adicional y variaciones en la fracción granulométrica del relave, con el fin de identificar el desempeño óptimo de las mezclas.

Los resultados demostraron que es posible utilizar el relave activado sin comprometer el rendimiento del mortero, especialmente en remplazos de cemento de 10% y 20%, y de árido fino

hasta un 65%. Las mezclas óptimas mostraron buen desempeño mecánico y una trabajabilidad aceptable, destacando aquellas condiciones con adición de cal y combinaciones de fracciones. En cambio, los reemplazos de cemento superiores al 30% y los tiempos de molienda de 4 y 8 horas redujeron la resistencia estructural, debido a la sobre pulverización del relave y la pérdida de su capacidad puzolánica.

Se concluye que el uso de relaves activados mecánicamente permite desarrollar morteros con potencial aplicación en infraestructura minera subterránea, como hormigón proyectado o revestimiento de túneles. Esta alternativa no solo contribuye a valorizar un residuo minero de difícil gestión, sino también a representar una estrategia concreta para reducir la huella ambiental en la industria de la construcción.