



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA



EFFECTO DE LA ACTIVACIÓN MECÁNICA, TÉRMICA Y QUÍMICA DE RELAVES MINEROS COMO REEMPLAZO DEL CEMENTO EN MORTEROS

POR

Cristel Maryory González Vergara

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

Profesor Guía

Roberto Gómez Espina

Miembros de la Comisión

René Gómez Puigpinos

Noviembre 2025

Concepción (Chile)

Agradecimientos

En primer lugar, quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mi familia, especialmente a mis padres, Luisa y David. Su apoyo incondicional y su amor han sido la base de mi crecimiento. Gracias a ellos, soy la persona que soy hoy. Me enseñaron el valor de la perseverancia, me dieron alas para soñar y el coraje para no rendirme. Siempre estuvieron ahí, escuchándome, guiándome y motivándome a seguir adelante, incluso cuando las dificultades parecían insuperables.

A mi abuelita, Ramona, que ya no está físicamente con nosotros, le debo una gratitud infinita. Ella fue mi ejemplo de fortaleza y resistencia. Su amor, puro y eterno, ha sido mi guía a lo largo de este camino. Aunque ya no pueda verla, sé que su espíritu sigue siendo mi fuente de inspiración.

A mi novio, Cristóbal, quien ha sido mi compañero constante en cada paso de este viaje. Gracias por tu amor, apoyo incondicional y por recordarme siempre que rendirse no es una opción. Juntos compartimos horas interminables de estudio, risas, dificultades y éxitos. Eres mi refugio y la razón por la que sigo adelante con fuerza y determinación. A ti, que conoces mis temores y mis sueños, te elijo cada día, en cada momento.

Agradezco profundamente a mi profesor guía, Roberto, quien confió en mí desde el principio, permitiéndome desarrollar esta investigación sin presiones. Su disposición para resolver mis dudas fue fundamental en cada etapa de este proceso. También quiero agradecer al profesor René por su valiosa orientación y por acogerme con calidez en mi futuro proyecto académico.

Un agradecimiento especial a Adolfo y Vanessa, miembros del proyecto FONDEF ID23I10183, por su paciencia, apoyo y por brindarme un lugar en el laboratorio. Gracias por hacerme sentir bienvenida desde el primer día.

Finalmente, quiero agradecer a todos aquellos que, de alguna forma, me acompañaron durante este proceso. Cada uno de ustedes, con su apoyo y amor, han sido una pieza clave en este logro. ¡Gracias totales!

Resumen

La utilización de relaves mineros como reemplazo parcial del cemento en morteros ha ganado relevancia como una estrategia para mitigar los impactos ambientales asociados a los pasivos mineros. Estos residuos, que suelen acumularse en depósitos en superficie sin un propósito definido ni una gestión adecuada, representan un desafío ambiental significativo. En este contexto, ofrecer un nuevo uso para los relaves resalta la necesidad de implementar soluciones que favorezcan la utilización sostenible de recursos, contribuyendo así a la creación de aplicaciones prácticas para este residuo y su aprovechamiento eficaz.

Este estudio tuvo como objetivo evaluar la viabilidad de utilizar relaves de pórfido cuprífero activados como reemplazo parcial del cemento en la fabricación de morteros. Para ello, se elaboraron distintas dosificaciones que combinaron molienda y activación térmica a tres temperaturas: 800, 925 y 1000°C, junto con una activación química. Tras la aplicación de los tratamientos, se analizaron los relaves mediante técnicas de análisis granulométrico, mineralógico y químico. Posteriormente, se evaluaron diversas propiedades de las mezclas de mortero, como la trabajabilidad, la densidad de las probetas y las resistencias a la flexo-tracción y compresión, con el fin de determinar el comportamiento mecánico de los morteros.

Los resultados obtenidos indicaron que el reemplazo de cemento por relave mejoró significativamente las propiedades mecánicas de los morteros, especialmente en las muestras activadas exclusivamente mediante tratamiento mecánico y químico. En particular, las fracciones gruesas de relave, sometidas a una molienda de 15 minutos que solo incluyó partículas mayores a 150 micrones y mezcladas en partes iguales con el fino sin moler, mostraron un desempeño superior en términos de resistencia a la flexo-tracción y compresión.

Se concluye que la incorporación de relaves activados en la fabricación de morteros representa una alternativa viable para la reutilización de residuos mineros, con implicancias significativas para la sostenibilidad ambiental en la industria de la construcción, al tiempo que ofrece un medio para reducir la huella ecológica del cemento tradicional.

Abstract

The use of mining tailings as a partial replacement for cement in mortars has gained importance as a strategy to mitigate the environmental impacts associated with mining waste. These passives, which are often accumulated in surface deposits without a defined purpose or proper management, represent a significant environmental challenge. In this context, offering a new use for tailings highlights the need to implement solutions that promote the sustainable use of resources, thus contributing to the creation of practical applications for this waste and its effective utilization.

This study aimed to evaluate the feasibility of using activated copper porphyry tailings as a partial replacement for cement in mortar production. To achieve this, different mixtures were prepared, combining milling and thermal activation at three temperatures: 800°C, 925°C, and 1000°C, along with chemical activation. After the treatments, the tailings were analyzed using granulometric, mineralogical, and chemical analysis. Subsequently, various properties of the mortar mixes were evaluated, including workability, density, and flexural and compressive strengths, to determine the mechanical behavior of the mortars.

The results indicated that replacing cement with tailings significantly improved the mechanical properties of the mortars, especially in the samples activated exclusively through mechanical and chemical treatments. In particular, the coarse tailing fractions, subjected to a 15-minute milling process that included only particles larger than 150 microns and mixed in equal parts with unground fines, showed superior performance in terms of flexural and compressive strength.

It is concluded that the incorporation of activated tailings in mortar production represents a viable alternative for the reuse of mining waste, with significant implications for environmental sustainability in the construction industry, while also offering a means to reduce the ecological footprint of traditional cement.

Tabla de contenido

1	Introducción	1
1.1	Objetivos	3
1.1.1	Objetivo principal.....	3
1.1.2	Objetivos específicos.....	3
1.2	Alcance y limitaciones	3
2	Marco teórico	5
2.1	Residuos mineros masivos	5
2.2	Relaves mineros	6
2.3	Normativa vigente	8
2.4	Tipos de relaves.....	9
2.5	Cemento	10
2.5.1	Propiedades del cemento	11
2.5.2	Clasificación del cemento	12
2.5.3	Cemento Portland.....	12
2.5.4	Hidratación del cemento con adición puzolánica.....	13
2.6	Actividad puzolánica.....	15
2.7	Morteros	16
2.8	Procesos de activación	17
2.8.1	Activación mecánica	18
2.8.2	Activación térmica	19
2.8.3	Activación química	20
3	Metodología experimental.....	23
3.1	Materiales	23
3.1.1	Cemento empleado.....	23
3.1.2	Relave.....	24

3.1.3	Árido fino	24
3.1.4	Agua	25
3.1.5	Cal	26
3.2	Fabricación de probetas.....	26
3.2.1	Dosificación	26
3.2.2	Activación del relave.....	28
3.2.3	Caracterización mineralógica del relave	29
3.2.4	Elaboración del mortero	30
3.2.5	Ensayos mecánicos.....	31
4	Resultados	32
4.1	Análisis del tamaño de partícula: Difracción láser.....	32
4.2	Análisis mineralógico: Difracción de rayos X	34
4.3	Análisis químico.....	36
4.4	Medición de pH.....	38
4.5	Trabajabilidad del mortero	38
4.6	Ensayos de Flexo-Tracción	39
4.7	Ensayos de Compresión	45
4.8	Densidad de las probetas	50
5	Discusión.....	52
5.1	Influencia del tratamiento en el comportamiento mineralógico.....	52
5.2	Evaluación del efecto y la cinética de disolución	53
5.3	Análisis de la trabajabilidad en las mezclas de mortero.....	54
5.4	Influencia de la densidad sobre el comportamiento mecánico.....	55
5.5	Efecto del tiempo de curado sobre la resistencia mecánica	56
5.6	Influencia de la activación del relave	56
5.6.1	Efecto de la temperatura de calcinación.....	56

5.6.2	Desempeño mecánico según el método de activación empleado.....	58
6	Conclusiones y recomendaciones.....	60
7	Bibliografía.....	61
8	Anexos.....	76
8.1	DRX del relave.....	76
8.2	Proceso de tamizaje: Preparación material para elaboración de muestras	77
8.3	Detalles de las dosificaciones.....	78
8.4	Activación mecánica del relave: Molienda	82
8.5	Preparación muestra de relave activado	83
8.6	Preparación muestras DRX: Preparación de muestras y pulverización	85
8.7	Procedimiento para la elaboración del mortero.....	87
8.8	Dimensionamiento de las probetas.....	92
8.9	Pesaje de las probetas	97
8.10	Ensayos de resistencia mecánica.....	99
8.11	Resultados de DRX	100
8.12	Preparación análisis químico.....	106
8.13	Resultados análisis químico	109
8.14	Resultados medición de pH.....	110
8.15	Resultados de los ensayos de trabajabilidad	112
8.16	Resultados resistencia a la flexo-tracción	114
8.17	Resultados resistencia a la compresión	116
8.18	Resultados densidad de las probetas	118

Índice de Figuras

Figura 1. Distribución de depósitos (2023) [22].	7
Figura 2. Normativa vigente para la disposición de los depósitos de relaves en Chile [24].	8
Figura 3. Etapas de la hidratación del cemento [58].	14
Figura 4. Métodos de activación utilizados para el pretratamiento de relaves mineros [77].	17
Figura 5. Comparación de curvas granulométricas del cemento, relave y árido fino.	25
Figura 6. Esquema de las dosificaciones.	26
Figura 7. Nomenclatura de las muestras.	27
Figura 8. Características del Molino tipo Marcy utilizado para realizar la activación mecánica del relave.	28
Figura 9. Distribución de muestras de relave sometidas a análisis mineralógico mediante DRX.	30
Figura 10. Curvas granulométricas de las fracciones fina y gruesa del relave: pre y post molienda.	32
Figura 11. Distribución granulométrica de las fracciones fina y gruesa del relave: pre y post molienda.	33
Figura 12. Distribución granulométrica: (a) Efecto de la temperatura de la fracción gruesa sobre la molienda; (b) Efecto de la temperatura de la fracción fina sobre la molienda.	34
Figura 13. Resultados análisis químico inicial: (a) Evolución de la concentración de Na^+ y K^+ en función del tiempo de agitación; (b) Concentración de cationes tras 1 día de agitación para los distintos tratamientos.	36
Figura 14. Resultados análisis químico complementario: Evolución de la concentración de cationes en función del tiempo de agitación.	37
Figura 15. Resultados análisis químico complementario: Concentración de cationes tras 1 día de agitación para los distintos tratamientos.	38
Figura 16. Resultados del ensayo de trabajabilidad de morteros en función de la temperatura de calcinación y el tipo de agregado (fino o grueso) de relave.	39
Figura 17. Resultados de la resistencia a la flexo-tracción a los 28, 56 y 84 días de curado: (a) Muestras calcinadas a 800°C ; (b) Muestras calcinadas a 925°C ; (c) Muestras calcinadas a 1000°C .	41
Figura 18. Resultados de la resistencia a la flexo-tracción de muestras activadas mecánica y químicamente: (a) Fracción fina; (b) Fracción gruesa.	42
Figura 19. Resultados de la flexo-tracción a la compresión con un reemplazo de cemento por relave del 10% y 20%: (a) A los 28 días de curado; (b) A los 56 días de curado; (c) A los 84 días de curado.	43

Figura 20. Resultados de la resistencia a la flexo-tracción en función de los tiempos de permanencia de la muestra de relave activado (1, 2, 3, 5 y 7 días): (a) A los 28 días de curado; (b) A los 56 días de curado; (c) A los 84 días de curado.	44
Figura 21. Resultados de la resistencia a la flexo-tracción en función de las temperaturas de calcinación (800, 925, 940, 1000°C): (a) A los 28 días de curado; (b) A los 56 días de curado; (c) A los 84 días de curado.	45
Figura 22. Resultados de la resistencia a la compresión a los 28, 56 y 84 días de curado: (a) Muestras calcinadas a 800°C; (b) Muestras calcinadas a 925°C; (c) Muestras calcinadas a 1000°C.	46
Figura 23. Resultados de la resistencia a la compresión de muestras activadas mecánica y químicamente: (a) Fracción fina; (b) Fracción gruesa.	47
Figura 24. Resultados de la resistencia a la compresión con un reemplazo de cemento por relave del 10% y 20%: (a) A los 28 días de curado; (b) A los 56 días de curado; (c) A los 84 días de curado... ..	48
Figura 25. Resultados de la resistencia a la compresión en función de los tiempos de permanencia de la muestra de relave activado (1, 2, 3, 5 y 7 días): (a) A los 28 días de curado; (b) A los 56 días de curado; (c) A los 84 días de curado.	49
Figura 26. Resultados de la resistencia a la compresión en función de las temperaturas de calcinación (800, 925, 940, 1000°C): (a) A los 28 días de curado; (b) A los 56 días de curado; (c) A los 84 días de curado.	50
Figura 27. Relación entre la densidad y la resistencia de las muestras a diferentes tiempos de curado: (a) Flexo-tracción; (b) Compresión.	51
Figura 28. Difractograma DRX del relave 1 completo.	76
Figura 29. Tamiz electromagnético Sieve Shaker.	77
Figura 30. Proceso de molienda en molino de bolas: (a) Vista del equipo; (b) Interior con distribución de las bolas de acero; (c) Separación del material molido de los cuerpos moledores.....	82
Figura 31. Activación química. (a) Pesaje del relave; (b) Pesaje de la cal; (c) Pesaje del agua destilada.	83
Figura 32. Procedimiento de mezcla del relave activado con cal y agua destilada. (a) Agitación de agua destilada con cal; (b) Incorporación del relave; (c) Medición de pH; (d) Reposo de la mezcla de relave activado.....	84
Figura 33. Muestras caracterizadas mediante DRX.	85
Figura 34. Preparación de la muestra gruesa sin tratar: (a) Material distribuido en cilindros de acero; (b) Muestra instalada en el molino pulverizador.	86

Figura 35. Pesaje de los componentes. (a) Árido fino; (b) Cemento Bio Bio; (c) Agua.....	87
Figura 36. Preparación de la mezcla de mortero. (a) Mezcladora de accionamiento eléctrico; (b) Incorporación de agua y cemento; (c) Adición de árido; (d) Raspado de las paredes del recipiente.	88
Figura 37. Ensayo de trabajabilidad. (a) Cono de Abrams; (b) Medición del asentamiento.	88
Figura 38. Proceso de moldeo. (a) Apisonamiento de la primera capa de mortero; (b) Apisonamiento tras el llenado completo; (c) Mesa vibratoria eléctrica.	89
Figura 39. Proceso posterior al moldeo. (a) Cubierta de plástico; (b) Desmolde; (c) Curado por inmersión.	90
Figura 40. Proceso posterior al curado. (a) Secado de las muestras; (b) Horno de secado Labtech Hebro; (c) Pesaje de las muestras; (d) Dimensionamiento de las muestras.	91
Figura 41. Ensayo de flexo-tracción. (a) Equipo electromecánico Multispeed; (b) Probetas post ensayo.....	99
Figura 42. Ensayo de resistencia a la compresión. (a) Equipo MATEST modelo C088-11N; (b) Ejecución del ensayo.	99
Figura 43. Difractograma DRX del relave sin tratamiento.	100
Figura 44. Difractograma DRX del relave grueso ($\geq 150 \mu\text{m}$), sin moler y sin calcinar.	100
Figura 45. Difractograma DRX del relave fino ($< 150 \mu\text{m}$), sin moler y sin calcinar.	101
Figura 46. Difractograma DRX del relave grueso ($\geq 150 \mu\text{m}$), molido y sin calcinar.....	101
Figura 47. Difractograma DRX del relave fino ($< 150 \mu\text{m}$), molido y sin calcinar.	102
Figura 48. Difractograma DRX del relave grueso ($\geq 150 \mu\text{m}$), molido y calcinado a 800°C	102
Figura 49. Difractograma DRX del relave grueso ($\geq 150 \mu\text{m}$), molido y calcinado a 925°C	103
Figura 50. Difractograma DRX del relave grueso ($\geq 150 \mu\text{m}$), molido y calcinado a 1000°C	103
Figura 51. Difractograma DRX del relave fino ($< 150 \mu\text{m}$), molido y calcinado a 800°C	104
Figura 52. Difractograma DRX del relave fino ($< 150 \mu\text{m}$), molido y calcinado a 925°C	104
Figura 53. Difractograma DRX del relave fino ($< 150 \mu\text{m}$), molido y calcinado a 1000°C	105
Figura 54. Muestras destinadas para análisis químico en periodo de agitación.....	107
Figura 55. Proceso de centrifugado: (a) Centrífuga universal SIGMA 2-16P; (b) Distribución de los tubos de centrífuga; (c) Separación sólido-líquido.	108
Figura 56. Proceso de extracción del sobrenadante: (a) Extracción; (b) Disposición del sobrenadante; (c) Refrigeración de las muestras.	108

Índice de Tablas

Tabla 1. Composición del clinker, considerando pesos representativos [34].	11
Tabla 2. Resistencia a la compresión y a la flexión según Norma NCh 154 [41]	11
Tabla 3. Clasificación de los cementos según su composición [37].	12
Tabla 4. Normativas complementarias para la fabricación de morteros [75].	17
Tabla 5. Composición química del Cemento Bio Bio, mediante DRX.	23
Tabla 6. Composición química del Relave 1, mediante DRX.	24
Tabla 7. Composición mineralógica del árido fino, mediante DRX.	24
Tabla 8. Análisis mineralógico de la fracción fina sometida a tratamiento mediante DRX.	34
Tabla 9. Análisis mineralógico de la fracción fina sometida a tratamiento mediante DRX.	35
Tabla 10. Dosificaciones muestras de control.	78
Tabla 11. Dosificaciones muestras de material fino elaboradas durante la primera etapa del estudio.	79
Tabla 12. Dosificaciones muestras de material grueso elaboradas durante la primera etapa del estudio.	79
Tabla 13. Dosificaciones muestras elaboradas durante la etapa complementaria del estudio.	80
Tabla 14. Distribución molino de bolas tipo Marcy.	82
Tabla 15. Dimensionamiento de las probetas a los 28 días de curado.	92
Tabla 16. Dimensionamiento de las probetas a los 56 días de curado.	93
Tabla 17. Dimensionamiento de las probetas a los 84 días de curado	95
Tabla 18. Pesaje de las muestras correspondientes a los períodos de curado de 28, 56 y 84 días.	97
Tabla 19. Dosificación muestras de análisis químico.	107
Tabla 20. Resultados análisis químico inicial.	109
Tabla 21. Resultados análisis químico complementario.	109
Tabla 22. Resultados medición de pH inicial y final.	110
Tabla 23. Resultados ensayos de trabajabilidad.	112
Tabla 24. Resultados resistencia a la flexo-tracción.	114
Tabla 25. Resultados resistencia a la compresión.	116
Tabla 26. Cálculo de la densidad de las probetas con 28 días de curado.	118
Tabla 27. Cálculo de la densidad de las probetas con 56 días de curado.	119
Tabla 28. Cálculo de la densidad de las probetas con 84 días de curado.	120

1 Introducción

Uno de los principales pilares socioeconómicos de Chile es la industria minera. En particular, la minería del cobre ha experimentado un incremento sostenido en el tiempo dado el aumento de la demanda mundial del metal de cobre, impulsado por el auge de la industria eléctrica, la expansión del sector inmobiliario y de construcción, y la innovación tecnológica [1].

En este contexto, con el pasar de los años, Chile ha asumido un rol estratégico en el escenario mundial, concentrando aproximadamente el 21% de las reservas mundiales del cobre y aportando aproximadamente el 24% de la producción global, para el año 2022 [2]. Durante ese mismo año, el sector minero contribuyó alrededor del 13,6% del Producto Interno Bruto (PIB) nacional, alcanzando una cifra cercana al 25% del PIB minero total considerando los encadenamientos productivos y siendo parte relevante de los ingresos tributarios registrados [3].

A pesar de esto, la minería en Chile presenta una serie de conflictos e interrogantes. La expansión de la actividad minera ha traído consigo impactos ambientales significativos. Desde la promulgación del Decreto Ley 600 sobre inversión extranjera en 1974, el país ha recibido altos niveles de inversión que han favorecido el desarrollo, pero también han intensificado sus externalidades negativas [4].

Si bien en las últimas décadas se han fortalecido los marcos regulatorios y las prácticas de gestión ambiental, persisten desafíos importantes. En particular, la adecuada gestión de los Pasivos Ambientales Mineros (PAM) se ha convertido en un tema prioritario. Según el Catastro Nacional de Depósitos de Relaves 2023, existen 796 depósitos registrados, de los cuales 176 están abandonados, 129 activos, 475 inactivos, 14 en construcción y 2 en evaluación [5]. No obstante, pese al registro de la cantidad y localización, aún existen relaves fuera del registro oficial, debido a dificultades de acceso o a la falta de información sistematizada [6].

En este contexto, la minería asume la responsabilidad de impulsar proyectos sustentables que fomenten la innovación y la implementación de nuevas tecnologías orientadas al reprocesamiento de estos pasivos. Esto debe abordarse desde un enfoque interdisciplinario y una perspectiva integradora que considere las necesidades de la comunidad, el cuidado del medio ambiente y los requerimientos de la cadena productiva, con el objetivo de mitigar su impacto ambiental y, al mismo tiempo, valorizar los recursos contenidos en ellos.

La oportunidad radica en aprovechar estos materiales desechados para nuevos usos, ya sea dentro de la misma industria minera o en otros sectores, como la construcción. De esta manera, se podría considerar su potencial aplicación en diversos campos, como en la infraestructura minera subterránea, en hormigón proyectado o revestimiento de túneles, así como en materiales de construcción, como elementos estructurales o producción de cemento. La iniciativa surge de la idea de reducir drásticamente el volumen de los residuos mineros en el medioambiente, considerando que Chile, al ser el principal productor de cobre del mundo, enfrenta una baja ley mineral y una acumulación histórica de desechos. Esto se debe a que anteriormente no existía conciencia sobre el impacto de las aglomeraciones socioterritoriales ni sobre los patrones de proximidad entre los relaves, las zonas habitadas por comunidades cercanas y los ríos.

Frente a este panorama, una línea de trabajo emergente es la valorización de relaves mediante su incorporación en matrices cementicias, ya que estos residuos exhiben una amplia variabilidad en su composición química y mineralógica que podrían conferirles propiedades puzolánicas, si son adecuadamente activados.

Entre las posibles aplicaciones se encuentra la producción de materiales cementantes alternativos, como pastas de relleno en minería subterránea, hormigones de baja resistencia y adiciones minerales para cementos comerciales, entre otros [7].

En la literatura, se han identificado al menos cuatro grandes estrategias para la reutilización de estos materiales: el procesamiento secundario de mineral, tecnologías de minería de relleno sólido (como pasta y lechada cementadas), su uso como fertilizante mineral, y la estabilización durante el apilamiento en seco de relaves y mezclas de roca [8]. Sin embargo, estos métodos presentan limitaciones en términos de costo, aplicabilidad universal y estabilidad ambiental.

Es así que se plantea el uso de relave de pórfido cuprífero activado con fines puzolánicos, explorando su potencial como sustituto parcial del cemento en matrices cementicias. Esta alternativa no solo permitiría reducir la huella de carbono del sector, sino también dar una solución sostenible a la disposición de relaves, siempre que se logre una activación adecuada que favorezca el desarrollo de fases cementantes con resistencia mecánica y durabilidad apropiadas.

De tal manera que, el presente estudio propone evaluar el desempeño de morteros con reemplazo parcial de cemento por relave de pórfido cuprífero activado mecánica, térmica y químicamente. El objetivo es determinar si este tipo de activación permite mantener o mejorar las propiedades

mecánicas y reológicas del material, contribuyendo así a una estrategia sustentable de valorización de pasivos mineros.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo principal

Evaluar la viabilidad de fabricar morteros mediante el reemplazo parcial de cemento por relave de pórfido cuprífero activado de forma mecánica, térmica y química, manteniendo sus propiedades.

1.1.2 Objetivos específicos

- Caracterizar química y mineralógicamente el relave de pórfido cuprífero.
- Evaluar la cinética de disolución que produce la solución alcalina sobre el relave de pórfido cuprífero.
- Determinar la distribución granulométrica del relave de pórfido cuprífero.
- Analizar el efecto de la activación mecánica y térmica del relave en la distribución de sus partículas.
- Verificar el desempeño mecánico del mortero con reemplazo de cemento con diferentes tratamientos proporcionados al relave.
- Analizar el efecto de distintos tiempos de curado en la resistencia de los morteros con reemplazo de cemento.
- Identificar el proceso de activación óptimo del relave, para su uso como reemplazo de cemento en morteros.

1.2 Alcance y limitaciones

El alcance de este estudio comprende la evaluación del potencial puzolánico del relave proveniente de pórfido cuprífero, considerando su mineralogía rica en aluminosilicatos como factor determinante para su eventual aprovechamiento como material cementante suplementario. La investigación se enmarca en el análisis de las propiedades del relave, orientado a determinar su factibilidad técnica para sustituir parcialmente al cemento Portland en mezclas cementicias. En este contexto, el trabajo abarca desde la caracterización inicial del material hasta la identificación de las condiciones de activación más efectivas, con el objetivo de establecer los límites y posibilidades de aplicación del relave en el desarrollo de materiales más sostenibles dentro del ámbito de la construcción.

Respecto a las limitaciones del estudio, en primer lugar, al haberse trabajado con un único relave, los resultados no consideran la variabilidad mineralógica o de procedencia que podría presentarse en otros depósitos. Asimismo, los ensayos y procedimientos se realizaron en condiciones controladas de laboratorio, sin contemplar las posibles variaciones asociadas a una implementación a escala industrial.

Por último, el análisis se centró en las propiedades mecánicas de compresión y flexo-tracción, sin abordar en profundidad otras propiedades relevantes, como la durabilidad, la resistencia química o el comportamiento frente a condiciones ambientales agresivas. Esta omisión adquiere especial relevancia considerando que la aplicabilidad prevista del estudio se orienta a su uso en el sector minero, donde dichos factores son determinantes para su desempeño real.

2 Marco teórico

El presente capítulo tiene por finalidad establecer el marco contextual necesario para comprender los fundamentos de la investigación, abordando los ejes temáticos que incidirán de manera significativa en el análisis e interpretación de los resultados obtenidos. En este contexto, se examinará la generación y gestión de residuos en Chile, con énfasis en el caso particular de los relaves, describiendo sus características, clasificación y relevancia en el sector minero.

Asimismo, se revisará el marco normativo vigente que regula el manejo, disposición y control de estos pasivos ambientales, considerando las disposiciones legales, reglamentarias y técnicas aplicables.

2.1 Residuos mineros masivos

Si bien la minería forma parte de una de las actividades económicas más relevantes a nivel nacional y mundial, mantiene latentes problemáticas asociadas a la gestión de los residuos generados por su operación, lo que representa uno de los principales desafíos actuales de la industria.

En este contexto, el sector minero se desenvuelve en un marco cada vez más complejo, marcado por la escasez hídrica y por una creciente demanda social que exige compromiso por parte de las empresas con la sostenibilidad ambiental. Al desarrollar este tipo de actividad, es inevitable generar impactos ambientales significativos, los cuales afectan considerablemente los recursos esenciales como el agua, el suelo y el aire. Entre los efectos más críticos se encuentran la generación de drenaje ácido mina (DAM), la emisión de partículas finas y gases, la degradación de los suelos y el riesgo latente que enfrenta la biota al sostener su supervivencia en diversos ecosistemas cercanos [9].

Es así como, asociado propiamente tal al desarrollo de la actividad minera, se generan grandes volúmenes de residuos masivos. Si bien no constituyen un riesgo para la salud humana o el medio ambiente, es necesario implementar medidas de gestión adecuadas para mitigar el posible impacto generado [10]. Dentro de los residuos mineros masivos, según la información proporcionada por el SERNAGEOMIN [11], anualmente se depositan cerca de 537 millones de toneladas de relaves, registrados como activos, producidos por la gran minería. Mientras que, otros residuos como las escorias metalúrgicas alcanzan cantidades cercanas a los 5 millones de toneladas, lo que, considerando la acumulación histórica registrada, supera los 70 millones de toneladas [12].

Por otro lado, la actividad produce grandes volúmenes de material estéril, el cual es descartado debido a su falta de valor comercial. En Chile, para el año 2019 se registró un total de 1.246 botaderos de

estériles, de los cuales 1.185 corresponden a proyectos mineros metálicos, principalmente de la minería del cobre, oro y plata [13], constituyendo gran parte del volumen total de residuos masivos generados por la industria.

A esto se suma el descarte de minerales de baja ley que son depositados en botaderos de marinas de rechazo, aceites y lubricantes usados; y materiales auxiliares, como neumáticos fuera de uso que, en muchos casos, son reemplazados sin recibir un proceso de reutilización o reciclaje que prolongue su vida útil [14].

2.2 Relaves mineros

Los relaves son un tipo de residuo minero constituidos por una combinación de materiales sólidos de grano fino, usualmente limo, que son descartados después de que los metales y minerales recuperables son extraídos de la mena mediante el proceso de flotación [15]. Corresponden, principalmente, a una mezcla de diversos componentes que dependen del tipo de mineral extraído y del tratamiento empleado para su recuperación. También están conformados por arena, agua y, en algunos casos, una pequeña cantidad de productos químicos [16].

Si bien estos desechos no suelen ser residuos contaminantes, pueden contener minerales que, sobre ciertas concentraciones, se consideran tóxicos para el ser humano [11]. Es por ello que son almacenados en estructuras especiales, que actúan como contenedores seguros y eficientes que minimizan el impacto ambiental, denominados depósitos de relaves.

Tal como lo establece el Decreto Supremo 248/2007 del Ministerio de Minería, un depósito de relaves se define como *toda obra estructurada en forma segura para contener los relaves provenientes de una planta de concentración húmeda de especies de minerales*, contemplando de igual forma sus obras anexas [17].

En cuanto a la disposición de relaves, las alternativas pueden variar en función de diversos factores, como la cercanía a la planta de procesamiento, la capacidad de almacenamiento del depósito, la topografía del sitio, de las condiciones climáticas e, incluso, de la producción del yacimiento [18]. Estas instalaciones de almacenamiento suelen abarcar extensas áreas de terreno; se estima que, en Chile, las faenas mineras generan anualmente alrededor de 530 millones de toneladas de relaves, acumulándose hasta alcanzar aproximadamente 24 mil millones de toneladas en el territorio nacional [19].

Asimismo, el Catastro Nacional de Depósitos de Relaves informa que en Chile existen 796 depósitos de relaves registrados para el año 2023, los cuales se caracterizan según sea su estado en activos, inactivos o abandonados. En primer lugar, los depósitos de relaves activos son aquellos que no han completado su vida útil, encontrándose en operación. Mientras que, los inactivos cuentan con un operador responsable, pero no reciben relaves actualmente. Finalmente, los depósitos abandonados no están en operación y, además, no disponen de un registro de dueños u operadores responsables al momento de ser catastrados [20].

Los depósitos activos son 104, representando un 14% de total, mientras que los depósitos inactivos y abandonados son 463 y 173 representando un 63% y 23% respectivamente del universo de depósitos. Completan la nómina 2 depósitos que están en estado de construcción.

Como es de esperar, la mayor cantidad de depósitos de relaves presentes en el territorio nacional se concentra en aquellas regiones donde la minería constituye la principal actividad económica. Según la distribución regional, del total, 176 corresponden a relaves abandonados, representando un 22,11%, mientras que los depósitos activos e inactivos son 129 y 475 representando un 16,21% y 59,67%, respectivamente. Completan la nómina 15 relaves en construcción y uno en estado de revisión, este último ubicado en la Región de Coquimbo [21].

A continuación, la Figura 1 presenta la distribución porcentual de los depósitos de relaves existentes a lo largo del territorio nacional, clasificados según su estado administrativo.

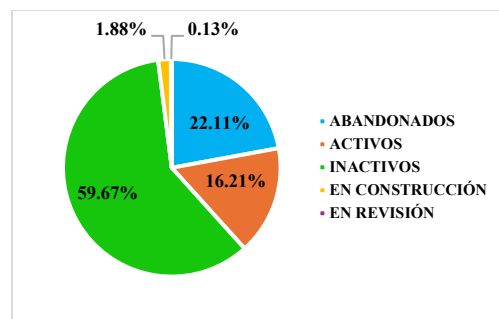


Figura 1. Distribución de depósitos (2023) [22].

Es posible observar que predominan los depósitos inactivos y/o abandonados, debido principalmente a la actividad minera histórica del país. Mientras que, los depósitos activos, concentrados mayoritariamente en la región de Atacama, Coquimbo y Valparaíso [22], continúan en aumento debido al procesamiento de minerales de baja ley, lo que conlleva la necesidad de tratar mayores volúmenes de material para producir la misma cantidad de cobre fino [23].

2.3 Normativa vigente

En la actualidad, el desarrollo de un proyecto de construcción, operación y cierre de depósitos de relaves requiere el cumplimiento de múltiples marcos regulatorios que se deben cumplir para llevarlo a cabo. Entre ellos, destacan las normativas que se presentan a continuación en la Figura 2.



Figura 2. Normativa vigente para la disposición de los depósitos de relaves en Chile [24].

En primer lugar, la normativa aplicable que regula aspectos cubiertos por la Ley Orgánica Constitucional de Concesiones Mineras es el Código de Minería, cuerpo legal que establece el marco regulatorio aplicable a los contratos vinculados a operaciones mineras [25].

Mientras que, el Decreto Supremo N°248 actúa como un reglamento que establece los requisitos y obligaciones que deben cumplir las empresas mineras para obtener la aprobación de proyectos de diseño, construcción, operación y cierre de los depósitos de relaves. Específicamente, los artículos 8, 9 y 10 del capítulo cuarto, Título II disponen: la obligación de presentar un proyecto de depositación de relaves, la facultad del SERNAGEOMIN para aplicar sanciones por el incumplimiento del proyecto, y la obligación de la empresa de informar al Servicio sobre cualquier modificación del proyecto, la cual deberá ser aprobada por medio de una nueva resolución.

Otro respaldo normativo relevante lo constituye el Título IV, capítulo primero que establece las previsiones generales de operación y mantención de los depósitos, entre ellas la fecha exacta de la puesta en operación (artículo 27). El capítulo segundo dispone la responsabilidad del titular de informar trimestralmente el estado de la operación y mantención (artículo 30) y otorga al Servicio la

facultad de realizar comprobaciones del estado del depósito las veces que estime necesarias y, en el caso de ejercer incumplimiento, sancionar adecuadamente (artículo 33). Finalmente, el capítulo tercero regula el procedimiento a seguir en caso de emergencias: el artículo 35 exige la notificación inmediata de la eventualidad, con la debida caracterización del siniestro y descripción de los daños y riesgos potenciales, mientras que el artículo 38 alude a una emergencia ocasionada por fenómenos naturales que puedan impedir el correcto funcionamiento de la actividad, exigiendo la suspensión de ésta [26].

Del mismo modo, el Decreto Supremo N°132 de 2004 establece el Reglamento de Seguridad Minera con la finalidad de garantizar la seguridad de las operaciones y la protección del medio ambiente. Por un lado, el artículo 22 dispone que, previo al inicio de sus operaciones, la empresa deberá presentar un proyecto de plan de cierre de las faenas mineras, entre ello, deberá reportar modificaciones, descripciones de datos o estimaciones acerca de las capacidades instaladas; esta exigencia aplica tanto para botaderos de estériles como para depósitos de relaves y rípios de lixiviación.

Por su parte, el artículo 495 detalla los aspectos que debe considerar el proyecto de plan de cierre de depósitos de relaves, incorporando medidas tales como la mantención de canales perimetrales, estabilización de taludes, recubrimiento de cubeta y taludes, entre otras. El artículo 597 señala que, independiente de la capacidad de producción, se deberá presentar un proyecto minero en caso de haber un proyecto de retiro de relaves antiguos [27].

2.4 Tipos de relaves

A partir de la normativa vigente (D.S 248/2007), los relaves pueden clasificarse de manera general en 3 categorías, de acuerdo con el contenido de agua presente y la manera en la que son vertidos en el depósito. Estos corresponden a relaves espesados, filtrados y en pasta.

En primer lugar, los relaves espesados comprenden un tipo de construcción en el que se remueve gran parte del agua contenida, esto se realiza por medio de espesadores con el fin de obtener una concentración de sólidos cercana al 65 o 75% [28]. El grado de espesamiento logrado dependerá de diversos factores, entre ellos la granulometría del material, ya que las partículas finas sedimentan más lentamente que aquellas de mayor tamaño. Asimismo, influye la mineralogía, puesto que la presencia de minerales afines al agua puede limitar o ralentizar la sedimentación. Otro elemento que considerar corresponde al pH y a la presencia de iones disueltos, que afectan directamente el proceso de floculación.

Además, el desempeño del sistema está condicionado por el diseño del espesador, donde parámetros como su diámetro, profundidad y sistema de rastras [29] determinan una descarga de material más eficiente, evitando el arrastre del mineral en suspensión [30].

A su vez, según el SERNAGEOMIN, el relave filtrado es un depósito con un contenido de agua aún menor que el relave espesado, alcanzado mediante el proceso de filtrado, que asegura un contenido de humedad inferior al 20% [11]. Al igual que en los relaves espesados, el relave filtrado se encuentra condicionado por la granulometría del material: una elevada concentración de finos entorpece el proceso de filtrado, dificultando el paso del agua a través del filtro, mientras que ciertos minerales pueden obstruir sus poros, impidiendo la correcta realización del proceso y generando resultados deficientes. Por el contrario, una mayor concentración de sólidos favorece la eficiencia de la filtración [29].

Finalmente, los relaves en pasta son considerados una alternativa intermedia entre los relaves anteriormente mencionados, ya que poseen un contenido de agua inferior que los relaves espesados, pero mayor que en el caso de los relaves filtrados [31]. Al ser una mezcla de agua con sólidos, su granulometría se caracteriza por la presencia de partículas finas menores a 20 micrones y un bajo contenido de agua, generalmente entre un 10 y 25%, de modo que la mezcla tiene una consistencia espesa, similar a la de una pulpa de alta densidad dada su concentración en peso superior al 15% [17].

2.5 Cemento

En términos generales, el cemento es un material con propiedades adhesivas y cohesivas, que le permite aglutinar fragmentos y formar una mezcla compacta [32].

Según el Instituto del Cemento y del Hormigón de Chile (ICH), el cemento es un material inorgánico molido, clasificado como un aglomerante hidráulico, propiedad que adquiere al requerir la incorporación de agua a su proceso de fraguado. Una vez mezclado con agua, el cemento tiene la capacidad de solidificarse y endurecerse debido a reacciones exotérmicas, lo que resulta en la consolidación de su macizo. Su fabricación se basa principalmente en la calcinación, a temperaturas que oscilan entre los 1350 y 1450°C, y posterior molienda de caliza, que posee un alto contenido de cal, y un componente rico en sílice, el cual puede ser arcilla o escoria de alto horno. Estos materiales se someten a un proceso de fusión incipiente en un horno rotatorio, con el objetivo de obtener clinker [33]. A continuación, en la Tabla 1 adjunta, se detalla la composición del material granular conocido como “clinker”.

Tabla 1. Composición del clinker, considerando pesos representativos [34].

Compuesto	Fórmula	Abreviación	% en peso
Silicato tricálcico (Alita)	Ca_3SiO_5	C_3S	55
Silicato bicálcico (Belita)	$2CaO * SiO_2$	C_2S	20
Aluminato tricálcico (Celita)	$3CaO * Al_2O_3$	C_3A	10
Ferroaluminato tetracálcico (Felita)	$4CaO * Al_2O_3Fe_2O_3$	C_4AF	8

A partir de este proceso, se obtiene un producto en forma de gránulos con un tamaño aproximado entre 0,5 y 25 [mm]. Así, el clinker es uno de los componentes con mayor importancia para la producción del cemento, ya que, al ser triturado y mezclado con yeso, permite fabricar los distintos tipos de cemento, los cuales, a su vez, se utilizan para producir hormigón [35].

2.5.1 Propiedades del cemento

Según lo indicado por la Norma NCh 148, los cementos en general poseen las siguientes propiedades: En primer lugar, la expansión en autoclave, que corresponde a un ensayo que mide un índice de la posible expansión retardada causada por la hidratación del óxido de calcio o el óxido de magnesio [36], debe ser inferior al 1% [37].

Por otro lado, el tiempo de fraguado, que es el proceso químico en el cual el cemento reacciona con agua para transformarse de un estado plástico a un estado sólido, marcando el fin de su trabajabilidad [38], dependerá del grado del cemento. En el caso de los cementos corrientes y los de alta resistencia, el tiempo de fraguado inicial debe ser de un mínimo de 60 y 45 minutos, respectivamente. Mientras que el tiempo de fraguado final, por su parte, debe ser de un máximo de 12 y 10 horas para el cemento corriente y el de alta resistencia, respectivamente [37]. El procedimiento para determinar estos tiempos está descrito en la Norma NCh 152 [39].

Por otra parte, se entiende como resistencia mecánica a la capacidad de un material de resistir tensiones, ya sean de compresión, tracción o flexión [40]. Esta propiedad se determina según la Norma NCh 158, cuyos valores se presentan a continuación en la Tabla 2:

Tabla 2. Resistencia a la compresión y a la flexión según Norma NCh 154 [41]

Grado	Resistencia mínima a la compresión $\left[\frac{kg}{cm^2}\right]$		Resistencia mínima a la flexión $\left[\frac{kg}{cm^2}\right]$	
	7 días	28 días	7 días	28 días
Corriente	180	250	35	45
Alta resistencia	250	350	45	55

Finalmente, el peso específico relativo se refiere a la relación entre el peso de un volumen de material a una temperatura determinada y el peso de un volumen igual de agua a esa misma temperatura [42]. Se determina según la Norma NCh 154. Para el cemento, el valor estándar de este parámetro es de $3,18 \left[\frac{kg}{dm^3} \right]$ [43]. Sin embargo, estudios realizados indican que este valor puede variar según la composición, por ejemplo, para el cemento Portland este valor debe ser superior o igual a $3 \left[\frac{kg}{dm^3} \right]$.

2.5.2 Clasificación del cemento

De acuerdo con la Norma NCh 148, los cementos se clasifican según sea su composición y resistencia, como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Clasificación de los cementos según su composición [37].

Designación	Clinker [%]	Puzolana [%]	Escoria [%]
Portland	100	-	-
Portland Puzolánico	≥ 70	≤ 30	-
Portland Siderúrgico	≥ 70	-	≤ 30
Puzolánico	50-70	30-50	-
Siderúrgico	25-70	-	30-75

A partir de esta clasificación, es posible determinar la importancia de la composición de los diversos tipos de cementos, lo cual influye en cómo actúan como elementos aglutinantes y sus múltiples áreas de aplicación [44]. Además, su resistencia, considerada la característica mecánica principal de este material, impacta directamente en su capacidad para soportar cargas por unidad de área [45]. Esta propiedad es crucial a la hora de determinar factores como la relación agua-cemento, las condiciones de temperatura y la calidad intrínseca de los agregados, entre otros, que pueden afectar en el comportamiento final del concreto.

2.5.3 Cemento Portland

El cemento Portland es un polvo finamente molido compuesto, principalmente, por silicato de calcio y, en menor medida, por aluminato de calcio [46]. Si bien este tipo de cemento es el más utilizado a nivel global, se estima que para el año 2025 el tamaño del mercado alcance una cifra cercana a 1,34 mil millones de toneladas, con una tasa de crecimiento para el año 2030 de 4,69% [47]. Sin embargo, el cemento Portland constituye uno de los principales emisores de CO_2 , con una emisión que oscila entre 500 y 600 kg de CO_2 por tonelada producida [48].

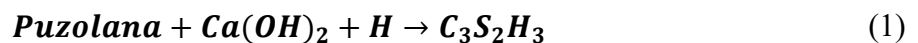
La aplicabilidad de este cemento se emplea preferentemente en hormigones de alta resistencia, en la elaboración de elementos prefabricados y en obras especiales [49]. Además, existe una amplia variedad de tipos de cemento Portland, clasificándose internacionalmente según la Norma ASTM C150 [50], cuya especificación es descrita a continuación:

- Tipo I: Para uso general, cuando no se requieren propiedades especiales.
- Tipo IA: Cemento incorporador de aire para los mismos usos que el Tipo I.
- Tipo II: Para uso general, cuando se desea una resistencia moderada a los sulfatos.
- Tipo IIA: Cemento incorporador de aire para los mismos usos que el Tipo II.
- Tipo II (MH): Para uso general, cuando se desea un calor de hidratación (MH) moderado y una resistencia moderada a los sulfatos.
- Tipo II (MH)A: Cemento incorporador de aire para los mismos usos que el Tipo II (MH).
- Tipo III: Para usos cuando se desea una alta resistencia inicial.
- Tipo IIIA: Cemento incorporador de aire para el mismo uso que el Tipo III.
- Tipo IV: Para usos cuando se desea un calor de hidratación bajo.
- Tipo V: Para usos cuando se desea una alta resistencia a los sulfatos.

Así, los diferentes tipos de cemento Portland difieren en su comportamiento estructural, el cual está condicionado por su composición química, siendo cuatro los compuestos principales, como se indica en la Tabla 1 “Composición del clinker”. Sin embargo, las variaciones entre los tipos de cemento se originan en los agregados que se incorporan durante su producción. Por ejemplo, los cementos inclusores de aire se elaboran añadiendo cerca de 0,05% de un agente orgánico [51], mientras que los cementos resistentes a los sulfatos requieren una reducción en su contenido de aluminato tricálcico (C_3A), alcanzando un valor $\leq 5\%$ [52].

2.5.4 Hidratación del cemento con adición puzolánica

La hidratación del cemento es el proceso mediante el cual este material se mezcla con agua, reaccionando y generando estructuras cristalinas que conllevan a que se comporte como un material aglutinante [53]. Es otras palabras, es una reacción exotérmica que genera una liberación de calor [54]. Para cementos con adición puzolánica, la ecuación que representa la reacción de hidratación [55] es la siguiente:



Este proceso tiene un impacto significativo en el tiempo de fraguado del material cementante, en su capacidad de retención de trabajabilidad y, en el desarrollo de propiedades mecánicas tempranas [56]. La contribución de las mejoras en las propiedades del material se atribuye a los productos formados a partir del proceso de hidratación, específicamente, al gel de silicato de calcio hidratado (*CSH*), el hidróxido de calcio (*CH*) y la etringita, siendo esta última formada en mezclas de cemento que contienen materiales cementantes suplementarios [57].

El proceso consta de cinco etapas: mezclado, inactividad, endurecimiento, enfriamiento y densificación, como se aprecia en la Figura 3.

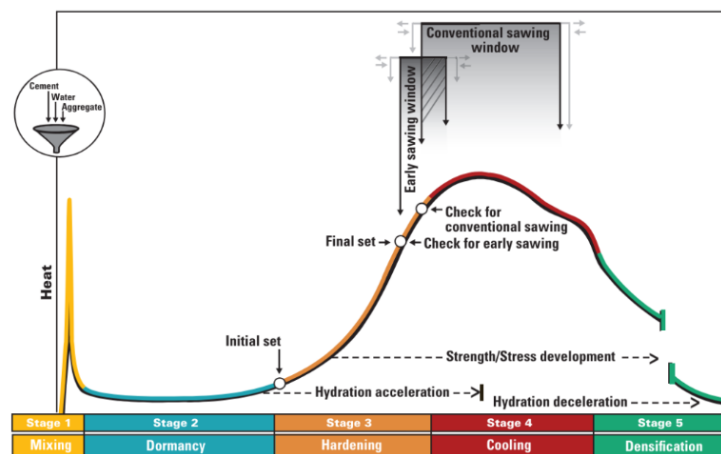


Figura 3. Etapas de la hidratación del cemento [58].

En particular, la etapa de mezclado corresponde a la fase inicial del proceso de hidratación, en donde los silicatos del cemento y el agua reaccionan. En este punto, el aluminato tricálcico (C_3A) y el yeso se disuelven instantáneamente, formando un “gel” (*CASH*) que recubre los granos de cemento, impidiendo el ingreso de agua y controlando la velocidad de la reacción del aluminato [58].

Posteriormente, en la fase de latencia silenciosa o inactividad, se producen lentas reacciones químicas [59] de los aluminatos, siendo controlada por la etringita. Aquí, el material suele presentar un comportamiento plástico y no genera calor, ya que, la velocidad de liberación de energía se mantiene constante durante este período.

Una vez que el agua se sobresatura por el exceso de iones de calcio (Ca^{+}), se inicia la etapa de endurecimiento o fraguado [58]. Esta etapa consta de dos fases: el fraguado inicial, donde el cemento comienza a solidificarse y adquirir resistencia por la formación de una red de compuestos debido a la presencia de sílice de calcio hidratada (*CSH*), y el final, donde se alcanza la máxima resistencia [60].

Una vez finalizada la etapa anterior, continúa la fase de enfriamiento, en donde la liberación de calor alcanza su punto máximo, comenzando a disminuir progresivamente. Mientras la reacción del silicato tricálcico (C_3S) comienza a desacelerar debido a que la sílice de calcio hidratada (CSH) y el hidróxido de calcio (CH) impiden el contacto entre las partículas de cemento y el agua. Esta disminución en la velocidad de reacción genera un aumento gradual en la resistencia [57].

Finalmente, al entrar en la etapa final, el proceso de hidratación inicia un periodo de desarrollo constante [59], donde la reacción continúa siempre y cuando haya silicato tricálcico (C_3S) y agua. Sin embargo, la velocidad de reacción es cada vez más lenta, lo cual es atribuible al agotamiento de partículas pequeñas que se han hidratado completamente [58].

2.6 Actividad puzolánica

Según el American Concrete Institute (ACI), las puzolanas son materiales que contienen sílice y alúmina que, por si solos, poseen un poder cementante bajo o nulo; sin embargo, en presencia de humedad reaccionan con el hidróxido de calcio ($Ca(OH)_2$) para formar compuestos con propiedades cementantes [61]. Por esta razón, se clasifican como materiales cementantes. A su vez, la Norma ASTM C618 establece que los principales tipos de puzolanas son: las puzolanas naturales y las puzolanas artificiales [62].

Por un lado, las puzolanas naturales son materiales que se encuentran en la naturaleza, generalmente provienen de depósitos minerales y volcánicos naturales [63]. Estas puzolanas suelen ser utilizadas como adición al cemento y para ello, requieren de procesos mecánicos como la molienda y, en otros casos, tratamientos térmicos para su activación [64]. Entre los ejemplos más comunes se encuentran las cenizas volcánicas, tufos o tobas volcánicas (zeolitas) y tierras de diatomeas (diatomitas) [65].

En cambio, las puzolanas artificiales son el resultado de diversos procesos industriales, generalmente como subproductos [66]. Estos subproductos, que a menudo presentan una reactividad moderada a alta debido a su composición química, pueden requerir procesamiento, como secado o pulverizado, antes de ser empleados. Dentro de este grupo destacan las cenizas volantes, el humo de sílice, la escoria de alto horno y la ceniza de fondo [67].

Es así como estos materiales producidos natural o artificialmente, debido a su actividad puzolánica, se emplean como materiales cementantes suplementarios para composiciones específicas. Generalmente, la composición y las propiedades de las puzolanas varían según su origen [68], sin

embargo, su adición como aditivo mineral en cemento tiende a mejorar la durabilidad y la resistencia del concreto.

En este sentido, diversos autores han propuesto métodos para mejorar la reactividad puzolánica, dada su importancia en la optimización del desempeño del concreto. En general, reducen la liberación de hidróxido cálcico, mitigan la ocurrencia de reacciones expansivas y controlan el carácter exotérmico de las reacciones de hidratación [69]. Entre los métodos más utilizados destacan la activación mecano-química y la activación ácida [70], los cuales potencian la eficiencia de las puzolanas.

2.7 Morteros

El mortero es una mezcla homogénea compuesta principalmente por áridos finos, agua y un conglomerante inorgánico, que generalmente corresponde a cal, yeso o cemento [71]. En construcción, se emplea como adhesivo para rellenar juntas entre bloques, actúa como aislador e incluso como refuerzo en fachadas [72].

En cuanto a su regulación, la Norma NCh 2256 establece los requisitos generales que deben cumplir los morteros a base de cemento, según sea su aplicación en obras de construcción, albañilería y revestimientos [73]. Esta norma resalta la importancia de las propiedades que caracterizan al mortero, entre ellas, la resistencia mecánica, la consistencia, la retentividad, la adherencia y la durabilidad.

Asimismo, clasifica los morteros de acuerdo con su sistema de fabricación. En primer lugar, el mortero predosificado corresponde a aquel en el que sus componentes, excepto el agua, se dosifican y mezclan para obtener un producto seco. En segundo lugar, el mortero premezclado se elabora con todos sus componentes ya dosificados y mezclados, incorporando aditivos y conglomerantes, lo que permite su empleo como mortero fresco. Finalmente, la última categoría corresponde al mortero hecho en obra, preparado directamente en el lugar de construcción, donde se dosifican y mezclan sus componentes [74].

Si bien la norma establece los requisitos generales para el uso de morteros, resulta indispensable complementarla con otras normativas que regulan las características de los componentes que lo conforman. De este modo, se asegura que cada material cumpla con los estándares de calidad necesarios, garantizando así la correcta preparación del mortero y su desempeño en obra. En la Tabla 4 se presentan las normativas específicas aplicables a cada componente, según corresponda.

Tabla 4. Normativas complementarias para la fabricación de morteros [75].

Componente	Norma	Título
Cemento	NCh 148	Cemento – Terminología, clasificación y especificaciones generales.
	NCh 158	Cemento – Ensayo de flexión y compresión de morteros de cemento.
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 de laboratorio.

2.8 Procesos de activación

La reactividad de los materiales está determinada por su estabilidad estructural; así, aquellos materiales que presentan más defectos en su microestructura, una mayor distorsión en sus redes cristalinas o que se encuentran en un estado amorfo tienden a tener una mayor reactividad [76]. En el caso de los relaves mineros, se han propuesto métodos de pretratamiento y activación para aumentar la reactividad de este material, tales como la activación mecánica, química, térmica y compuesta [77], presentadas a continuación en la Figura 4.

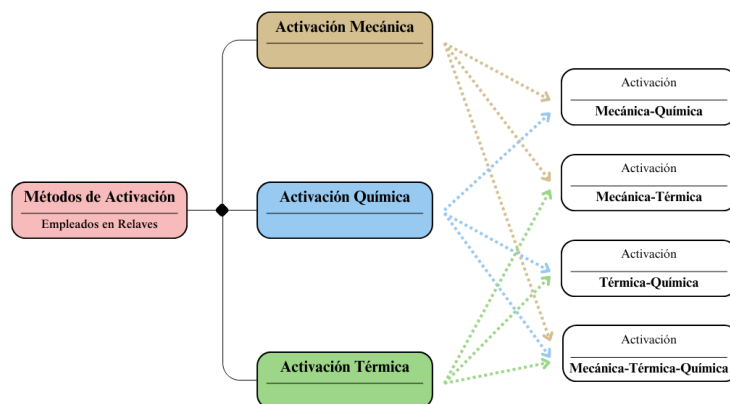


Figura 4. Métodos de activación utilizados para el pretratamiento de relaves mineros [77].

Es así como estos métodos de pretratamiento mejoran la tasa de carbonatación, proceso por el cual el dióxido de carbono (CO_2) reacciona con el óxido de calcio (CaO) para formar carbonato de calcio ($CaCO_3$) [78], a través de la destrucción de las estructuras cristalinas del material tratado.

En general, para que el relave pueda ser empleado como un material cementante suplementario (SCM) debe presentar al menos una de las siguientes propiedades: puzolánicas, hidráulicas o activadoras [79].

2.8.1 Activación mecánica

La activación mecánica es un proceso que utiliza energía mecánica para inducir cambios en el material, aumentando la reactividad del material sin alterar su composición química. Lo hace mediante el incremento del área superficial específica y la generación de un desorden en su estructura cristalina que mejora la velocidad de reacción para el procesamiento posterior [80]. Asimismo, este cambio fisicoquímico se lleva a cabo mediante molienda, la cual reduce el tamaño de partícula del material, desencadenando transformaciones en su estructura cristalina [81].

Sin embargo, el efecto de la activación mecánica depende del tipo de dispositivo utilizado para llevar a cabo el proceso [82]. En minería, la molienda generalmente se realiza en molinos en seco o en húmedo. La molienda en seco se caracteriza por un contenido de humedad inferior al 3-4%, mientras que la molienda en húmedo opera con niveles de humedad entre el 5% y el 10% [83].

En particular, diversos estudios relacionados con la activación mecánica de relaves mineros han evidenciado un aumento en la velocidad de reacción de estos materiales. Yunhong et al. [76] señalan que la activación mecano-química de relaves de hierro silíceo, empleados como sustituto parcial del cemento, mejora la impermeabilidad del hormigón a medida que incrementa el porcentaje de reemplazo. No obstante, expone que la resistencia a la carbonatación tiende a disminuir con mayores proporciones de sustitución, aunque el hormigón mantenga una buena durabilidad. Por su parte, Li y Hitch [84] destacan que la activación mecánica de silicatos de magnesio ofrece buenos resultados siempre y cuando se active adecuadamente la estructura cristalina de dichos minerales. En el caso del olivino, por ejemplo, se observan cambios crecientes en su área superficial en las primeras etapas, pero, tras un tiempo considerable de molienda o bajo ciertas condiciones, esta tiende a estabilizarse e incluso a decrecer.

Asimismo, Yang et al. [85] atribuyen esta disminución en el área superficial a fenómenos de aglomeración y formación de nuevos enlaces químicos durante tratamientos de alta energía. A su vez, Mañosa et al. [86] indican que la activación mecánica de arcillas moscovíticas potencia su actividad puzolánica frente a las tratadas térmicamente, lo que se relaciona con la disminución del tamaño de las partículas y la generación de estructuras amorfas que favorecen la reacción del silicio y el aluminio con la portlandita. A su vez, Makó et al. [87] destacan la presencia de cuarzo durante la molienda, señalando que este mineral puede acelerar el proceso debido a la dureza de sus partículas, lo que hace que actúe como medio de molienda.

Finalmente, Valdés, M [88] señala que al emplear mezclas con reemplazo de cemento por relave fino activado ($<150\text{ }\mu\text{m}$), se mantuvo o mejoró la resistencia mecánica hasta un 20% de reemplazo, con molienda de 15 minutos a 1 hora, mientras que reemplazos mayores al 30% o moliendas prolongadas disminuyeron significativamente la resistencia debido a la pérdida de compacidad y reactividad.

2.8.2 Activación térmica

La activación térmica consiste en la transformación de fases cristalinas y amorfas de los minerales presentes en el relave cuando el material se somete a altas temperaturas [89]. A menudo, la temperatura de calcinación influye en las propiedades puzolánicas del material resultante; sin embargo, la mayor reactividad se alcanza una vez provocado el fenómeno de deshidroxilación [90], en el cual se liberan grupos hidroxilo (OH) y se forman moléculas de agua [91].

La temperatura óptima de calcinación depende de la pureza del material y de la composición mineralógica de éste. En este sentido, Tironi et al. [92] describen que la activación térmica de bentonitas a 700°C durante 5 minutos provocó una reducción de la resistencia a la compresión a 7 días cuando el 30% del cemento fue reemplazado por arcilla calcinada. Sin embargo, a los 28 y 90 días se evidenció una mejora en la resistencia, alcanzando hasta un 80% de la resistencia de referencia.

Según Salazar, R [93], con un protocolo de calcinación óptimo ($850\text{-}1000^{\circ}\text{C}$), un reemplazo moderado del 10-20% para el cemento y 20-35 % para el árido, junto con el uso de aditivos como CaO y fibras, es posible diseñar morteros sostenibles de alto desempeño. Por otro lado, Vega, F [94] destaca que las muestras con 10% de cemento calcinado a 1200°C y 20% de áridos sin calcinar mostraron un buen desempeño, evidenciando que la forma esférica de las partículas favorece la resistencia al imitar el proceso de un horno flash.

A su vez, Makó et al. [87] plantean que la activación mecano-química de la caolinita, tras molienda y calcinación a 800°C , presenta dos etapas de pérdida de masa asociadas a la liberación de agua absorbida y al proceso de deshidroxilación. Además, destacaron que a mayor tiempo de molienda aumenta el contenido de agua de hidratación, mientras que disminuye la cantidad de agua de deshidroxilación debido a la estructura amorfa de la caolinita.

Por su parte, Ilic et al. [95] evaluaron la activación térmica y mecánica de caolín bajo diferentes condiciones: calcinación a 700 y 750°C durante 30 y 180 minutos, y molienda entre 30 minutos y 20 horas. Los resultados mostraron que, incluso tras 20 horas de molienda, la fase de mica no alcanzó

una amorfización completa, mientras que la caolinita sometida a activación térmica sí se transformó por completo en metacaolinita amorfa. Concluyeron que la actividad puzolánica del caolín activado térmicamente se ve influenciada tanto por la amorfización parcial de la caolinita como por la amorfización completa de la mica, mientras que en el caolín activado mecánicamente la actividad puzolánica se vio afectada por el aumento de su área superficial.

Por otro lado, Bhushan [96] presentó una revisión relacionada con la inclusión de aditivos minerales para optimizar las propiedades del mortero y del hormigón geopolimérico. En dicha revisión destaca que la transformación de caolinita a metacaolín (aluminosilicato anhidro de carácter amorfo obtenido por calcinación) obedece a la deshidroxilación de la caolinita, con pérdida de agua estructural y generación de una red altamente desordenada; este metacaolín resulta altamente reactivo en presencia de soluciones que contengan iones alcalinos o alcalinotérreos. Asimismo, el autor señala que el tamaño fino de las partículas de metacaolín actúan como microagregado, rellenando poros, lo que reduce la porosidad y densifica la microestructura de la matriz.

Finalmente, Tironi et al. [97] estudiaron un caolín para determinar la temperatura óptima de calcinación que maximiza su reactividad frente al hidróxido de calcio. Identificaron como fase principal del caolín, la caolinita y como fase minoritaria el cuarzo. Mediante análisis térmico diferencial (DTA) establecieron la temperatura de deshidroxilación en 577,2°C, correspondiente a la transición de caolinita a metacaolín. La calcinación de un caolín con alto contenido de caolinita y estructura ordenada en el rango de 700-800°C produce una fase amorfa (metacaolín) que actúa como puzolana. Sin embargo, a partir del análisis cinético se determinó que, cuando la temperatura de calcinación supera los 750°C, menor es la constante de velocidad y, en consecuencia, el metacaolín formado presenta menor reactividad.

2.8.3 Activación química

La activación química consiste en la incorporación de un agente activador capaz de inducir reacciones químicas orientadas a liberar iones como silicio (*Si*) y aluminio (*Al*) [98]. En particular, el material activado alcalinamente se obtiene mediante la reacción entre una fuente sólida o soluble de metal alcalino, que aporta cationes, aumenta el pH de la mezcla de reacción y acelera la disolución del precursor sólido, y un polvo de silicato [99]. De este modo, cualquier compuesto puzolánico o fuente de sílice y alúmina que se disuelva fácilmente en la solución alcalina actúa como una fuente de especies precursoras de geopolímeros, lo que favorece el proceso de geopolimerización [100].

En general, suelen emplearse materiales con elevada actividad puzolánica para interactuar con el cemento Portland, tales como escorias de alto horno, cenizas volantes y arcillas calcinadas del grupo de la caolinita [101]. En el caso particular de los relaves mineros, la activación alcalina se basa en el uso de álcalis para estimular su reactividad. Entre los activadores más comunes se encuentran: hidróxido de sodio ($NaOH$), hidróxido de potasio (KOH), silicato de sodio (Na_2SiO_3), silicato de potasio (K_2SiO_3), sulfato de sodio (Na_2SO_4), sulfato de potasio (K_2SO_4), carbonato de sodio (Na_2CO_3) y carbonato de potasio (K_2CO_3) [102]. Comparativamente, el KOH confiere una mayor alcalinidad en la mezcla en comparación con el $NaOH$; sin embargo, en la práctica suele preferirse el $NaOH$ por su mayor eficacia para promover la liberación de monómeros de silicato y aluminato [96].

De acuerdo con Shi et al. [103], la activación de cementos mediante cal combinada con puzolanas naturales, cenizas volantes, metacaolín o escorias resulta ser un activador eficaz, ya que aumenta el pH del sistema, acelera las reacciones y contribuye a densificar la microestructura del material.

Por su parte, Aydin y Cagatay [104] estudiaron la activación alcalina de arcillas residuales con boro, empleando dos activadores: hidróxido de sodio ($NaOH$) y silicato de sodio (Na_2SiO_3), siendo este último el más eficiente. Además, concluyeron que la activación alcalina debe complementarse con un tratamiento térmico, en este caso, una calcinación a $800^{\circ}C$, para obtener resistencias a la compresión de hasta 38 [MPa], junto con valores aceptables de absorción de agua y retracción por secado.

Asimismo, Ye et al. [105] demostraron la viabilidad de sintetizar un material geopolimérico, destacando que el tratamiento térmico tiene una gran influencia en la transformación de la fase de aluminosilicatos. Específicamente, señalaron que la calcinación óptima del lodo rojo Bayer (RM) ocurre a $800^{\circ}C$ durante 3 horas, lo que permite la deshidroxilación de la katoíta, la moscovita y la hibschita, generando la formación de átomos de aluminio en coordinación cuádruple o quintuple. Este proceso podría contribuir a la despolimerización de los aluminosilicatos y mejorar su disolución en un entorno alcalino. Además, los materiales de aluminosilicatos se disolvieron en la solución alcalina, formando partículas nanométricas que participaron en las reacciones posteriores.

Xu y Deventer [100] investigaron la geopolimerización de 16 minerales naturales de Al-Si, entre los que se incluyen andalucita, augita, illita, anortita, entre otros. En términos generales, todos estos minerales fueron solubles en una solución alcalina concentrada, mostrando un mayor grado de disolución en hidróxido de sodio que en hidróxido de potasio. La estructura de marco presentó el mayor grado de disolución tanto para silicio como para aluminio, seguida de las estructuras de cadena,

que también mostraron alta solubilidad. El orden de disolución de las otras estructuras, como las de lámina y anillo, fue menos evidente. El silicio y el aluminio parecieron disolverse de manera sincronizada desde la superficie de los minerales, ya que el grado de disolución para los diferentes minerales mostró un alto coeficiente de correlación.

Por otro lado, Espinoza y García [106] utilizaron zeolitas naturales ricas en cuarzo (22,9%) y calcita (22,2%) para preparar cementos alternativos mediante activación alcalina. Evaluaron el efecto de los activadores alcalinos y determinaron que la adecuada incorporación de una cantidad adicional de calcio a las mezclas geopoliméricas incrementa las propiedades mecánicas del material, específicamente en función de la masa de zeolita. Sin embargo, al incorporar el calcio en relación con la masa total de la mezcla seca, el exceso de calcio puede interactuar con el ambiente, produciendo carbonatación.

Finalmente, Emler et al. [107] evaluaron cuatro tipos de relaves mineros como precursores de materiales activados con álcali. Los resultados mostraron que los relaves presentaban una alta finura, asociada al intercrecimiento de los minerales valiosos con los de la matriz. Determinaron, además, que la activación alcalina de los relaves puede otorgar buenos resultados en términos de resistencia dependiendo de las condiciones de curado, y que la molienda fina del relave mejora notablemente el desempeño mecánico.

3 Metodología experimental

En esta sección se presenta la metodología aplicada en el desarrollo del estudio, estructurada según el paso a paso definido para la investigación. En primer lugar, se describe el proceso de caracterización del relave utilizado como sustituto parcial del cemento, junto con la especificación de los demás materiales empleados en la elaboración del mortero. Posteriormente, se detalla la preparación de las mezclas, considerando las diferentes condiciones de activación aplicadas al material.

3.1 Materiales

A continuación, se presenta la descripción y caracterización de los materiales utilizados en la elaboración de las mezclas de mortero, según corresponda.

3.1.1 Cemento empleado

Para la confección del hormigón se utilizará cemento comercial Bio Bio, formulado específicamente para aplicaciones estructurales de alta durabilidad. Su composición se obtiene mediante la molienda conjunta de clinker, puzolana y yeso, lo que le otorga características adecuadas para su empleo en ambientes agresivos, tales como zonas marinas e industriales, donde se requiere una mayor resistencia a los procesos de deterioro físico y químico. Esta composición permite, además, mitigar los efectos potenciales de la reacción álcalis-árido, reduciendo el riesgo de expansión y fisuración en el hormigón endurecido [108].

De acuerdo con lo establecido en la norma chilena NCh 148-168, el cemento utilizado se clasifica como cemento puzolánico de grado corriente. Asimismo, presenta equivalencia normativa con la especificación ASTM C595 para cementos hidráulicos adicionados, lo que garantiza su idoneidad y cumplimiento de estándares internacionales aplicables a estructuras sometidas a condiciones ambientales exigentes.

Por otro lado, la caracterización mineralógica del cemento mediante difracción de rayos X (DRX) indica que el material está compuesto principalmente por hatrurita ($Ca_3(SiO_4)O$) y cuarzo (SiO_2), cuya proporción se detalla en la Tabla 5.

Tabla 5. Composición química del Cemento Bio Bio, mediante DRX.

Mineral	Fórmula	Composición [%]
Hatrurita	$Ca_3(SiO_4)O$	68,7
Cuarzo	SiO_2	14,5

Plagioclasa	$(Na, Ca)(Si, Al)_4O_8$	10,2
Akermanita	$Ca_2MgSi_2O_7$	6,6

3.1.2 Relave

Se utilizó el "Relave 1", cuya caracterización mineralógica, obtenida mediante difracción de rayos X, revela que está compuesto principalmente por cuarzo (SiO_2), labradorita ($CaAl_2Si_2O_8$) y moscovita ($KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$), con un contenido de 26,67%, 20% y 13,21%, respectivamente ([Difractograma Anexo 8.1](#)). Este material presenta un coeficiente de uniformidad (C_u) de 8,05 y un coeficiente de curvatura (C_c) de 1.09, una cohesión de 8,81 [kPa], un ángulo de reposo de 43,67° y un ángulo de fricción al corte de 54,04°. La Tabla 6 muestra la composición química del relave.

Tabla 6. Composición química del Relave 1, mediante DRX.

Mineral	Fórmula	Composición [%]
Cuarzo	SiO_2	26,67
Labradorita	$CaAl_2Si_2O_8$	20
Moscovita	$KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$	13,21
Albita	$NaAlSi_3O_8$	9,87
Caolinita	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$	7,76
Clorita	$(Mg, Fe)_3(Si, Al)_4O_{10}(OH)_2(Mg, Fe)_3(OH)_6$	7,07
Diópsido	$CaMgSi_2O_6$	4,85
Yeso	$CaSO_4 * 2H_2O$	4,03
Calcita	$CaCO_3$	3,4
Ortopiroxeno	$Mg_2Si_2O_6$	3,12

3.1.3 Árido fino

El árido fino utilizado en la elaboración de los morteros cumple con lo establecido en la Norma NCh 163 [109], la cual especifica las propiedades que deben presentar los áridos y filleres destinados a la fabricación de mortero u hormigón. El material presenta un coeficiente de uniformidad (C_u) de 1,94 y un coeficiente de curvatura (C_c) de 1,22, una cohesión de 5,48 [kPa], un ángulo de reposo de 35,90° y un ángulo de fricción al corte de 57,04°. Su composición mineralógica se detalla en la Tabla 7.

Tabla 7. Composición mineralógica del árido fino, mediante DRX.

Mineral	Fórmula	Composición [%]
Plagioclasas	$(Na, Ca)(Si, Al)_4O_8$	64,9
Piroxeno	$(Ca, Mg, Fe, Mn, Na, Li)(Al, Mg, Fe, Mn, Cr, Sc, Ti)(Si, Al)_2O_6$	13
Cuarzo	SiO_2	11,8
Olivino	$(Mg, Fe)_2SiO_4$	8,5

Granate	$(Mg, Fe, Mn, Ca)_3(Al, Fe^{+2}Cr^{+3})_2(SiO_4)_3$	1,7
Hematita	Fe_2O_3	0,1

Los resultados granulométricos de los materiales principales se comparan en la Figura 5. La caracterización del cemento se realizó mediante un análisis granulométrico utilizando difracción láser, observándose que el cemento analizado corresponde a un material de granulometría fina, con partículas predominantes en el rango de los micrómetros.

Por otro lado, el análisis granulométrico del relave de cobre también se realizó mediante difracción láser, técnica que permitió identificar una distribución granulométrica predominantemente dominada por fracciones finas. Como se observa en la figura, la mayor proporción del material se concentra en el rango de tamaño comprendido entre 10 y 100 μm .

En cuanto al árido, se llevó a cabo un tamizaje manual en dos tandas de 500 [g] de arena previamente secada, con el fin de realizar el análisis granulométrico. Los resultados obtenidos muestran que el rango de tamaños se concentra principalmente entre 100 μm y 1000 μm , con un pasante cercano al 99% en el intervalo de 1000 μm . La curva granulométrica presenta su pendiente más pronunciada entre 100 μm y 300 μm , lo que indica que la mayor proporción del material se encuentra en este intervalo. Este árido puede clasificarse como arena fina a media, adecuada para su uso en morteros.

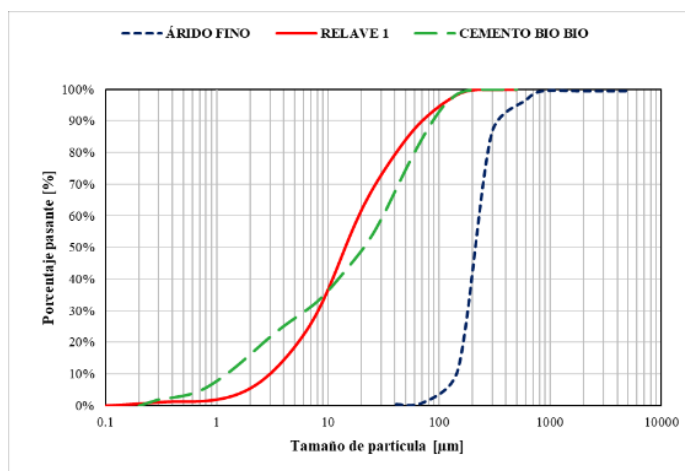


Figura 5. Comparación de curvas granulométricas del cemento, relave y árido fino.

3.1.4 Agua

El agua potable utilizada en la elaboración del mortero proviene de la red pública de la ciudad de Concepción (Chile). Su uso asegura la ausencia de sustancias contaminantes que puedan afectar el proceso de fraguado o las propiedades mecánicas del material. Asimismo, cumple con lo indicado en

la Norma NCh 1498 [110], que establece la clasificación y los requisitos que deben cumplir las aguas destinadas a la elaboración de hormigón y morteros. Adicionalmente, durante el proceso de elaboración se controló la temperatura del agua, manteniéndola en torno a los $23 \pm 2^\circ\text{C}$.

3.1.5 Cal

Todas las mezclas de relave fueron activadas químicamente mediante la incorporación de cal viva u óxido de calcio (CaO). Este compuesto, por su elevada alcalinidad y reactividad, permite generar una solución básica al combinarse con agua destilada, lo que, junto a la formación de un precipitado de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, favorece la activación de los aluminosilicatos presentes en el relave y, en consecuencia, la formación de un material con mayor resistencia y durabilidad [111]. Para su aplicación, la cal fue previamente hidratada y mezclada con una parte del relave, estableciéndose tiempos de activación de 1, 3 y 7 días para evaluar su efecto. Una vez cumplido cada periodo, la mezcla de relave activado se integró con el resto de los materiales, es decir, cemento, agua y arena.

3.2 Fabricación de probetas

En este apartado se detalla el procedimiento seguido para la elaboración de las probetas, incluyendo la dosificación requerida, la preparación y activación del relave, la elaboración de la mezcla, el vertido en los moldes, así como el proceso de curado y secado. Finalmente, se describen los ensayos de flexotracción y compresión aplicados en las probetas.

3.2.1 Dosificación

El estudio consideró una etapa inicial en la que se aplicaron secuencialmente los tres tipos de activación: mecánica, térmica y química, el detalle se ilustra en la Figura 6.

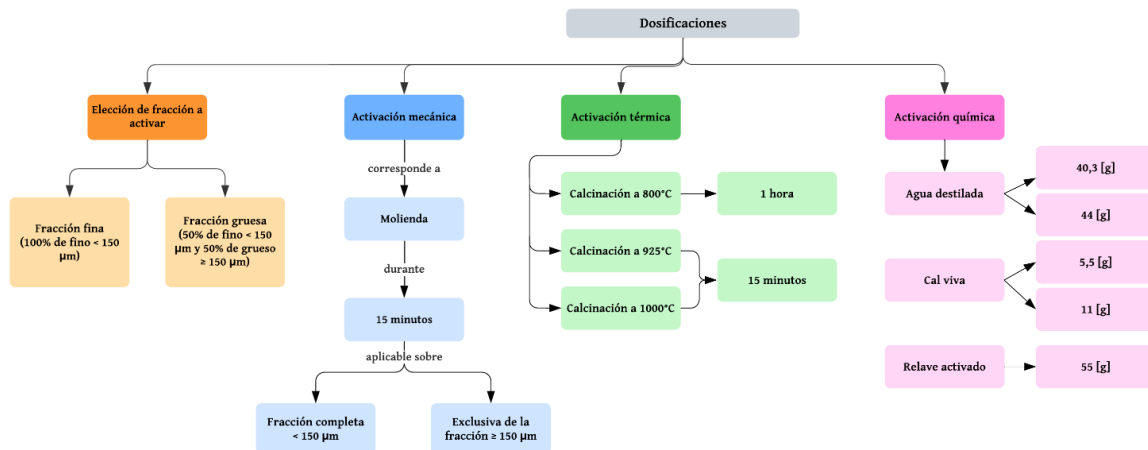


Figura 6. Esquema de las dosificaciones.

En primer lugar, se seleccionaron las fracciones a activar ($< 150 \text{ } [\mu\text{m}]$ y $\geq 150 \text{ } [\mu\text{m}]$) mediante tamizaje ([Véase Anexo 8.2](#)). Ambas fracciones fueron sometidas a molienda durante 15 minutos con el fin de reducir y homogeneizar el tamaño de las partículas. Luego, se agruparon las fracciones para continuar con las activaciones: la fracción fina que fue molida, y la fracción gruesa, que consistió en una mezcla en igual proporción de la fracción superior a $150 \text{ } [\mu\text{m}]$ molida y el material $< 150 \text{ } [\mu\text{m}]$ sin moler.

Posteriormente, el relave fue sometido a un proceso de calcinación (activación térmica) a tres temperaturas diferentes: 800 , 925 y 1000°C , siendo la primera temperatura aplicada durante 1 hora y las dos restantes durante 15 minutos, retirando las muestras una vez cumplido el tiempo de exposición y dejándolas enfriar a temperatura ambiente. En esta etapa se estableció un porcentaje de reemplazo de cemento del 10%. Concluida la activación mecánica y térmica, se procedió a la activación química, que consistió en la elaboración de una mezcla de relave activado mediante la incorporación de cal y agua destilada desarrollando la siguiente reacción química:



Durante la activación química, la mezcla se dejó reposar durante 1, 3 y 7 días, para luego ser incorporada al cemento reemplazando un 10% de este. Finalmente, se mezcló el material aglutinante con agua y arena en una proporción de 1:0.6:2. Tras evaluar los resultados obtenidos, se desarrolló una etapa complementaria enfocada en combinaciones óptimas a partir de los mejores resultados mecánicos registrados de la primera fase experimental y en complementar rangos no evaluados en las variables empleadas ([Véase Anexo 8.3](#)). Como referencia, se prepararon mezclas de control únicamente con cemento, agua y árido fino, en dos momentos diferentes del desarrollo de la investigación. La Figura 7 presenta la nomenclatura utilizada para la identificación de las probetas.

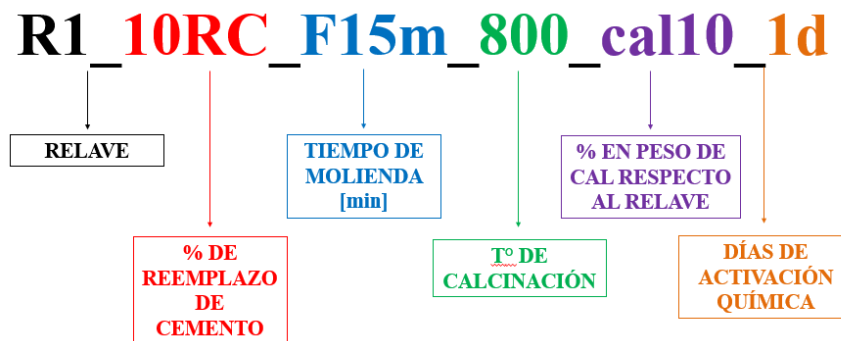


Figura 7. Nomenclatura de las muestras.

3.2.2 Activación del relave

El relave de pórfido cuprífero fue sometido a un proceso de activaciones secuenciales empleadas para potenciar sus propiedades puzolánicas y su desempeño mecánico como sustituto parcial del cemento. Dichas activaciones, se detallan a continuación:

3.2.2.1 Molienda

Para la activación mecánica, el relave de cobre fue sometido a molienda en seco en un molino de bolas tipo Marcy, con un volumen total de 5,4 litros. Se estimó una masa total de 3035 [g], la cual se procesó en cuatro tandas de 1000 [g] cada una, durante 15 minutos a una velocidad de 130 [r.p.m].

La molienda se realizó considerando los requerimientos específicos de tamaño de partícula: para las muestras de material < 150 [μm], se molió todo el material seleccionado; en cambio, para las muestras de fracción gruesa (una combinación en partes iguales de material ≥ 150 [μm] y < 150 [μm]), la molienda se aplicó sólo a la fracción ≥ 150 [μm], manteniendo la fracción < 150 [μm] sin procesar.

Para asegurar la eficiencia en la reducción granulométrica, el molino se cargó de manera balanceada con 87 bolas de acero, distribuidas en una combinación óptima de diámetros y pesos como indica la Figura 8 ([Véase Anexo 8.4](#)).

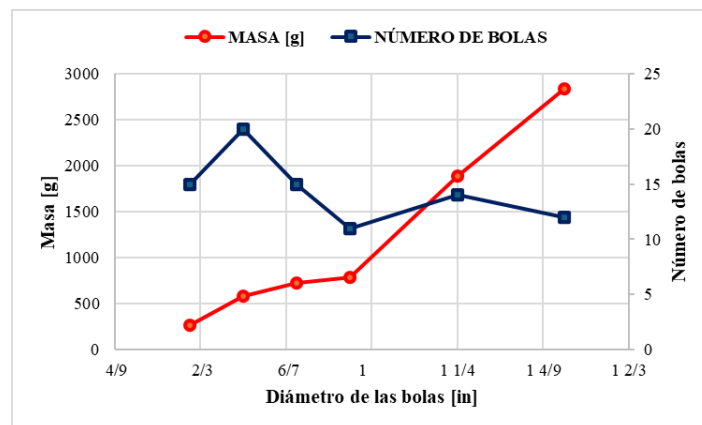


Figura 8. Características del Molino tipo Marcy utilizado para realizar la activación mecánica del relave.

3.2.2.2 Calcinación

Para la activación térmica del relave de cobre, después de la molienda, se efectuó un proceso de calcinación a tres temperaturas: 800, 925 y 1000°C, incorporándose posteriormente 940°C en la segunda etapa de la investigación. Todas las calcinaciones se realizaron durante 15 minutos, con excepción de la correspondiente a 800 °C, que se mantuvo por 1 hora. Las muestras se prepararon en

bandejas rectangulares de acero y se introdujeron en un horno de mufla *Thermo Scientific Thermolyne*. Una vez alcanzada la temperatura deseada, se cargaba la muestra y se mantenía durante el tiempo establecido. Al finalizar el tiempo de calcinación, la muestra se retiraba del horno y se dejaba enfriar a temperatura ambiente.

3.2.2.3 Activación Química

Una vez finalizadas las etapas de activación mecánica y térmica, se procedió a la activación química del relave 1 previamente molido y calcinado. Para ello, se preparó una mezcla compuesta por relave, cal y agua destilada ([Véase Anexo 8.5](#)). En el caso de las muestras con un 10% de reemplazo de cemento, la adición consistió en el empleo de 55 [g] de relave, incorporando 5,5 o bien 11 [g] de cal, según correspondiera al 10% o 20% en peso respecto del relave, y 40,3 o 44 [g] de agua destilada, en función de la cantidad de cal incorporada.

La mezcla activada se dejó reposar en bolsas cerradas sin aire contenidas en un desecador de vidrio durante 1, 3 y 7 días, con el fin de protegerla del exceso de humedad ambiental. Una vez cumplido el periodo de reposo, las mezclas fueron reservadas para posteriormente confeccionar el mortero.

3.2.3 Caracterización mineralógica del relave

Para identificar y cuantificar las fases cristalinas presentes en el relave, se utilizó la técnica de difracción de rayos X (DRX). Esta metodología permite detectar la composición mineralógica del material al analizar los patrones de difracción generados por la interacción de los rayos X con la estructura interna de las fases cristalinas presentes en el relave. A través de este análisis, es posible obtener información sobre los minerales que componen el material y su distribución cristalina.

En el presente estudio, el análisis DRX se aplicó a muestras sin tratamiento, así como a aquellas sometidas a molienda, calcinación a 800°C, 925°C y 1000°C, y a muestras que combinaron tanto molienda como calcinación ([Véase Anexo 8.6](#)), tal como se ilustra en la Figura 9. El objetivo de esta aplicación es evaluar el posible efecto de la activación mecánica, térmica y la combinación de ambos tratamientos sobre la mineralogía del relave, y su influencia potencial en la actividad puzolánica.

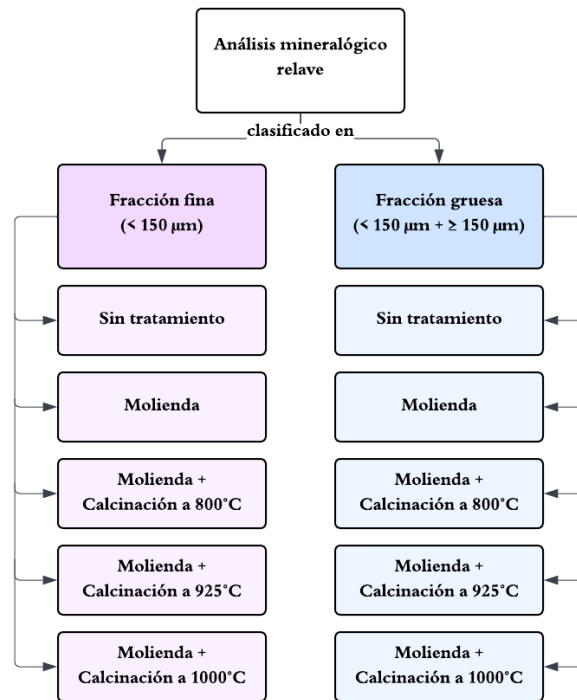


Figura 9. Distribución de muestras de relave sometidas a análisis mineralógico mediante DRX.

3.2.4 Elaboración del mortero

La preparación de la mezcla comenzó con la elaboración del mortero, siguiendo el procedimiento descrito en la Norma NCh 158 [112].

Se utilizó un mezclador de eje vertical. En posición de partida, se vertieron el agua y el cemento en el contenedor, iniciando el mezclador a velocidad lenta durante 30 segundos. Luego, se incorporó gradualmente el árido fino durante 30 segundos más, tras lo cual se aumentó la velocidad del mezclador por otros 30 segundos. Finalizado este tiempo, el mezclador se detuvo durante 1 minuto y 30 segundos, período durante el cual el mortero adherido a las paredes del contenedor fue raspado con una espátula de goma, sin compactar el material en el fondo. Finalmente, el mezclador se reinició a velocidad alta durante 1 minuto.

Con la mezcla preparada, se realizó el ensayo de trabajabilidad mediante el cono de Abrams, según la Norma ASTM C1437 [113]. Se aplicó agua sobre la superficie del ensayo, se posicionó el cono y se llenó hasta la mitad con la mezcla de mortero. Esta capa fue apisonada 20 veces con el pisón, distribuyendo uniformemente sobre la sección transversal. A continuación, se agregó la mezcla restante y se apisonó nuevamente 20 veces, retirando el exceso de material con una espátula metálica.

Finalmente, el cono se levantó en un solo movimiento, y se midió el asentamiento del mortero respecto al molde.

Una vez evaluada la trabajabilidad, la mezcla se vertió en moldes prismáticos de $40 \times 40 \times 160$ [mm] colocados sobre una mesa de compactación. El vertido se realizó en dos etapas: primero hasta la mitad de la capacidad, apisonando la mezcla 20 veces, y luego la mitad restante, apisonando nuevamente. La superficie se emparejó y se aplicó vibración mecánica durante 10 a 15 segundos para eliminar burbujas de aire y mejorar la densificación.

Los moldes se ubicaron sobre un mesón y se cubrieron con lámina plástica, permitiendo un fraguado inicial de 24 horas sin pérdida de humedad. Transcurrido este tiempo, las probetas se desmoldaron utilizando un martillo de goma y se procedió al curado por inmersión, conforme a la Norma NCh 2261 [114]. Las probetas fueron sumergidas en agua saturada en cal, a una temperatura controlada de $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ y pH entre 12,5 y 13,5, durante periodos de 28, 56 y 84 días ([Véase Anexo 8.7](#)).

Finalmente, una vez transcurrido el tiempo de curado, las probetas fueron retiradas, secadas según la Norma ASTM C642 [115] a 110°C durante 24 horas, medidas ([Véase Anexo 8.8](#)) y pesadas en seco ([Véase Anexo 8.9](#)), para proceder a la realización de los ensayos mecánicos.

3.2.5 Ensayos mecánicos

Tras completar los tiempos de curado por inmersión, las probetas fueron secadas y sometidas, en primer lugar, al ensayo de resistencia a la flexo-tracción, según la Norma ASTM C78/C78M [116]. Este ensayo se realizó utilizando el método de los tres puntos, aplicando la carga a una velocidad de 5 [mm/min] en un único punto central de la probeta, generando un momento flector máximo en dicha zona. Para ello se empleó el equipo *INSTRON modelo 8801*.

El ensayo permitió determinar la resistencia del mortero a esfuerzos de tracción indirecta, expresada en megapascales [MPa]. Tras la ruptura por flexión, cada probeta quedó dividida en dos mitades, las cuales fueron posteriormente sometidas al ensayo de compresión, conforme a la Norma NCh 158 [112].

El ensayo de compresión se realizó en una prensa hidráulica *MATEST modelo C088-IIN*, sobre una sección de 40×40 [mm], con un gradiente de carga de 1,5 [MPa/s] y una duración aproximada de 10 segundos ([Véase Anexo 8.10](#)). Para cada mezcla, se ensayaron 3 probetas, y los resultados se expresaron en [MPa].

4 Resultados

4.1 Análisis del tamaño de partícula: Difracción láser

Para la caracterización granulométrica de las partículas de relave sometidas a tratamientos de molienda y calcinación, se empleó la técnica de difracción láser. Este procedimiento se aplicó tanto al relave sin tratar como a aquellos que habían sido sometidos a procesos de molienda y calcinación a diversas temperaturas. A continuación, en la Figura 10 se presentan las curvas granulométricas comparativas de las fracciones fina y gruesa, con y sin activación mecánica.

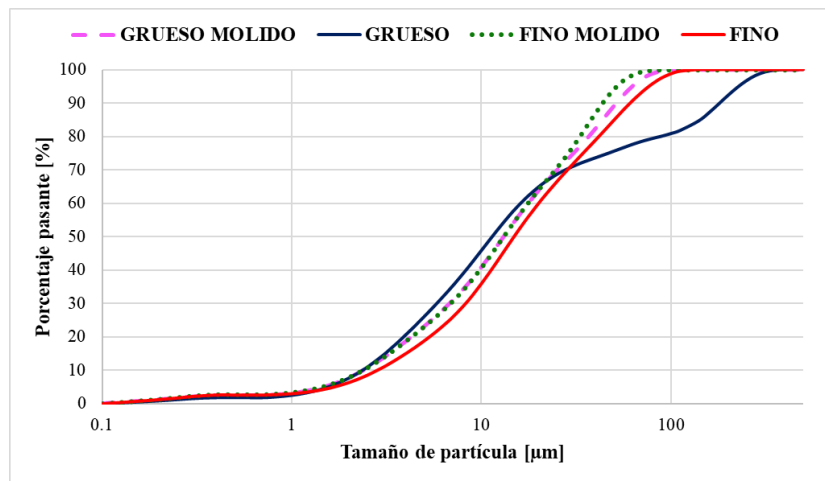


Figura 10. Curvas granulométricas de las fracciones fina y gruesa del relave: pre y post molienda.

Es posible observar un efecto significativo en la molienda al comparar las curvas granulométricas del material fino y grueso, tanto molido como sin tratar. Se evidencia una mayor eficiencia en la molienda del material grueso, ya que se registra un cambio considerable en el tamaño de las partículas de la fracción gruesa respecto a la fracción gruesa sin tratar. Sin embargo, este efecto no se presenta en la fracción fina. Este comportamiento sugiere realizar la activación mecánica en la fracción mayor a 150 μm , lo que permite utilizar la fracción fina sin tratamiento mecánico y, a su vez, optimizar el consumo de energía en el proceso. La baja eficiencia observada en la molienda podría atribuirse a la abrasión de las partículas minerales [117].

La diferencia entre las fracciones fina y gruesa sin tratar es evidente, con un valor de D_{80} mucho mayor para la fracción gruesa (88,943 μm) en comparación con la fracción fina (41,712 μm). No obstante, la molienda provoca una reducción considerable en estos valores, especialmente en el caso de la fracción gruesa, aunque el D_{80} de la fracción gruesa molida sigue siendo superior al de la fracción fina molida.

La reducción del D_{90} de la fracción gruesa también es significativa (de 181,49 μm a 51,506 μm), lo que demuestra una molienda eficiente, aunque con una mayor dispersión en los tamaños de las partículas en comparación con la fracción fina.

De manera similar, se observa un efecto en el proceso de tamizaje, como se muestra en la Figura 11. En todos los casos, tanto en el material tamizado como en el sometido a molienda, se identifican dos familias de partículas. Esto sugiere que el material posee varias fracciones dominantes, lo que indica su naturaleza heterogénea. No obstante, el proceso de tamizaje presenta una menor eficiencia. La curva amplia correspondiente a la familia de partículas ubicada en el lado izquierdo del material grueso muestra una considerable variabilidad en el tamaño de las partículas, lo que podría indicar un proceso de clasificación menos eficaz. Tras la molienda, estas partículas se fragmentan aún más.

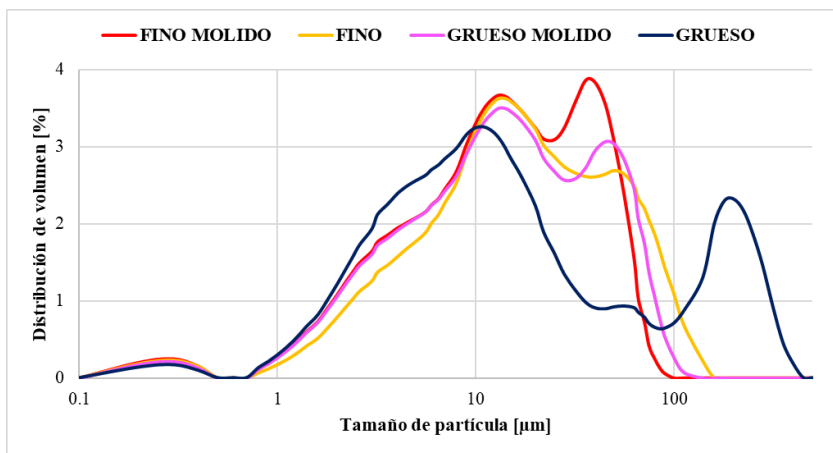


Figura 11. Distribución granulométrica de las fracciones fina y gruesa del relave: pre y post molienda.

Otro efecto notable es el de la temperatura, como se observa en la Figura 12. En ambos casos, tanto para las fracciones finas como gruesas, aunque con predominancia en los gruesos, el material sometido a molienda muestra que la aplicación de temperaturas de calcinación provoca un aumento en el tamaño de las partículas. Este fenómeno podría explicarse por el efecto de sinterización y aglomeración térmica inducido por la calcinación, lo cual genera una redistribución de partículas hacia tamaños mayores y reduce la fracción ultrafina [118].

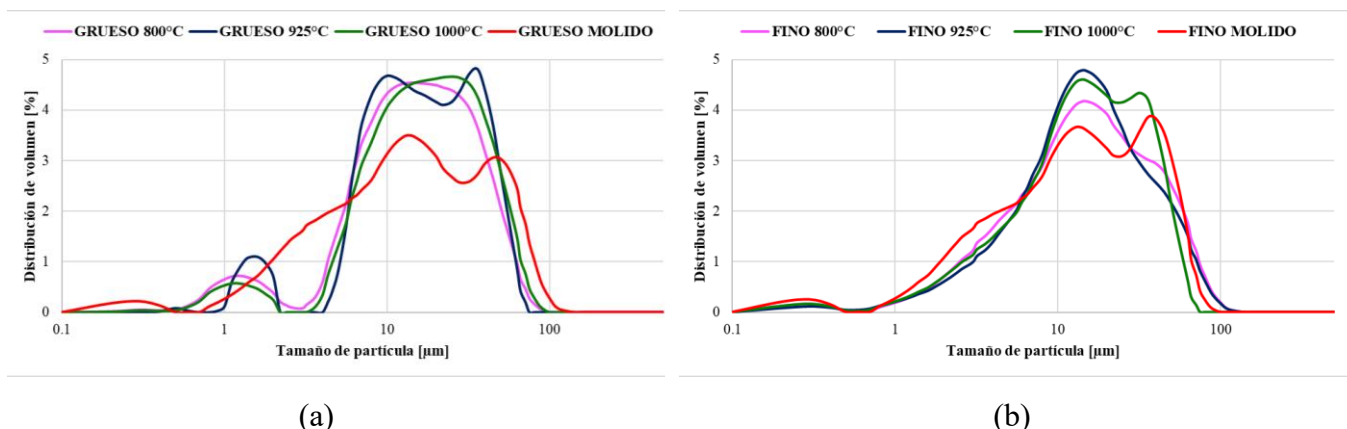


Figura 12. Distribución granulométrica: (a) Efecto de la temperatura de la fracción gruesa sobre la molienda; (b) Efecto de la temperatura de la fracción fina sobre la molienda.

4.2 Análisis mineralógico: Difracción de rayos X

En la Tabla 8 se presenta el análisis mineralógico de la fracción gruesa del relave y de sus respectivos tratamientos. Entre los minerales identificados, destaca la caolinita, cuyo contenido en el relave completo es de 8,34%; tras la molienda desciende a 4,08% y, al someter el material a calcinación, se inicia a 800°C su transformación parcial a metacaolín, alcanzando una transformación total por sobre los 925°C. Este cambio se debe a la deshidroxilación provocada por la calcinación, que elimina el agua estructural de la caolinita y desordena la red cristalina al romper los enlaces de Van der Waals que mantienen unidos los tetraedros de sílice y los octaedros de alúmina. La pérdida de agua conduce a la destrucción de la estructura cristalina del caolín, lo que mejora el desarrollo de resistencias y la durabilidad de los morteros.

Tabla 8. Análisis mineralógico de la fracción fina sometida a tratamiento mediante DRX.

Mineral	Relave 1					
	Sin tratamiento [%]	Fracción Gruesa ($\geq 150 \mu\text{m}$)				
		Sin moler y sin calcinar [%]	Molida y sin calcinar [%]	Molida y calcinada a 800°C [%]	Molida y calcinada a 925°C [%]	Molida y calcinada a 1000°C [%]
Biotita	2,85	1,68	3,55	3,44	4,33	4,19
Bornita	0,95	0,36	0,80	0,89	0,54	0,64
Clorita	5,72	0,37	3,33	4,04	2,33	1,54
Calcita	3,25	2,21	8,31	1,37	0,57	1,51
Yeso	3,86	3,09	4,29	2,70	1,96	2,11
Carnalita	1,92	0,00	3,69	2,78	0,00	1,80
Piroxeno	4,85	5,69	6,25	4,96	5,44	6,22
Gibsita	2,50	0,00	0,00	0,94	0,00	0,20
Hornblenda	5,51	1,71	3,90	3,60	3,77	3,20
Hematita	0,70	2,17	0,90	2,16	3,18	3,88
Caolinita	8,34	5,83	4,08	4,53	0,60	0,30

Labradorita	16,76	21,50	9,78	24,84	21,30	24,02
Moscovita	7,10	5,84	13,69	8,70	6,91	8,28
Albita	10,70	12,18	9,39	7,67	10,76	9,50
Pirita	0,59	0,25	0,03	0,46	0,26	0,54
Cuarzo	21,41	37,13	28,02	26,93	38,06	32,05

Por otro lado, la Tabla 9 presenta el análisis mineralógico de la fracción fina del relave, en la que la caolinita muestra un comportamiento similar al descrito previamente. Destaca, sin embargo, la disminución del contenido de clorita tras el tratamiento de molienda, reduciéndose desde el 5,72% hasta el 0% en la muestra molida y calcinada a 925°C, fenómeno atribuible a su naturaleza de filosilicato con apilamiento laminar tipo talco y capa interlaminar brucítica, cuya estructura se ve comprometida por la acción mecánica. Esta activación mecánica, combinada con el tratamiento térmico a partir de los 800 °C, favorece la deshidroxilación y el colapso parcial de la estructura laminar, incrementando la fracción amorfa y, en consecuencia, la reactividad de la matriz. Tal aumento de la reactividad podría tener un impacto positivo en la resistencia y durabilidad de los materiales, al mejorar la formación de productos más estables en los morteros. Los difractogramas obtenidos por DRX se encuentran en el [Anexo 8.11](#), donde se observa la evolución de los máximos de difracción y la disminución progresiva de fases cristalinas.

Tabla 9. Análisis mineralógico de la fracción fina sometida a tratamiento mediante DRX.

Mineral	Relave 1					
	Sin tratamiento [%]	Fracción Fina (< 150 [µm])				
		Sin moler y sin calcinar [%]	Molida y sin calcinar [%]	Molida y calcinada a 800°C [%]	Molida y calcinada a 925°C [%]	Molida y calcinada a 1000°C [%]
Biotita	2,85	1,68	2,10	3,94	0,98	2,67
Bornita	0,95	0,36	1,23	0,91	0,49	1,20
Clorita	5,72	0,37	4,89	0,68	0,00	3,23
Calcita	3,25	2,21	6,49	1,06	1,71	0,00
Yeso	3,86	3,09	5,97	1,82	2,26	1,73
Carnalita	1,92	0,00	3,80	1,83	0,00	4,20
Piroxeno	4,85	5,69	5,27	4,19	9,99	10,07
Gibsita	2,50	0,00	1,50	1,27	0,20	0,58
Hornblenda	5,51	1,71	3,62	3,41	3,70	2,63
Hematita	0,70	2,17	1,77	3,44	3,73	5,25
Caolinita	8,34	5,83	8,29	4,69	0,34	0,00
Labradorita	16,76	21,50	20,62	21,54	26,50	22,95
Moscovita	7,10	5,84	6,86	10,29	8,14	7,66
Albita	10,70	12,18	6,49	9,95	6,23	8,83
Pirita	0,59	0,25	0,28	0,58	0,58	0,28
Cuarzo	21,41	37,13	20,82	30,40	35,15	28,72

4.3 Análisis químico

El desarrollo del análisis químico nace de la necesidad de evaluar el efecto y la cinética de disolución durante la etapa de activación química. Se diseñaron dos procedimientos complementarios. En ambos, se preparó una solución alcalina y se mantuvo bajo agitación, con muestreos a 6 [h] y a 1, 3, 5 y 7 días. En el primero, se cuantificaron las concentraciones disueltas de Si, Al, Mg, Na y K mediante absorción atómica. En el segundo, se verificó si la evolución de dichas especies obedece a un régimen de disolución coloidal. El procedimiento completo se describe en el [Anexo 8.12](#).

El primer análisis químico detectó únicamente los cationes Na^+ y K^+ (Figura 13a), atribuibles a procesos de disolución que afectan a la albita y a la moscovita, respectivamente, ya identificadas por DRX en la muestra de relave completa. Se observa que la concentración de Na^+ aumenta con el tiempo de agitación de las muestras activadas, alcanzando su máximo a los 7 días en la fracción fina calcinada a 925°C; en cambio, la de K^+ permanece constante en el intervalo evaluado. Por su parte, la Figura 13b compara, tras 1 día de agitación, la fracción fina bajo diferentes tratamientos: (i) activación alcalina sin molienda, (ii) molienda seguida de activación alcalina, (iii) muestra sin activación (sólo relave y agua destilada) y (iv) molienda seguida de calcinación a 925°C. En todos los casos, la concentración de Na^+ es mayor en la muestra sin molienda que en la molida; asimismo, resulta superior en la muestra activada químicamente con cal respecto de aquella agitada sólo con agua.

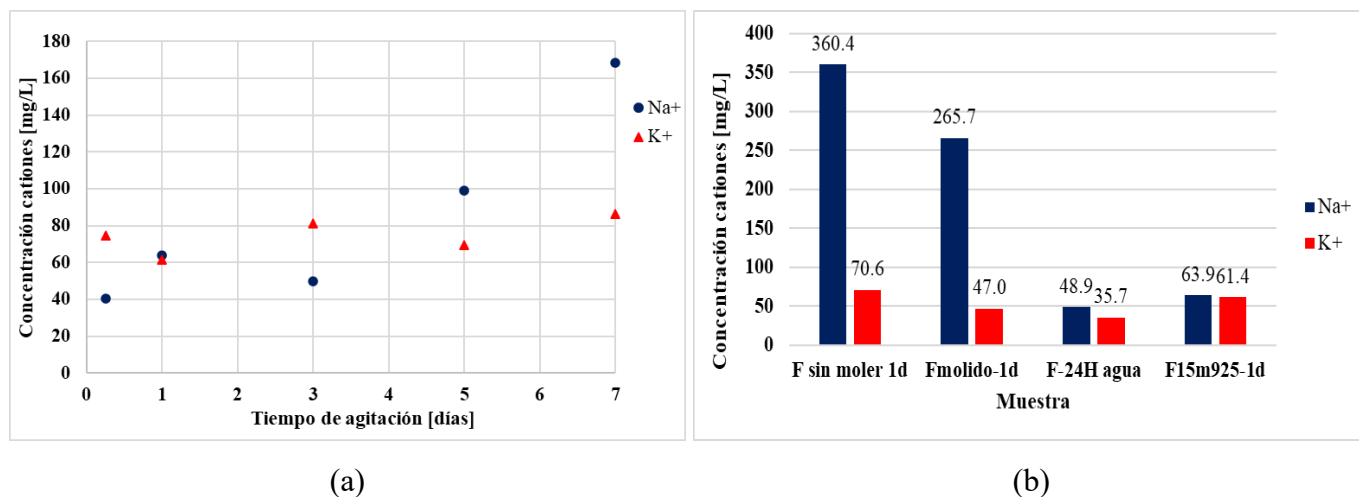


Figura 13. Resultados análisis químico inicial: (a) Evolución de la concentración de Na^+ y K^+ en función del tiempo de agitación; (b) Concentración de cationes tras 1 día de agitación para los distintos tratamientos.

Posteriormente, se realizó un segundo análisis químico en el que se realizó una digestión ácida y microondas del sobrenadante, con el objetivo de determinar si la disolución era de carácter parcial o coloidal. En la Figura 14 se observa que los iones Mg^+ y Al^+ mantienen concentraciones prácticamente

constantes durante el tiempo de agitación de la muestra, alcanzando valores promedio de 126 [mg/L] para Al^+ y 21,4 [mg/L] para Mg^+ . En el caso del K^+ , se obtiene una concentración promedio de 53,8 [mg/L], evidenciando un leve incremento con el tiempo y un aumento más marcado tras cinco días de agitación.

Por su parte, el Na^+ , con una concentración promedio de 601,2 [mg/L], muestra un comportamiento distinto: es liberado inicialmente tras 6 horas de agitación, alcanzando su máximo de concentración a los 3 días, para luego disminuir a mayores tiempos de permanencia. Este comportamiento sugiere que la disolución del Na^+ está asociada principalmente a la albita, cuya estructura tridimensional está conformada por tetraedros de sílice y aluminio, dentro de los cuales los iones sodio ocupan los intersticios. Durante la activación química, la adición de cal favorece la ruptura de esta estructura, promoviendo la liberación del sodio y, con ello, la disolución de la unidad estructural.

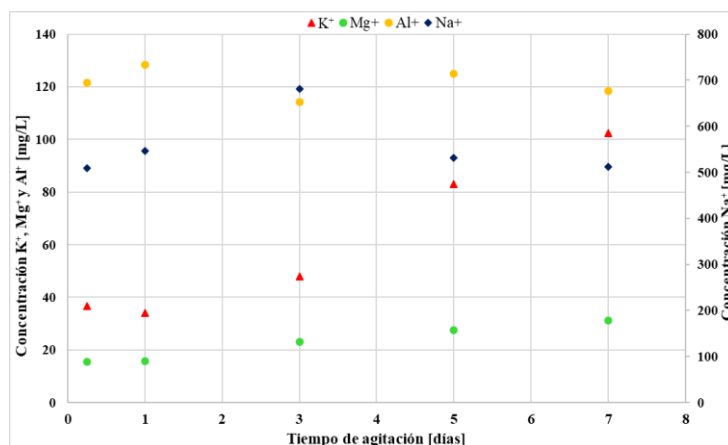


Figura 14. Resultados análisis químico complementario: Evolución de la concentración de cationes en función del tiempo de agitación.

Por otro lado, a partir de la Figura 15 se observa que, en las muestras activadas durante un día, la calcinación no favorece la liberación de cationes tras la incorporación de cal, comportamiento que tampoco se evidencia con la molienda. Esto se refleja en los valores de concentración de cationes medidos, los cuales presentan solo leves variaciones.

A partir de estos resultados, se determina que para realizar la activación química no se requieren tratamientos previos, ya que, al no observarse diferencias significativas entre las activaciones mecánica y térmica, la comparación entre las muestras F-24H agua y F15m925-1d, ambas con iguales condiciones de activación térmica (calcinación a 925°C) y molienda de 15 minutos, muestra que, tras un día de agitación, la adición de cal no genera un efecto positivo en la liberación de cationes. En el

[Anexo 8.13](#) se presentan los valores numéricos de las concentraciones medidas para los distintos cationes analizados, tanto en el análisis inicial como en el análisis complementario.

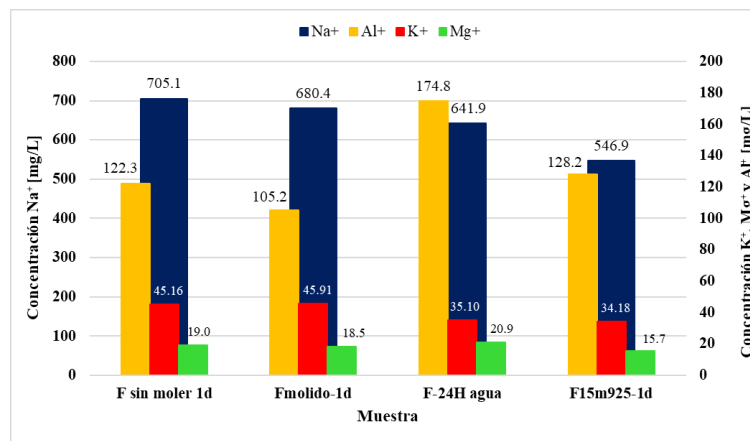


Figura 15. Resultados análisis químico complementario: Concentración de cationes tras 1 día de agitación para los distintos tratamientos.

4.4 Medición de pH

Durante el proceso de activación química, se realizó la medición del pH de la mezcla de relave activado. Para ello, se calculó el promedio entre la medición inicial y final del pH, después de los tiempos de permanencia de la mezcla antes de ser utilizada en la elaboración del mortero.

En general, todas las muestras, tanto de la primera como de la segunda dosificación, presentaron un pH alcalino, con un valor promedio de 12,07. Específicamente, las muestras finas tuvieron un pH promedio de 11,92, mientras que las muestras gruesas alcanzaron un valor de 12,06. En las muestras activadas tanto mecánica como químicamente, el pH fue de aproximadamente 12,33 para las fracciones finas y 12,18 para las gruesas.

Por otro lado, las muestras con un 20% de reemplazo de cemento alcanzaron un pH cercano a 12,19. Para el material fino sometido a molienda, calcinado a 940°C y activado químicamente, el pH promedio fue de 12,26, ligeramente superior al de las muestras calcinadas a otras temperaturas: 11,76 a 800°C, 11,96 a 925°C y 12,04 a 1000°C, el detalle de las mediciones se presenta en el [Anexo 8.14](#).

4.5 Trabajabilidad del mortero

La trabajabilidad del mortero se evaluó mediante el ensayo del cono de Abrams, conforme a la Norma NCh 1019 [119]. En la Figura 16 se presentan los resultados del ensayo de trabajabilidad, los cuales fueron agrupados de acuerdo con la temperatura de calcinación aplicada al relave 1 de cobre. Se

observa que las mezclas de mortero con mayor asentamiento corresponden a aquellas en las que se utilizó la fracción gruesa del relave molido ($\geq 150 [\mu m]$). Estas mezclas presentaron una mayor fluidez y manejabilidad, lo que sugiere que la molienda en la fracción gruesa es más efectiva, resultando en partículas de menor tamaño que favorecen una mayor fluidez debido al incremento en la superficie de contacto entre las partículas.

Por otro lado, tanto en las fracciones finas como gruesas, se observa que a medida que aumenta la temperatura de calcinación ($1000^{\circ}C$), el asentamiento de la mezcla también aumenta. Esto sugiere que la calcinación podría estar rompiendo enlaces químicos en los minerales presentes en el relave, lo que provoca la alteración de su estructura cristalina. Esta modificación mejora la capacidad del material para interactuar con el agua en la mezcla, facilitando así el asentamiento. Para obtener información adicional, se recomienda revisar el [Anexo 8.15](#), donde se tabulan los resultados del asentamiento medido en las mezclas de mortero elaboradas.

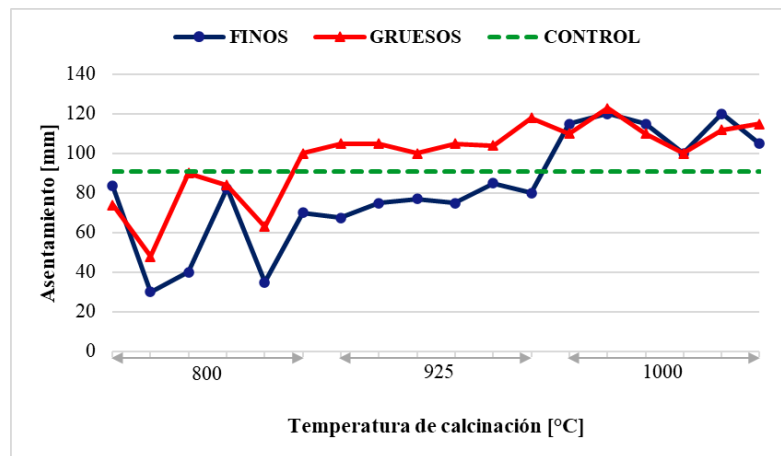


Figura 16. Resultados del ensayo de trabajabilidad de morteros en función de la temperatura de calcinación y el tipo de agregado (fino o grueso) de relave.

4.6 Ensayos de Flexo-Tracción

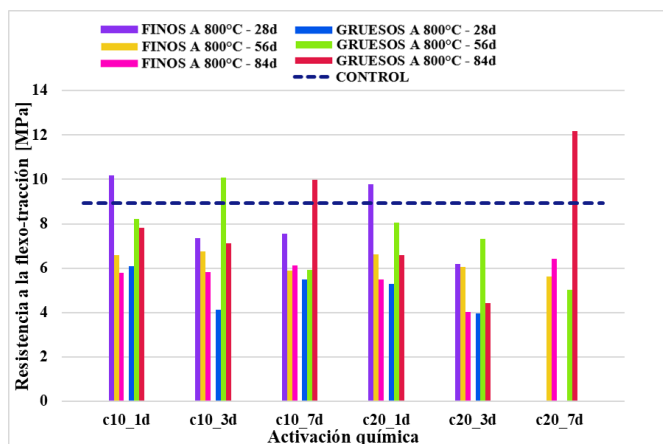
En lo que respecta a los ensayos de flexo-tracción, el detalle de los resultados obtenidos para las diferentes dosificaciones empleadas se detallan en el [Anexo 8.16](#). Particularmente, en la Figura 17 se presentan los resultados a los 28, 56 y 84 días de curado para las muestras de material fino y grueso calcinadas a diferentes temperaturas. En general, se observa que, a mayor tiempo de curado, las resistencias disminuyen. Para las muestras calcinadas a $800^{\circ}C$, los finos muestran mejores resistencias a la flexo-tracción en las etapas iniciales de curado; sin embargo, a los 56 días de curado, los gruesos superan a los finos, lo que se mantiene también a los 84 días. En particular, a los 84 días, las muestras

de fracción gruesa presentan mejores resultados que las de fino, superando en dos casos la resistencia de la muestra de control (8,94 [MPa]). Estos casos corresponden a muestras activadas con 10% de cal y un tiempo de reposo de 7 días, alcanzando una resistencia de 9,99 [MPa], y a una muestra con 20% de cal y 7 días de reposo, que supera los 12,19 [MPa].

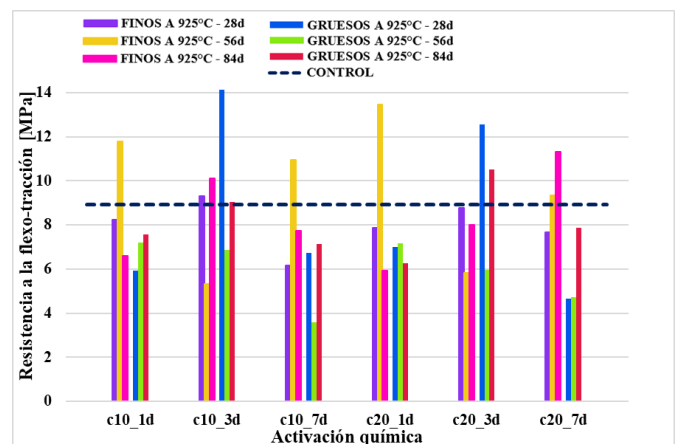
Para las muestras calcinadas a 925 °C, la resistencia a la flexo-tracción aumenta entre los 28 y 56 días de curado. A los 28 días, las mezclas con agregado grueso registran valores superiores a los de las fracciones finas; a los 56 días, el incremento es más marcado en las fracciones finas, que pasan a superar a las gruesas.

A los 84 días, varias combinaciones superan la resistencia de la muestra de control. En fracciones finas, se alcanzan 10,11 [MPa] con 10% de cal y 3 días de permanencia, y 11,31 [MPa] con 20% de cal y 7 días de reposo. En fracciones gruesas, se obtienen 9,05 [MPa] con 10% de cal y 3 días, y 10,50 [MPa] con 20% de cal y 3 días de reposo.

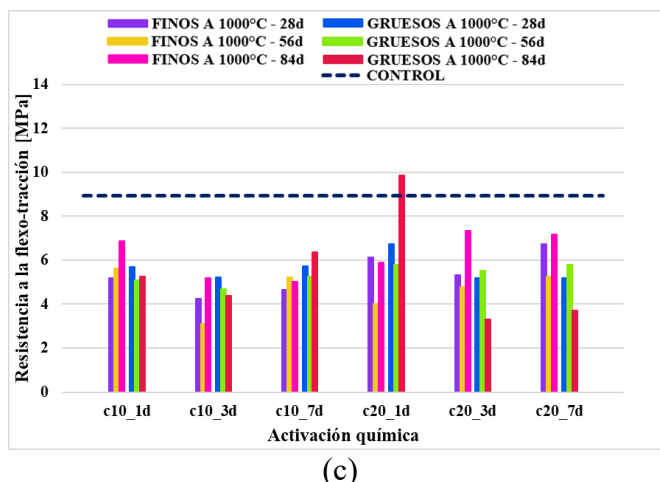
Para las muestras calcinadas a 1000°C, ninguna dosificación superó la resistencia del control, salvo la mezcla con agregado grueso activada con 20% de cal y 1 día de permanencia, que a los 84 días alcanzó 9,84 [MPa]. Entre los 28 y 56 días de curado, finos y gruesos muestran un comportamiento similar, con promedios de 5,51 [MPa] a los 28 días y 5,01 [MPa] a los 56 días de curado. A los 84 días, aparte de la excepción señalada, los mejores resultados mecánicos corresponden a las fracciones finas activadas con 20% de cal, con 3 y 7 días de permanencia, que registran 7,35 [MPa] y 7,17 [MPa], respectivamente.



(a)



(b)



(c)
Figura 17. Resultados de la resistencia a la flexo-tracción a los 28, 56 y 84 días de curado: (a) Muestras calcinadas a 800°C; (b) Muestras calcinadas a 925°C; (c) Muestras calcinadas a 1000°C.

En las mezclas con activación exclusivamente mecánica y química, ilustradas en la Figura 18, a 28 días de curado la fracción gruesa registra 11,03 [MPa] con 1 día de permanencia y disminuye a 7,66 y 5,10 [MPa] al aumentar la permanencia a 3 y 7 días, respectivamente. En la fracción fina, los mejores resultados se obtienen con 1 y 3 días de permanencia, con resistencias de 6,90 y 8,19 [MPa]. Al comparar con las muestras sometidas a triple activación, la fracción gruesa muestra un incremento adicional, con valores del orden de 11 [MPa]; en tanto, la fracción fina bajo triple activación se mantiene por sobre 7,50 [MPa], superando los resultados obtenidos con activación exclusivamente mecánica y química.

A los 56 días de curado, la fracción fina muestra una mejora, con resistencias de 7,01, 7,81 y 8,54 [MPa] para 1, 3 y 7 días de permanencia, respectivamente. En la fracción gruesa, los valores aumentan levemente a 8,84 y 8,18 [MPa] para 3 y 7 días, mientras que con 1 día se observa una disminución marcada hasta 7,13 [MPa]. En comparación con las muestras sometidas a triple activación, las muestras con agregado grueso evidencian una mejora de los resultados a este tiempo de curado.

Finalmente, a los 84 días, en la fracción fina, la resistencia aumenta hasta 9,19 [MPa] y 8,01 [MPa] para 1 y 3 días de permanencia, respectivamente, mientras que con 7 días desciende a 5,29 [MPa]. En la fracción gruesa, se observa un comportamiento similar: 10,87 [MPa] y 9,37 [MPa] para 1 y 3 días de permanencia, y 4,92 [MPa] para 7 días. En ambos casos, los tiempos de 1 día superan el valor del control (8,94 [MPa]).

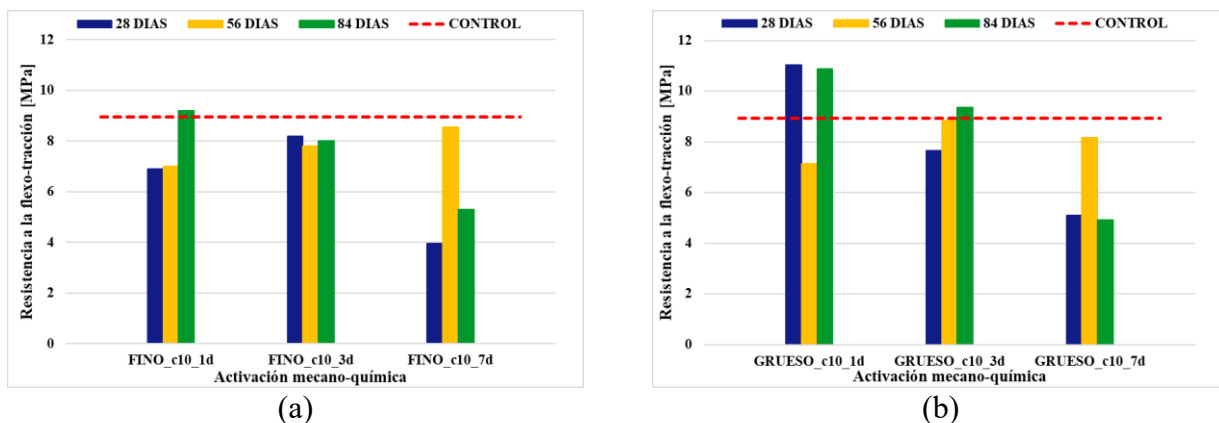


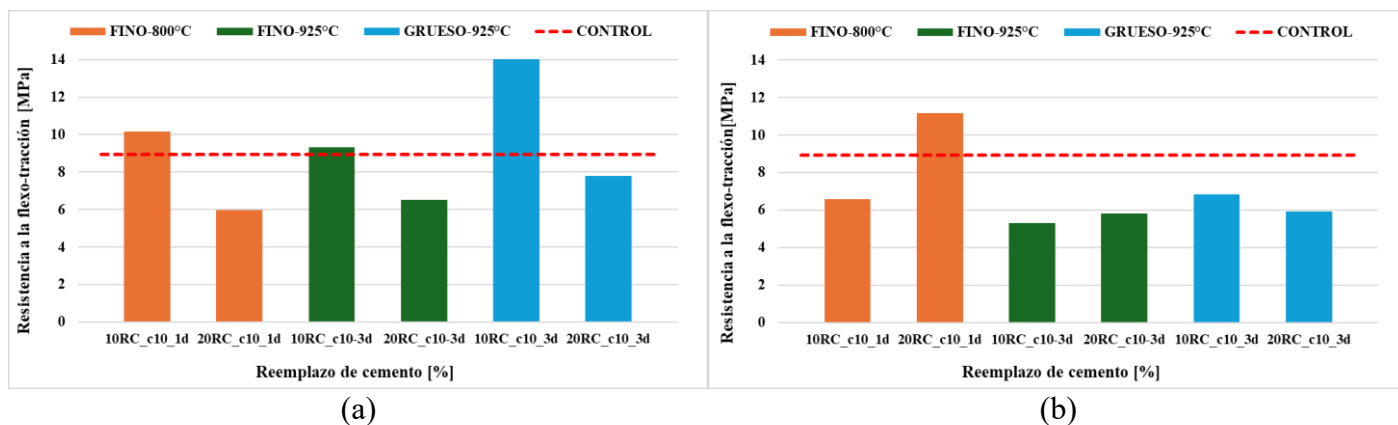
Figura 18. Resultados de la resistencia a la flexo-tracción de muestras activadas mecánica y químicamente: (a) Fracción fina; (b) Fracción gruesa.

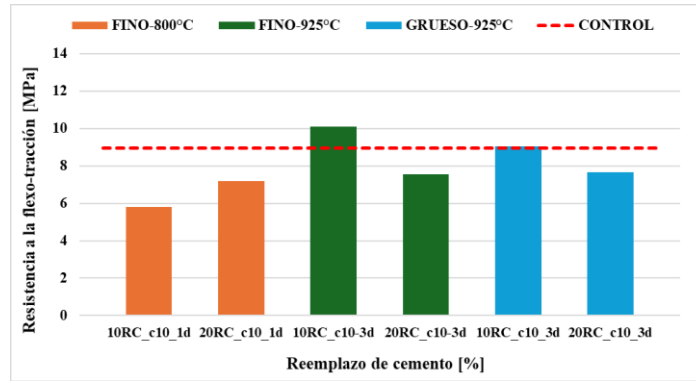
La Figura 19 presenta los resultados obtenidos al emplear un 10 y 20% de reemplazo de cemento, indicando que, a 28 días, el 10% de reemplazo arroja los mejores resultados. Destaca el grueso calcinado a 925°C con 14,12 [MPa], seguido por el fino calcinado a 800°C con 10,18 [MPa], y el fino calcinado a 925°C con 9,32 [MPa]; todos estos valores superan al control, que registró 8,94 [MPa].

A 56 días, el comportamiento se invierte: predominan los valores más altos con 20% de reemplazo, salvo en el grueso calcinado a 925°C, donde el 10% sigue siendo superior con 6,85 [MPa]. Sobresale el fino calcinado a 800°C con 20%, que alcanza 11,16 [MPa], por encima del control.

A 84 días, los resultados constituyen los mejores desempeños las mezclas con 10% de reemplazo en fino y grueso calcinados a 925°C con 10,11 y 9,05 [MPa], respectivamente. En el fino calcinado a 800°C, el mejor comportamiento a edades tardías se observa con 20% de reemplazo con 7,20 [MPa].

En resumen, utilizar un 10% de reemplazo de cemento muestra mejores resistencias a la flexo-tracción a edades tempranas (28 días), mientras que aumentar el reemplazo al 20% tiende a mostrar ventajas a edades más avanzadas (56–84 días), con las excepciones señaladas.





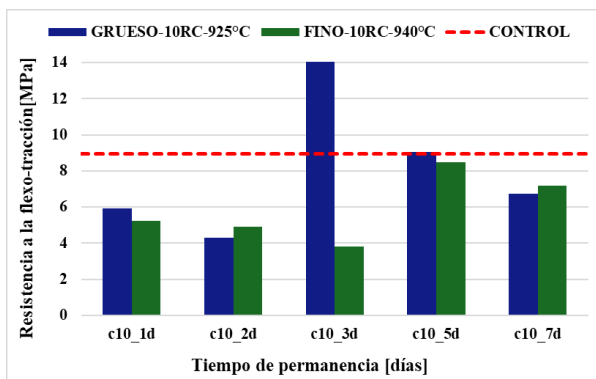
(c)

Figura 19. Resultados de la flexo-tracción a la compresión con un reemplazo de cemento por relave del 10% y 20%: (a) A los 28 días de curado; (b) A los 56 días de curado; (c) A los 84 días de curado.

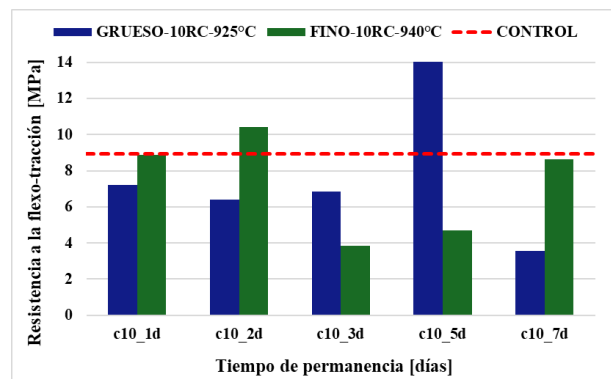
Para analizar la tendencia hasta los 7 días de activación de la mezcla de relave, la Figura 20 presenta el comportamiento del material grueso calcinado a 925°C y del material fino calcinado a 940°C. A los 28 días, las resistencias comienzan a descender a partir del quinto día de permanencia en el caso del material grueso, lo que contrasta con el comportamiento del material fino, donde la resistencia comienza a disminuir desde el primer día de activación, pero presenta un valor superior al quinto día. El máximo en el material grueso se registra a los 3 días, con 14,12 [MPa], mientras que en el material fino el valor más alto se alcanza a los 5 días, con 8,46 [MPa].

A los 56 días, la fracción gruesa muestra una mejora sostenida hasta los 5 días de permanencia y alcanza un máximo de 14,11 [MPa], por sobre el control de 8,94 [MPa]. En la fracción fina, el crecimiento sostenido finaliza a los 2 días con 10,41 [MPa], desciende bruscamente hasta valores cercanos a 4 [MPa] y vuelve a aumentar a 8,63 [MPa] a los 7 días.

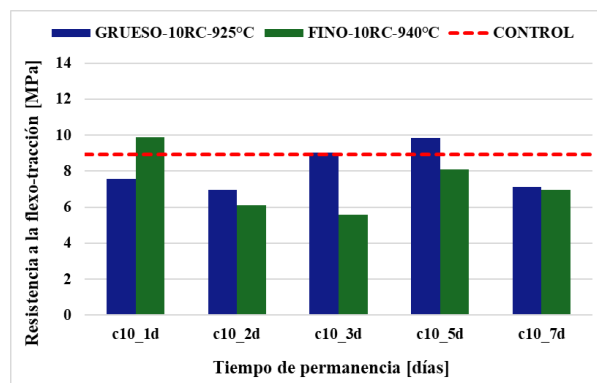
A los 84 días, el material grueso vuelve a exhibir una tendencia ascendente hasta los 5 días de permanencia, con un máximo de 9,85 [MPa] en ese punto. En contraste, el material fino disminuye su resistencia al aumentar el tiempo de reposo y alcanza su valor máximo al primer día, con 9,87 [MPa].



(a)



(b)



(c)

Figura 20. Resultados de la resistencia a la flexo-tracción en función de los tiempos de permanencia de la muestra de relave activado (1, 2, 3, 5 y 7 días): (a) A los 28 días de curado; (b) A los 56 días de curado; (c) A los 84 días de curado.

Para evaluar el comportamiento del material fino a distintas temperaturas de calcinación, la Figura 21 muestra que, a los 28 días de curado, los mejores resultados corresponden a las muestras calcinadas a 800°C con 1 y 7 días de permanencia de la mezcla activada, alcanzando 10,18 [MPa] y 7,54 [MPa]. Este desempeño no se replica con 3 días de permanencia, ya que la muestra calcinada a 925°C alcanza una resistencia de 9,32 [MPa]. En términos generales, el segundo mejor rendimiento a esta edad se observa precisamente a 925°C.

A los 56 días de curado, las resistencias tienden a disminuir en todas las temperaturas y se sitúan en torno a 6 [MPa]. Destacan dos excepciones en fino calcinado a 925°C: 11,78 [MPa] con 1 día de permanencia y 10,93 [MPa] con 7 días, ambos valores superiores al control de 8,94 [MPa]. Excluidas estas excepciones, los mejores resultados se obtienen a 800°C, con 6,59 [MPa], 6,75 [MPa] y 5,90 [MPa] para 1, 3 y 7 días de permanencia, seguidos por los de 925°C.

Tras 84 días de curado, la tendencia se invierte y los máximos se registran con 1 y 7 días de permanencia en las calcinaciones de 925°C y 940°C. A 925°C se obtienen 6,59 [MPa] a 1 día y 7,75 [MPa] a 7 días, mientras que a 940°C se alcanzan 8,87 [MPa] a 1 día y 8,63 [MPa] a 7 días. Además, se observa un aumento tardío en las muestras a 1000°C, con un máximo de 6,87 [MPa] a 1 día de permanencia.

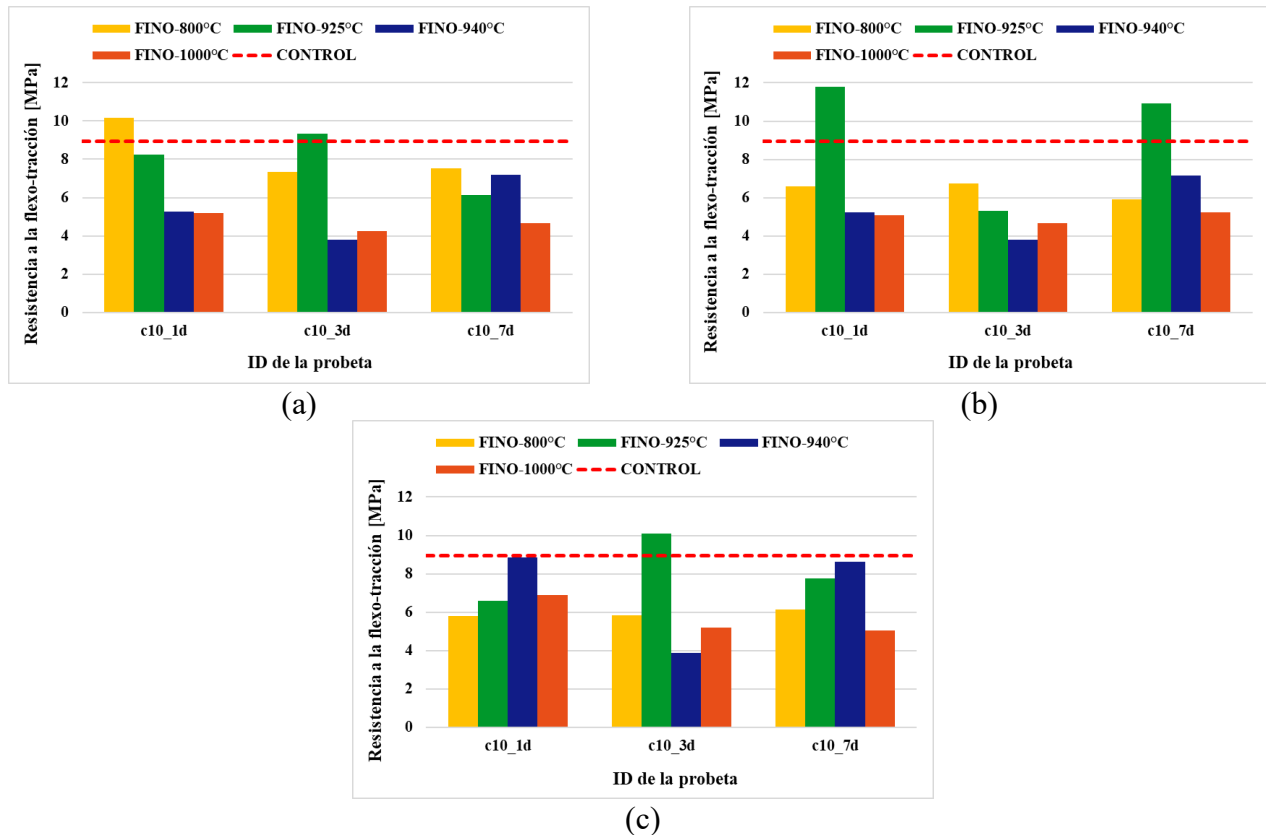


Figura 21. Resultados de la resistencia a la flexo-tracción en función de las temperaturas de calcinación (800, 925, 940, 1000°C): (a) A los 28 días de curado; (b) A los 56 días de curado; (c) A los 84 días de curado.

4.7 Ensayos de Compresión

La Figura 22 presenta los resultados de resistencia a la compresión de los morteros con reemplazo de cemento por relave, evaluados a 28, 56 y 84 días de curado, para mayor detalle véase el [Anexo 8.17](#). En términos generales, las muestras, tanto finas como gruesas, calcinadas a 800 y 925°C muestran una mejora de la resistencia con el tiempo de curado. En cambio, para 1000°C los máximos se observan a los 56 días, con dos excepciones en finos: la muestra activada con 10% de cal y 7 días de permanencia (21,91 [MPa] a los 84 días) y la activada con 20% de cal y 3 días de permanencia (24,08 [MPa] a los 84 días). Para los gruesos calcinados a 1000°C, los mejores resultados se registran a los 56 días, con un promedio de 24,42 [MPa].

A los 84 días, el material activado térmicamente a 800°C no alcanza la resistencia del control (26,96 MPa), excepto en el caso de la muestra de material grueso activado químicamente con 10% de cal durante 7 días. El efecto del porcentaje de cal no muestra un patrón definido; aun así, se observan mejores desempeños con tiempos de permanencia de 1 y 7 días (tanto con 10% como con 20% de

cal). En conjunto, las fracciones finas tienden a rendir mejor que las gruesas, salvo en las muestras con 7 días de permanencia, donde esto no se mantiene.

De manera similar, las muestras calcinadas a 925°C no superan la resistencia del control, salvo en el caso de las muestras de fracción fina y gruesa activadas con 10% de cal durante 3 días. No obstante, los mejores resultados se obtienen en las fracciones gruesas sometidas a molienda, independientemente del porcentaje de cal, con la excepción de la muestra fina activada con 10% de cal y 1 día de permanencia (25,84 [MPa]). En los gruesos con 10% de cal, los valores más altos se logran con 1, 3 y 7 días de permanencia (25,39, 28,47 y 23,54 [MPa], respectivamente). Por último, a 1000°C las fracciones finas presentan, en general, mejores resistencias, excepto en las muestras activadas durante 1 día con 10% y 20% de cal (24,45 y 27,42 [MPa], respectivamente). Comparadas con temperaturas más bajas, el mejor desempeño con 10% de cal se obtiene en el material grueso calcinado a 925°C (1 y 3 días de permanencia), observándose una tendencia similar en el material fino.

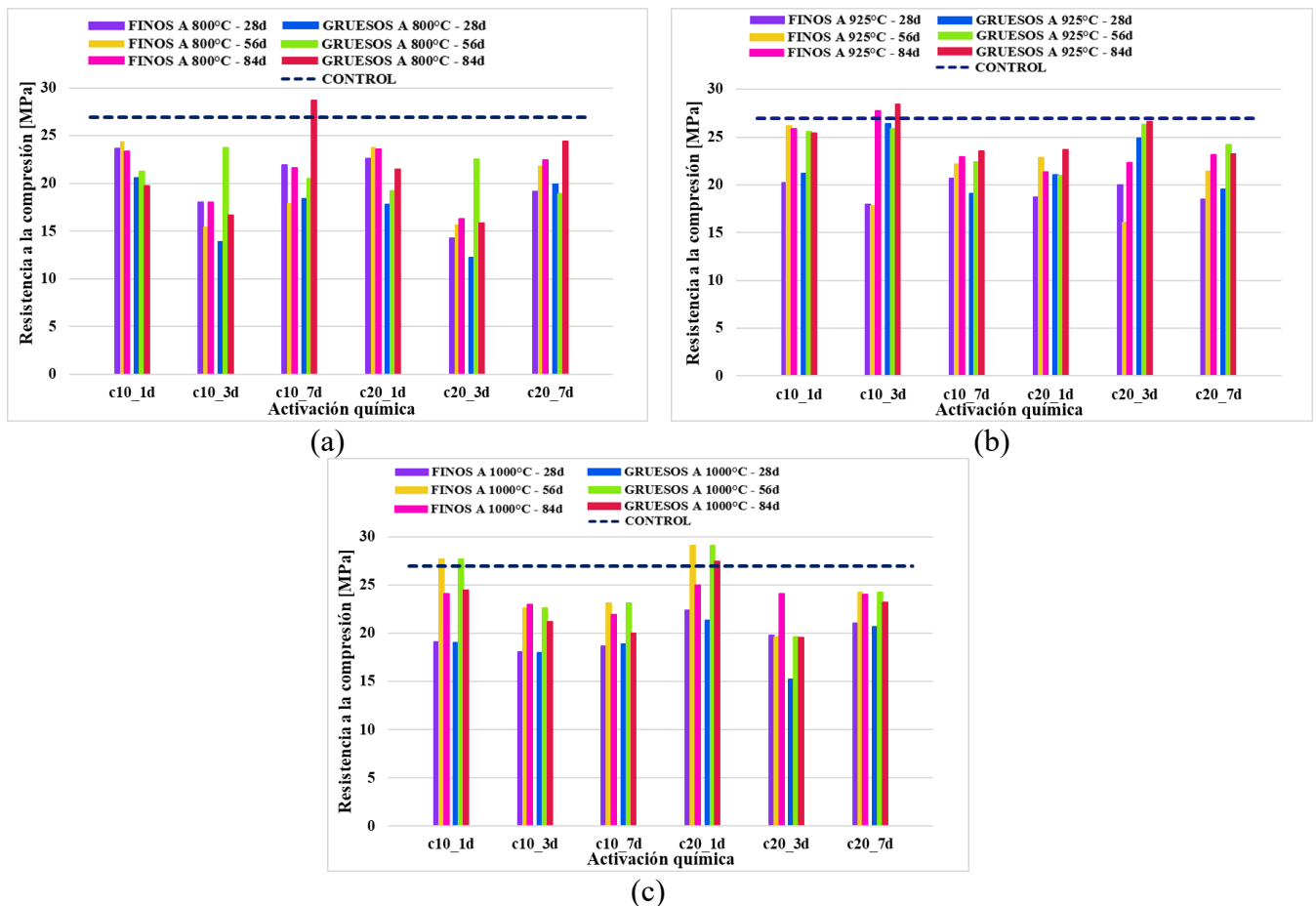


Figura 22. Resultados de la resistencia a la compresión a los 28, 56 y 84 días de curado: (a) Muestras calcinadas a 800°C; (b) Muestras calcinadas a 925°C; (c) Muestras calcinadas a 1000°C.

En la Figura 23 se observa que, en las muestras activadas mecánica y químicamente, para las fracciones finas, los mejores resultados se obtienen en las primeras etapas de curado (28 días), con valores de 31,40, 30,10 y 27,66 [MPa] para 1, 3 y 7 días de permanencia de la mezcla de relave activado, superando en todos los casos a la muestra de control, que registró 26,96 [MPa]. Para las muestras gruesas, los mejores resultados se observan a los 1 y 3 días de permanencia, con valores de 32,80 y 27,80 [MPa], respectivamente. Sin embargo, con muestras sometidas a 7 días de reposo durante su activación química, se registra una mejora en los resultados de compresión a los 84 días, alcanzando un valor de 28,22 [MPa].

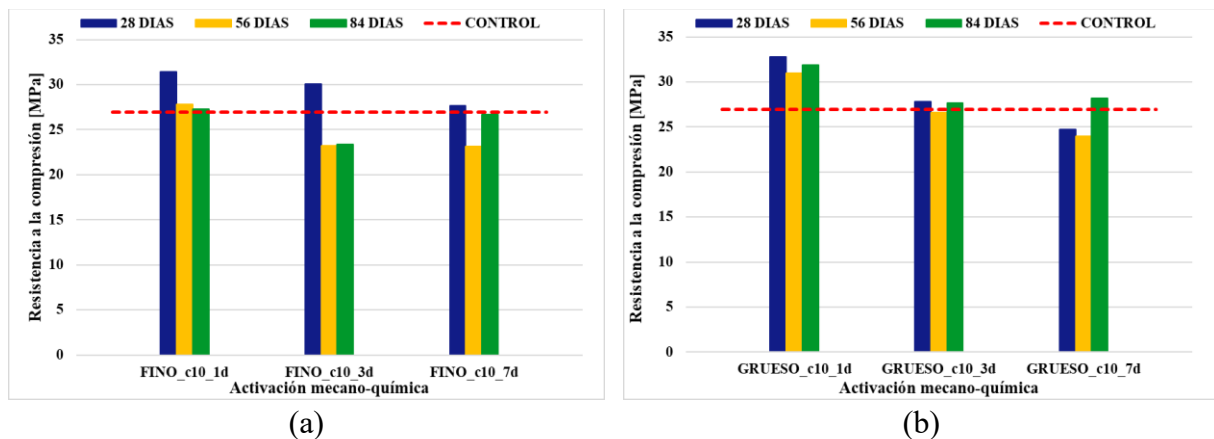


Figura 23. Resultados de la resistencia a la compresión de muestras activadas mecánica y químicamente: (a) Fracción fina; (b) Fracción gruesa.

En la Figura 24 se presenta la comparación entre las muestras activadas mecánica, térmica y químicamente, utilizando un aumento en el reemplazo de cemento por relave, comenzando con un 10% y elevándolo al 20%. Para las muestras de fino calcinado a 800°C, se observa que, en todos los tiempos de curado, la muestra con 20% de reemplazo presenta mejores resultados de resistencia a la compresión, alcanzando su valor máximo a los 84 días con 28,74 [MPa]. En el caso de las muestras de fino calcinadas a 925°C, el comportamiento es similar, mostrando mejores resultados con un 20% de reemplazo, pero también se aprecia un incremento en la resistencia a la compresión para las muestras con 10% de reemplazo a medida que avanza el tiempo de curado. Finalmente, para las muestras de grueso calcinadas a 925°C, los mejores resultados se obtienen con un 10% de reemplazo de cemento, alcanzando su valor máximo a los 84 días de curado con 28,47 [MPa].

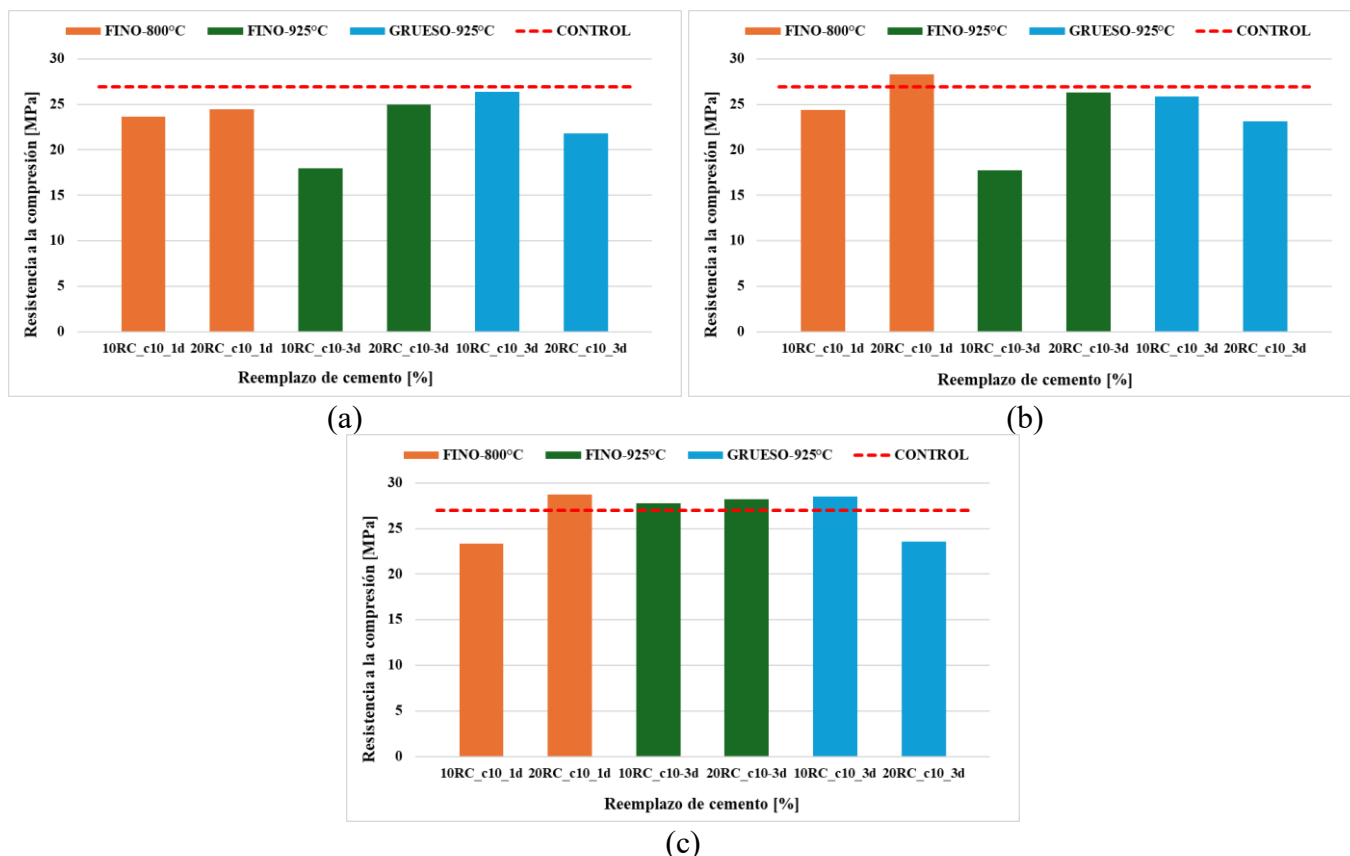


Figura 24. Resultados de la resistencia a la compresión con un reemplazo de cemento por relave del 10% y 20%: (a) A los 28 días de curado; (b) A los 56 días de curado; (c) A los 84 días de curado.

En la Figura 25 se observa que, al utilizar un 10% de reemplazo de cemento por relave y someter a molienda tanto los finos como los gruesos, con las muestras de grueso formadas por gruesos molidos y finos sin moler en la misma proporción, los mejores resultados para el material grueso calcinado a 925°C se alcanzan en las muestras cuya mezcla de relave activado se dejó en reposo durante 5 días, con una resistencia a la compresión de 30,50, 24,87 y 31,40 [MPa], a 28, 56 y 84 días de curado respectivamente. En general, las muestras elaboradas con mezclas sometidas a tiempos de permanencia de 1 a 5 días muestran una mejora gradual en la resistencia a la compresión, registrando valores promedio de 24,06 [MPa] a 1 día, 25,45 [MPa] a 2 días, 26,90 [MPa] a 3 días y 30,38 [MPa] a 5 días. Sin embargo, las muestras con 7 días de reposo de la mezcla de relave activado presentan una disminución en los resultados, alcanzando solo 22,94 [MPa], 22,44 [MPa] y 23,54 [MPa] a los 28, 56 y 84 días de curado, respectivamente.

Por otro lado, para el material fino calcinado a 940°C, la tendencia muestra un incremento en los resultados tras 1 y 2 días de reposo de la mezcla de relave activado. Sin embargo, los mejores resultados se obtienen con 3 días de reposo para los 28 días de curado, alcanzando una resistencia a

la compresión de 29,53 [MPa]. Para los 56 días de curado, el mejor resultado se presenta con 5 días de reposo, registrando 29,29 [MPa], y para los 84 días de curado, el valor más alto se obtiene con 2 días de reposo, con una resistencia de 29,98 [MPa].

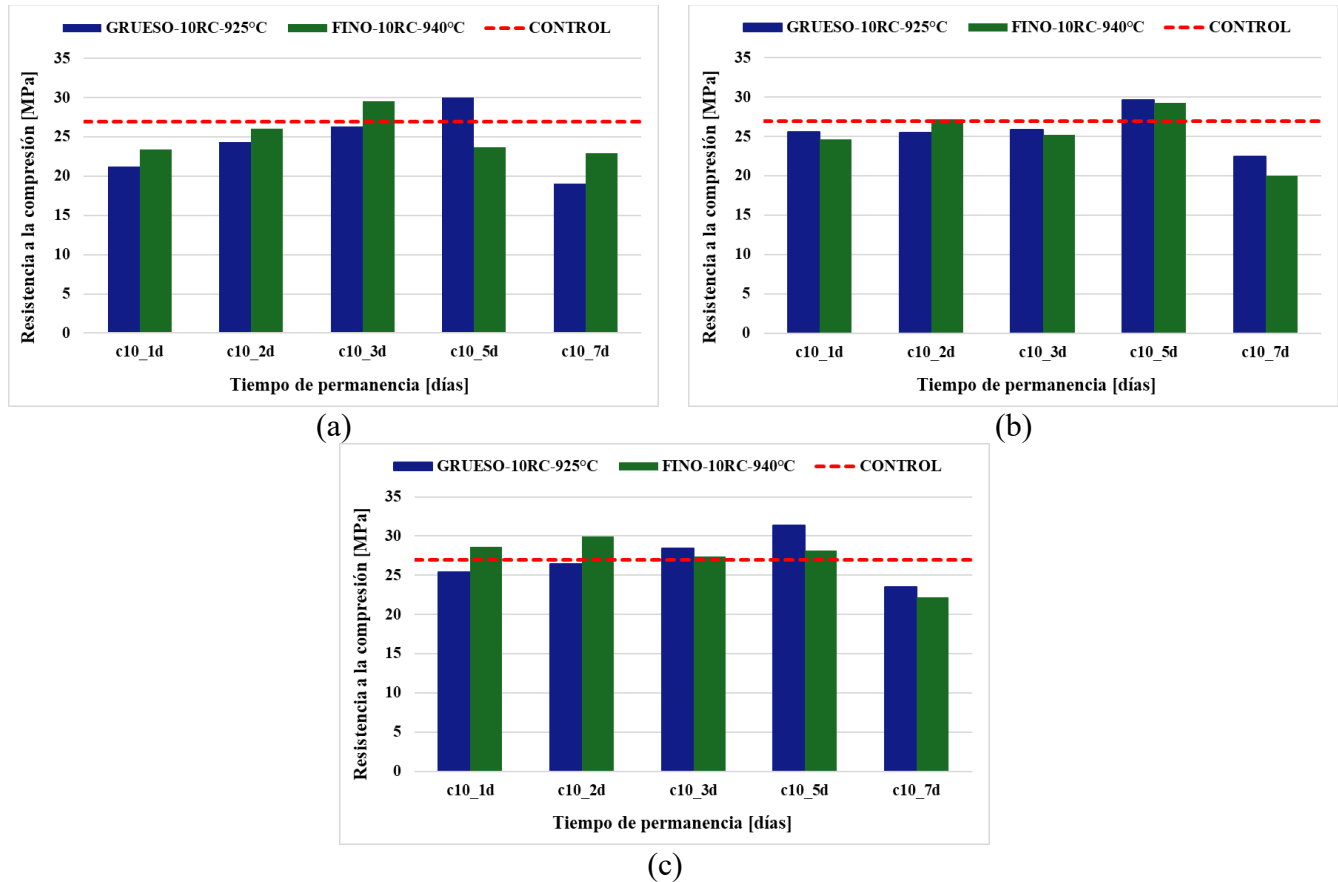


Figura 25. Resultados de la resistencia a la compresión en función de los tiempos de permanencia de la muestra de relave activado (1, 2, 3, 5 y 7 días): (a) A los 28 días de curado; (b) A los 56 días de curado; (c) A los 84 días de curado.

Con respecto a las muestras de material fino sometido a diferentes temperaturas de calcinación (800, 925, 940, 1000°C), como se muestra en la Figura 26, tras 28 días de curado, los mejores resultados se obtienen en las muestras calcinadas a 940°C. En particular, la probeta elaborada con la muestra de relave activado durante 3 días de permanencia alcanza una resistencia de 29,53 [MPa], superando al control (26,96 [MPa]). En general, a los 28 días de curado, los mejores resultados se presentan con tiempos de permanencia de 1 y 7 días.

A los 56 días de curado, la muestra de fino calcinado a 940°C mantiene su resistencia por encima del control para 3 días de activación, siendo el mejor resultado en comparación con las demás. Sin embargo, las muestras calcinadas a 925°C muestran un comportamiento relevante, posicionándose

como el segundo mejor resultado en términos de resistencia a la compresión, alcanzando 26,15 [MPa] y 22,21 [MPa] con 1 y 7 días de permanencia, respectivamente.

Finalmente, a los 84 días de curado, las muestras calcinadas a 940°C experimentan una disminución en su resistencia a la compresión para los tres tiempos de permanencia establecidos (1, 3 y 7 días), con valores de 24,60 [MPa], 25,17 [MPa] y 19,97 [MPa], respectivamente. En contraste, las muestras calcinadas a 925°C se muestran más estables, con un incremento progresivo en su resistencia a medida que aumenta el tiempo de curado, alcanzando 25,84 [MPa], 27,73 [MPa] y 22,96 [MPa] según el tiempo de permanencia de la mezcla de relave. Aunque estos valores están por debajo de los obtenidos por la muestra de control (26,96 [MPa]), exceptuando la muestra activada durante 3 días, se observa una clara tendencia hacia la mejora progresiva con el tiempo.

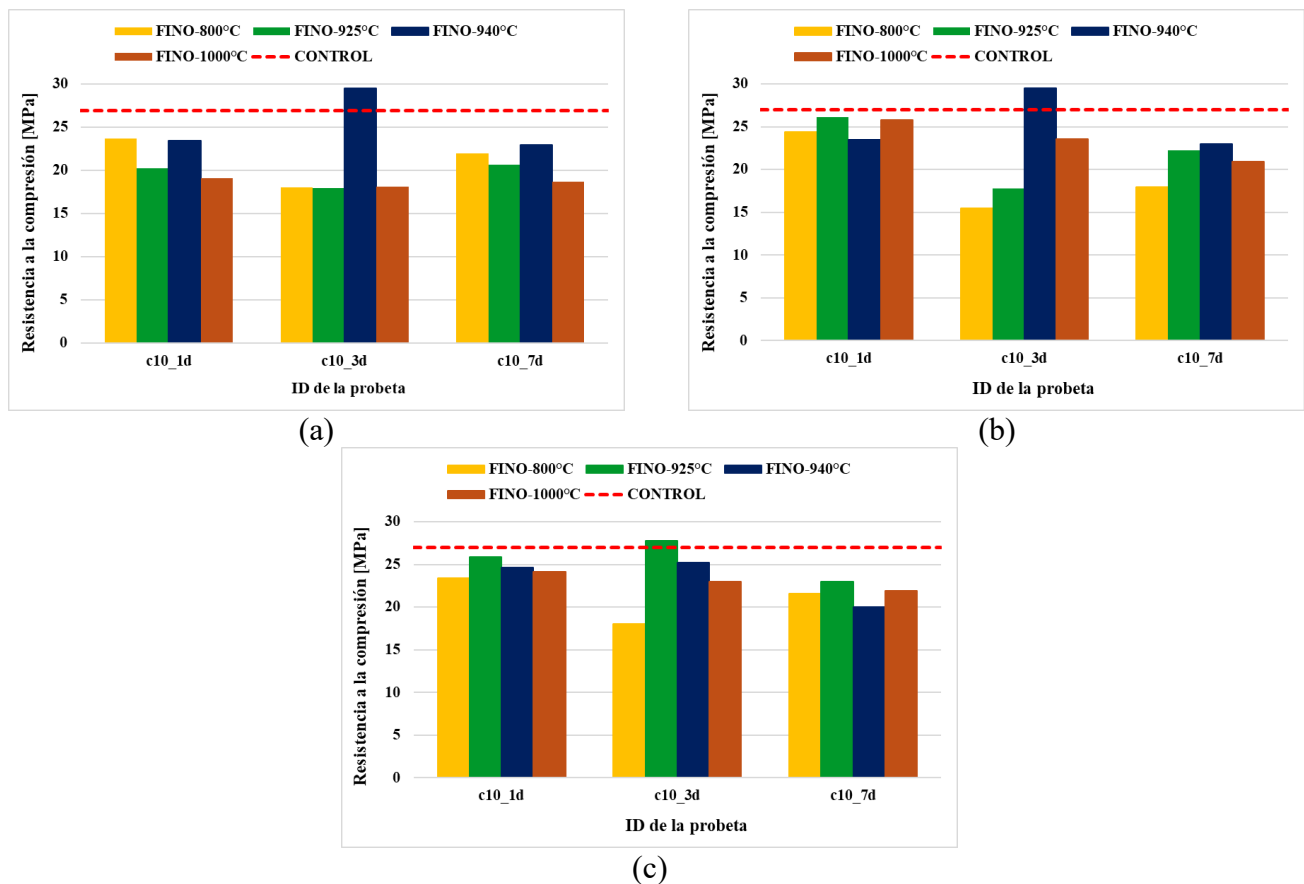


Figura 26. Resultados de la resistencia a la compresión en función de las temperaturas de calcinación (800, 925, 940, 1000°C): (a) A los 28 días de curado; (b) A los 56 días de curado; (c) A los 84 días de curado.

4.8 Densidad de las probetas

Tras el proceso de curado y el secado de las muestras durante 24 horas, se determinó la densidad de cada una de las mezclas de mortero. Este parámetro se obtuvo a partir de la masa en seco de la probeta

y del dimensionamiento realizado posterior al curado por inmersión. El objetivo de esta evaluación fue estimar el grado de compactación alcanzado por las mezclas durante su elaboración, considerando que este parámetro suele experimentar ligeras variaciones con el tiempo debido a la evaporación del agua de amasado. Los resultados obtenidos para cada dosificación se presentan en el [Anexo 8.18](#).

La Figura 27a muestra la relación entre la densidad y la resistencia a la flexo-tracción para las muestras sometidas a los tres tipos de activación (mecánica, térmica y química) en distintos tiempos de curado. En general, las densidades se sitúan en el rango de 1,8 a 2,1 $\left[\frac{g}{cm^3}\right]$, mostrando una tendencia en la que los mayores valores de densidad se asocian con resistencias más bajas, si bien no hay un patrón claro. Asimismo, a medida que aumenta el tiempo de curado, la pendiente de la tendencia lineal disminuye, lo que sugiere una reducción en la influencia de la densidad sobre la resistencia mecánica conforme avanza el proceso de consolidación del material. Por otro lado, la Figura 27b ilustra la relación entre la densidad y la resistencia a la compresión. Reitera el mismo rango de densidades (1,8 - 2,1 $\left[\frac{g}{cm^3}\right]$), concentrándose la mayor parte de los valores en torno a 1,85 - 1,95 $\left[\frac{g}{cm^3}\right]$.

A diferencia de la tendencia observada en la resistencia a la flexo-tracción, aquí el incremento de la densidad viene asociado a un ligero aumento de la resistencia a la compresión. El comportamiento lineal analizado evidencia que las resistencias más elevadas se alcanzan en etapas de curado más avanzadas, coherentes con un proceso de densificación progresiva producto del desarrollo de los productos de reacción y del refinamiento de la microestructura del material.

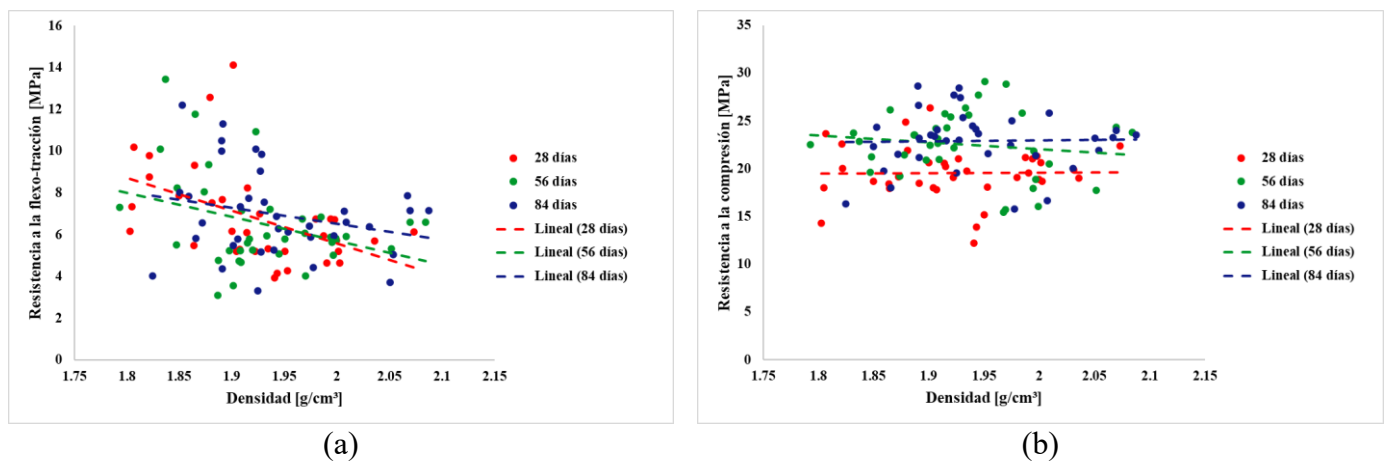


Figura 27. Relación entre la densidad y la resistencia de las muestras a diferentes tiempos de curado: (a) Flexo-tracción; (b) Compresión.

5 Discusión

5.1 Influencia del tratamiento en el comportamiento mineralógico

El análisis mediante difracción de rayos X reveló que la mineralogía de la fracción gruesa del relave mostró una disminución en el contenido de caolinita tras la molienda. Posteriormente, la caolinita experimenta una transformación parcial a metacaolín a 800°C, alcanzando una transformación total por encima de 925°C. Este comportamiento es coherente con estudios previos, como los de Sánchez et al. [120] y Cabrera et al. [121], quienes señalan que la molienda induce efectos mecanoquímicos significativos, aumentando la reactividad de los sólidos y provocando la destrucción progresiva de la estructura cristalina de la caolinita. Esto resulta en la aglomeración de partículas debido al aumento de la energía superficial. Este fenómeno está relacionado con un alto grado de degradación estructural y un aumento en la amorfización. Además, la activación térmica entre 600°C y 900°C favorece la formación de la fase amorfa metacaolínita que posee las características típicas de una puzolana. Por otro lado, Herrero [122] indica que el tratamiento térmico de la caolinita sigue dos etapas: primero, la formación de metacaolín, y luego su transformación en mullita, con la posibilidad de convertirse en γ -alúmina a 950°C, liberando sílice y favoreciendo la formación de cristobalita. Sin embargo, la transformación total observada en este estudio a temperaturas superiores a las indicadas por estos autores podría explicarse por la presencia de otros minerales en el relave, los cuales, al absorber parte de la energía térmica durante la reacción exotérmica, podrían retardar la transformación completa de la caolinita.

En cuanto a la fracción fina analizada, se observa que el contenido de clorita disminuye significativamente tras el tratamiento de molienda, reduciéndose del 5,72% al 0% en la muestra molida y calcinada a 925°C. Este fenómeno se explica por la naturaleza de la clorita, que es un filosilicato con estructura laminar, la cual se ve comprometida por la acción mecánica, favoreciendo la deshidroxilación y la formación de una fase amorfa que incrementa la reactividad del material, esta fase amorfa favorece la reactividad del material con el hidróxido de calcio presente en el mortero, mejorando la resistencia mecánica resultante.

Adicionalmente, estudios como los de Tironi et al. [92,97] indican que, al superar los 750°C de calcinación, el metacaolín presenta una disminución en su reactividad, debido a la sinterización y a la reducción de la constante de velocidad de la reacción. Sin embargo, en relaves con mineralogía acompañante, estos constituyentes actúan como consumidores de calor en transformaciones

endotérmicas, desplazando el efecto de la deshidroxilación. Por lo tanto, se justifica prolongar la exposición a temperaturas más altas para asegurar la transformación completa de la caolinita, siempre controlando la sinterización que podría penalizar la actividad puzolánica.

5.2 Evaluación del efecto y la cinética de disolución

Tras el análisis químico inicial, se determinó la presencia de Na^+ , atribuible a su liberación de la albita, y la del K^+ , asociada a la moscovita. En el caso de la albita, su estructura se compone de una red tridimensional de tetraedros interconectados formados por tres unidades de SiO_4 y una de AlO_4 , en la cual todos los oxígenos son compartidos entre los tetraedros. La carga negativa residual generada por la sustitución del silicio por aluminio se equilibra mediante iones de sodio (Na^+), que se alojan en los huecos intersticiales más grandes de la red cristalina[123].

Cuando se incorpora cal al sistema, los iones de calcio (Ca^{2+}) desplazan a los iones de sodio de estos sitios, generando la liberación del Na^+ hacia la solución. Este proceso de intercambio iónico favorece la disolución de la estructura de la albita, liberando además grupos de aluminosilicatos, que pueden participar posteriormente en reacciones puzolánicas o de geopolimerización, contribuyendo a la reactividad del sistema. La liberación del Na^+ como catión disuelto ocurre de forma progresiva, como puede observarse en la Figura 12a, si bien su concentración aumenta con la digestión ácida de la disolución, apuntando a su presencia en estructuras coloidales junto con otros elementos como el Al.

En el caso de la moscovita, cuya composición laminar se basa en una estructura cristalina de silicato de aluminio en forma de capas o láminas unidas mediante iones de potasio, se sugiere que ocurre un intercambio de cationes en la interlamina. En este proceso, el catión de calcio (Ca^{2+}) entra en la estructura mientras que el catión de potasio (K^+) es expulsado, favoreciendo así la disolución del K^+ en la solución alcalina. Este intercambio es limitado y ocurre de forma rápida como se observa en la Figura 12a. La estructura de la moscovita se caracteriza por una pila de láminas de tetraedros interconectados, dispuestos en anillos hexagonales que se extienden infinitamente en el plano 2D, así como capas dioctaédricas de gibbsita, donde cada anión (O^{2-} o OH^-) está rodeado por dos cationes Al^{3+} . Cada lámina trioctaédrica (O) está intercalada entre dos capas tetraédricas (T), y esta estructura se repite indefinidamente de manera perpendicular a la lámina. Los "sándwiches" de TOT están separados por grandes sitios catiónicos que contienen K^+ (sitios interlaminares), lo que facilita el intercambio de cationes en la estructura [124].

Por otro lado, las concentraciones disueltas de Al^+ y Mg^+ se mantuvieron prácticamente constantes en todos los periodos de agitación. De acuerdo con Kapeluszna et al. [125], en sistemas mezclados con materiales cementantes suplementarios la sílice activa reduce la razón Ca/Si y favorece la incorporación del Al a la fase C-A-S-H en lugar de permanecer en solución, lo que explica la ausencia de incrementos apreciables de Al^+ . En paralelo, el Mg^+ tiende a inmovilizarse rápidamente en medios alcalinos, por lo que tampoco muestra variaciones significativas.

De acuerdo con lo observado en la Figura 14, la activación química se presenta como un método eficiente que no requiere tratamientos previos complementarios, ya que no evidencian diferencias significativas entre las activaciones mecánica y térmica en términos de comportamiento mecánico. Los ensayos de resistencia a la compresión muestran que las muestras sometidas a las tres activaciones (mecánica, térmica y química) alcanzan 20,21 [MPa], mientras que aquellas activadas únicamente de forma mecánica y química logran 31,40 [MPa] en etapas tempranas de curado (28 días), evidenciando una mayor eficiencia del tratamiento químico en la etapa temprana de desarrollo de resistencia.

5.3 Análisis de la trabajabilidad en las mezclas de mortero

Se observó un mayor asentamiento al emplear la fracción gruesa previamente molida. Este aumento se atribuye a que la molienda actúa con mayor eficacia sobre la granulometría de mayor tamaño, más que sobre los finos, incrementando la finura y generando una mayor densidad de empaque. De acuerdo con Mehdipour y Khayat [126], la distribución del tamaño de partícula controla la densidad de empaquetamiento del esqueleto granular y, en consecuencia, el volumen de huecos que debe llenarse con pasta. Para un volumen de pasta dado, un mayor empaquetamiento aumenta el espesor de pasta libre alrededor de las partículas, mejorando la trabajabilidad.

Adicionalmente, el mayor asentamiento observado con la calcinación puede explicarse por un cambio micro-textural: aunque las arcillas calcinadas suelen aumentar la demanda de agua, por su alta superficie específica, reduciendo la fluidez, al elevar la temperatura hacia $\sim 1000^\circ\text{C}$ ocurren aglomeración/sinterización y una disminución marcada de la superficie específica. En consecuencia, a relación agua/cemento constante, desciende la demanda de agua y mejora la trabajabilidad.

Este comportamiento es coherente con Li et al. [127], quienes indican que los cementos compuestos con arcillas calcinadas son sistemas complejos en los que la fluidez depende, entre otros factores, de la finura de partícula, la densidad de empaquetamiento, el espesor de la película de agua, la composición de fases minerales y la temperatura/condiciones de calcinación.

5.4 Influencia de la densidad sobre el comportamiento mecánico

Se observó una tendencia en la que los mayores valores de densidad se asociaron con menores resistencias a la flexo-tracción, mientras que, con el aumento del tiempo de curado, las resistencias tendieron a disminuir progresivamente. En contraste, se evidenció un leve aumento de la densidad asociado con el incremento de la resistencia a la compresión, reflejando un comportamiento diferenciado entre ambos parámetros mecánicos.

Este resultado sugiere la existencia de un efecto filler en las partículas dentro de la mezcla de mortero [128]. El cemento, al actuar como aglutinante, busca unir las partículas y sellar los poros, pero la incorporación de adiciones minerales finas modifica la distribución granular del sistema. Dichas partículas de menor tamaño rellenan los espacios vacíos entre los granos de cemento, optimizando su empaquetamiento y reduciendo la porosidad inicial de la pasta [129]. Como consecuencia, una mayor densidad se traduce en una mejor resistencia a la compresión, ya que la presencia de vacíos y microporos disminuye significativamente.

Estos resultados son consistentes con lo señalado por Bonavetti y Rahhal [130], quienes indican que la incorporación de una adición mineral al cemento Portland genera tres efectos principales cuya relevancia varía con el tiempo: el efecto de dilución, presente durante toda la hidratación; el efecto filler, predominante en las primeras edades; y la actividad puzolánica, que depende del grado de reactividad del material, pudiendo ser fuerte, moderada o débil.

De acuerdo con estos autores, el empleo de puzolanas naturales como adición en cementos Portland promueve la formación de geles de silicato de calcio hidratado con características similares a las generadas durante la hidratación de los silicatos del clinker. Sin embargo, esta reacción ocurre de manera relativamente lenta, por lo que la ganancia de resistencia mecánica asociada a la actividad puzolánica se manifiesta de forma diferida en el tiempo, lo que explica el comportamiento observado en los resultados experimentales del presente estudio.

Por su parte, Rosell et al. [131] sugieren que, en presencia de puzolanas, los productos de hidratación del cemento tienden a ser más densos, ya que se rellenan los poros y microporos de la matriz, mejorando la compactación y reduciendo la permeabilidad. Este fenómeno refina la estructura interna y disminuye la absorción capilar, lo que a su vez mejora la resistencia mecánica, al disminuir las trayectorias de agua y aire en el material.

5.5 Efecto del tiempo de curado sobre la resistencia mecánica

Respecto al tiempo de curado, los resultados de flexo-tracción indican que, al someter las muestras a mayor tiempo de curado, las resistencias disminuyen. Este descenso se atribuye a mecanismos microestructurales sensibles al curado húmedo prolongado. En particular, la incorporación de materiales cementantes suplementarios aporta Al y Si adicionales durante la hidratación, lo que modifica la composición y la morfología del gel C-A-S-H; esta evolución define la red de poros capilares y condiciona el desempeño mecánico a largo plazo [132]. En sistemas activados alcalinamente, el rendimiento depende de la química de los materiales cementantes suplementarios, del tipo y proporción del activador y de la duración del curado, variables que gobiernan el microentorno de hidratación y la estabilidad del gel [133]. A ello se suma el debilitamiento de la zona de transición interfacial, que actúa como un eslabón débil en donde se inician y propagan microfisuras bajo sollicitaciones de tracción/flexión, reduciendo la resistencia flexo-tractora [134].

Por el contrario, los resultados de resistencia a la compresión mostraron un aumento a largo plazo, lo cual podría ser consistente con Vargas et al. [135], quienes indican que el incremento en la resistencia a la compresión simple a medida que pasa el tiempo es el resultado de la interacción de la puzolana con la cal hidratada o con el cemento Portland. Este proceso de activación química se produce cuando las partículas de relave reaccionan con los compuestos alcalinos presentes en la mezcla, formando nuevos productos de hidratación que incrementan la cohesión y la resistencia del material. A medida que el tiempo de curado avanza, estas reacciones continúan, lo que lleva a una mejora progresiva de las propiedades mecánicas del material.

5.6 Influencia de la activación del relave

5.6.1 Efecto de la temperatura de calcinación

En cuanto a la temperatura de calcinación durante la activación térmica del relave, el análisis de las muestras calcinadas a distintas temperaturas revela que dicha temperatura tiene un efecto significativo en la resistencia mecánica, particularmente en los resultados de flexo-tracción y compresión, los cuales evolucionan de manera distinta a lo largo del tiempo [103,136].

Para las muestras calcinadas a 800°C, los materiales finos muestran mejores resistencias a la flexo-tracción en las etapas iniciales de curado, en concordancia con Ferreiro et al. [137], quienes atribuyen el mejor desempeño temprano al efecto combinado de mayor finura y activación cinética. Sin

embargo, a los 56 y 84 días, las muestras gruesas superan a las finas, indicando una mayor estabilidad a largo plazo en la resistencia de las fracciones gruesas. Esta tendencia se mantiene en los resultados de compresión, donde las muestras gruesas muestran un aumento progresivo y sostenido de la resistencia mecánica con el tiempo, aunque no logran superar la muestra de control (26,96 [MPa]). Este comportamiento es coherente con Leng et al. [138], quienes señalan que una mayor finura de la arcilla calcinada impulsa la resistencia a edades tempranas, mientras que adiciones de naturaleza predominantemente filler concentran su efecto en los primeros días y no garantizan mejoras sostenidas a edades avanzadas. El comportamiento en flexo-tracción y compresión muestra una relación inversa a corto plazo (mejor rendimiento en flexo-tracción en finos) y una mejor evolución a largo plazo en los gruesos.

En las muestras calcinadas a 925°C, la resistencia a la flexo-tracción aumentó de forma continua hasta los 56 días, con una tendencia similar en la resistencia a la compresión. A los 28 días, las fracciones gruesas destacaron en flexo-tracción, mientras que las fracciones finas superaron a las gruesas a los 56 días. Este comportamiento sugiere que el tratamiento térmico a 925°C favorece un desarrollo progresivo de la resistencia, con un notable aumento en las primeras etapas de curado y un rendimiento sostenido en compresión. Este comportamiento es coherente con lo reportado por Luo et al. [139], la activación térmica en el entorno 600–900°C incrementa la actividad puzolánica y, en consecuencia, la resistencia a la compresión en morteros. Aunque 925°C se sitúa ligeramente por encima de ese intervalo, los resultados obtenidos siguen la misma tendencia esperada por activación térmica.

Por último, las muestras calcinadas a 1000°C mostraron un comportamiento menos favorable. En flexo-tracción, se alcanzaron los máximos a los 56 días, con excepciones en las muestras finas, donde se observó un leve incremento a los 84 días. Similarmente, en compresión, las muestras alcanzaron máximos a los 56 días y no superaron la resistencia del control. Este comportamiento sugiere que la calcinación a 1000°C pudo haber inducido un proceso de sinterización y una alteración de la microestructura, lo que redujo la capacidad de reacción puzolánica y afectó negativamente la resistencia mecánica a largo plazo [140].

De este modo, se infiere que las temperaturas de calcinación más bajas (800°C y 925°C) favorecieron un aumento progresivo de la resistencia tanto en flexo-tracción como en compresión, lo que se asocia con la formación de fases reactivas que mejoran la resistencia con el tiempo. En cambio, la calcinación a 1000°C resultó en una disminución del desempeño mecánico debido a los efectos de sinterización,

evidenciados por DRX mediante el aumento del tamaño aparente de partícula, y cambios en la microestructura de las muestras. Estos resultados indican que es imprescindible controlar la temperatura de calcinación para preservar la reactividad puzolánica y maximizar el desarrollo resistente en el tiempo. La eficacia del tratamiento, además, depende de parámetros de proceso como la velocidad de calentamiento, la temperatura objetivo y el tiempo de residencia, entre otros [141].

5.6.2 Desempeño mecánico según el método de activación empleado

El análisis del comportamiento mecánico de las muestras tratadas con activación triple (mecánica, térmica y química), en comparación con la activación mecano-química, demuestra que la activación doble presenta un desempeño superior, especialmente en términos de resistencia a la compresión. De acuerdo con lo señalado por Perumal et al. [142], el tratamiento térmico se emplea para incrementar la reactividad de los relaves, siendo eficaz en función de su mineralogía y del uso de temperaturas optimas; sin embargo, superar dicho rango térmico puede generar efectos adversos. En contraste, la activación mecano-química resulta beneficiosa para los procesos de síntesis, descomposición y amorfización de materiales, ya que induce altos niveles de impacto y esfuerzo cortante, promoviendo una mayor superficie específica y una alteración estructural significativa.

Por su parte, Ahmed [143] señala que la activación mecánica mejora la finura del material, favoreciendo un empaquetamiento más eficiente de las partículas, así como una mejor conectividad y refinamiento de los poros. De manera complementaria, la activación química mediante hidróxido de calcio no contribuye directamente al aumento de la resistencia mecánica; sin embargo, desempeña un papel fundamental en la reacción puzolánica, al facilitar la formación adicional de geles CSH cuando reacciona con los compuestos puzolánicos en presencia de agua.

En cuanto a la resistencia a la flexo-tracción, tras 28 días de curado, se observa un comportamiento errático, sin un patrón claro de mejora entre los tratamientos aplicados. No obstante, se destaca que las resistencias más bajas se obtienen con la calcinación a 1000°C, con un promedio de 4,71 [MPa] para las fracciones finas y 5,55 [MPa] para las gruesas.

A los 56 días de curado, el comportamiento mecánico mejora en general en las muestras con activación doble, alcanzando un promedio de 7,78 [MPa] para las fracciones finas y 8,05 [MPa] para las gruesas, valores superiores a los obtenidos con la activación triple. En este caso, las muestras calcinadas a 800°C presentan 6,41 [MPa] para las finas y 8,07 [MPa] para las gruesas; a 925°C, 9,35 [MPa] para las finas y 5,88 [MPa] para las gruesas; y a 1000°C, 4,65 [MPa] para las finas y 5,01 [MPa] para las gruesas.

A los 84 días de curado, las muestras con doble activación continúan mostrando mejores resultados que las de triple activación. Las resistencias promedio para las fracciones finas alcanzan los 7,50 [MPa] y para las gruesas los 8,39 [MPa]. Por su parte, las muestras con triple activación, calcinadas a 800°C, obtienen 5,92 [MPa] para las finas y 8,31 [MPa] para las gruesas; a 925°C, 8,15 [MPa] para las finas y 7,92 [MPa] para las gruesas; y a 1000°C, 5,69 [MPa] para las finas y 5,34 [MPa] para las gruesas.

En cuanto a la resistencia a la compresión, se observa un comportamiento similar en las muestras, aunque se destaca una mejora sostenida en la resistencia a lo largo del tiempo, siendo más pronunciada en las muestras con molienda y activación química del relave. Para 28 días de curado, las muestras con doble activación presentan una resistencia promedio de 29,72 [MPa] para las fracciones finas y 28,45 [MPa] para las gruesas, mientras que las de triple activación registran valores de 21,19 [MPa], 19,61 [MPa] y 18,63 [MPa] para las fracciones finas a temperaturas de calcinación de 800°C, 925°C y 1000°C, respectivamente. Para las fracciones gruesas, las resistencias son de 17,63 [MPa], 22,16 [MPa] y 18,64 [MPa], para las temperaturas mencionadas.

A los 56 días de curado, la activación doble alcanza resistencias de 24,74 [MPa] para las fracciones finas y 27,18 [MPa] para las gruesas, mientras que las muestras con triple activación logran un promedio de 19,26 [MPa] para las fracciones finas a 800°C, 22,05 [MPa] a 925°C y 23,42 [MPa] a 1000°C. Para las fracciones gruesas, las resistencias son de 21,83 [MPa] a 800°C, 24,63 [MPa] a 925°C y 24,48 [MPa] a 1000°C.

Finalmente, a los 84 días de curado, las muestras con doble activación presentan resistencias promedio de 25,79 [MPa] para las fracciones finas y 29,25 [MPa] para las gruesas. En comparación, las muestras con triple activación alcanzan 21,00 [MPa] y 21,70 [MPa] para las fracciones finas y gruesas a 800°C, respectivamente; 25,51 [MPa] y 25,80 [MPa] a 925°C; y 23,01 [MPa] y 21,89 [MPa] a 1000°C.

6 Conclusiones y recomendaciones

Este estudio evaluó la viabilidad de utilizar relave de pórfido cuprífero activado como reemplazo de cemento en la fabricación de morteros, una alternativa medioambientalmente sostenible que busca reducir la huella de carbono asociada a la producción de cemento y aprovechar los relaves transformándolos en un activo con potencial en la industria. Los resultados confirman la viabilidad de reemplazar 10% de cemento por relave de pórfido cuprífero activado en morteros, siempre que se optimicen las condiciones de activación.

La caracterización química y mineralógica del relave mostró importantes transformaciones minerales, como la conversión de caolinita a metacaolín a temperaturas moderadas, lo que incrementa su reactividad. La ventana térmica de 800–925°C fue la más eficaz para favorecer la formación de fases reactivas, con mejoras sostenidas de resistencia mecánica; en contraste a 1000°C disminuyó la actividad puzolánica debido a la sinterización del material y la reducción de la superficie específica, con pérdida de reactividad puzolánica y desempeño inferior a mediano y largo plazo. En trabajabilidad, se observó mayor asentamiento al usar fracción gruesa previamente molida, atribuible a una distribución granulométrica más continua y mejor empaquetamiento de las partículas.

En cuanto al desempeño mecánico, las muestras con activación mecano-química presentaron un comportamiento superior en resistencia a la flexo-tracción y compresión en comparación con las muestras con activación triple. Se demostró que la activación química, junto con el tratamiento de molienda, optimiza significativamente el proceso, ya que la calcinación consume gran cantidad de energía que puede ser evitada sin afectar el desempeño del material. Asimismo, el curado por inmersión prolongado tendió a penalizar la flexo-tracción por mecanismos microestructurales, coherente con el rango de densidades estable.

Se recomienda también emplear activadores químicos alternativos para comparar los resultados mecánicos, ampliando el estudio de las activaciones por separado e incluyendo la incorporación de relave sin tratar. Además, es importante profundizar en la investigación de relaves de otros yacimientos, no solo de cobre, para evaluar su aplicabilidad en distintos contextos geo-mineros.

Finalmente, para futuras investigaciones sobre la aplicabilidad de estas mezclas en infraestructura minera, se sugiere evaluar el efecto de un ambiente agresivo, como la inmersión en ácido sulfúrico, para analizar la estabilidad química y física de los morteros con reemplazo de cemento.

7 Bibliografía

1. Impactos Socioeconómicos de La Minería En Chile.
2. Información de La Minería - SONAMI: Sociedad Nacional de Minería - Chile Available online: <https://www.sonami.cl/v2/informacion-de-la-mineria/> (accessed on 10 September 2025).
3. Consejo Minero *Cifras Actualizadas de La Minería*; 2023;
4. El Impacto Ambiental de La Minería En Chile - Memoria Chilena, Biblioteca Nacional de Chile Available online: <https://www.memoriachilena.gob.cl/602/w3-article-3388.html> (accessed on 10 September 2025).
5. Anuario de La Minería de Chile - SERNAGEOMIN Available online: <https://www.sernageomin.cl/anuario-de-la-mineria-de-chile/> (accessed on 10 September 2025).
6. ¿Qué Son Los Pasivos Ambientales Mineros (PAM)? - Reporte Minero | El Portal de Minería En Chile Available online: <https://www.reporteminero.cl/noticia/videos/2024/01/que-son-los-pasivos-ambientales-mineros> (accessed on 10 September 2025).
7. Proyecto Apunta a Reutilizar Relave Minero En Aplicaciones de Construcción y Minería - Mch Available online: <https://www.mch.cl/innovacion/proyecto-apunta-a-reutilizar-relave-minero-en-aplicaciones-de-construccion-y-mineria/> (accessed on 10 September 2025).
8. Guo, Y.; Qu, F.; Li, W. Advancing Circular Economy and Construction Sustainability: Transforming Mine Tailings into High-Value Cementitious and Alkali-Activated Concrete. *npj Materials Sustainability* 2025 3:1 **2025**, 3, 1–28, doi:10.1038/S44296-025-00049-9.
9. La Contaminación Del Agua En La Minería | Observatorio Económico Latinoamericano OBELA Available online: <https://www.obela.org/analisis/la-contaminacion-del-agua-en-la-mineria> (accessed on 10 September 2025).

10. Residuos Sólidos | CODELCO - Corporación Nacional Del Cobre, Chile Available online: <https://www.codelco.com/sustentabilidad/medio-ambiente-y-territorio/residuos-solidos> (accessed on 10 September 2025).
11. Preguntas Frecuentes Sobre Relaves - SERNAGEOMIN Available online: <https://www.sernageomin.cl/preguntas-frecuentes-sobre-relaves/> (accessed on 10 September 2025).
12. La Escoria Del Cobre: De Residuo a Oportunidad - Reporte Minero | El Portal de Minería En Chile Available online: <https://www.reporteminero.cl/noticia/columnistas/2025/04/la-escoria-del-cobre-de-residuo-a-oportunidad> (accessed on 10 September 2025).
13. Cifuentes, C. Botaderos de Estéril: Cierre Parcial de Faenas Mineras. **2019**.
14. Gestión de Residuos En La Minería | Ecológica Available online: <https://www.ecologica.cl/gestion-de-residuos-en-la-mineria-claves-para-un-manejo-seguro-y-sostenible/> (accessed on 10 September 2025).
15. Pérez Pérez, L.A. Análisis Del Aporte de Residuos Mineros a Suelos Mediante Estudio de Caso En Punta Del Cobre y Consideraciones Para La Normativa Vigente. **2018**.
16. Estándar de Relaves Available online: <https://www.aminerals.cl/sustentabilidad/estandar-de-relaves> (accessed on 10 September 2025).
17. Ministerio de Minería Ley Chile - Decreto 248 - Biblioteca Del Congreso Nacional Available online: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=259901> (accessed on 10 September 2025).
18. Servicio Nacional de Geología y Minería Departamento de Seguridad Minera Guía Técnica de Operación y Control de Depósitos de Relaves DSM/07. **2007**.
19. De, A.; Minería, L.A.; Chile, D.E. *Servicio Nacional de Geología y Minería*;
20. Nacional Depósitos De Relaves, P. DE Depósitos de Relaves Para Una Minería Sostenible.

21. Anuario de La Minería de Chile - SERNAGEOMIN Available online: <https://www.sernageomin.cl/anuario-de-la-mineria-de-chile/> (accessed on 10 September 2025).
22. Datos Públicos Depósito de Relaves - SERNAGEOMIN Available online: <https://www.sernageomin.cl/datos-publicos-deposito-de-relaves/> (accessed on 10 September 2025).
23. Relaves y Minería - Ecometales Available online: <https://www.ecometales.cl/relaves-y-mineria> (accessed on 10 September 2025).
24. Equipo Programa Tranque Avances y Retos Para La Gestión de Los Depósitos de Relaves En Chile. **2018**.
25. Normativas Que Aplican a Los Relaves En Chile – Consejo Minero Available online: <https://consejominero.cl/plataformas-digitales/plataforma-de-relaves/normativas-relaves-chile/> (accessed on 10 September 2025).
26. SUSESO: Normativa y Jurisprudencia - Decreto Supremo N° 248 de 2007, Del Ministerio de Minería Available online: <https://www.suseso.cl/612/w3-article-19172.html> (accessed on 10 September 2025).
27. Ministerio de Minería Ley Chile - Decreto 132 - Biblioteca Del Congreso Nacional Available online: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=221064&idParte=10313328> (accessed on 10 September 2025).
28. Galaz, J.; Gerente, P.; Contenidos, L. Estado Del Arte En La Disposición de Relaves Espesados.
29. Guía Completa de Relaves Espesados y Filtrados - Centro Geotécnico Internacional Available online: <https://www.centrogeotecnico.com/blog-geotecnia-geomecanica/guia-completa-de-relaves-espesados-y-filtrados.html> (accessed on 10 September 2025).
30. Bustamante-Rúa, M.O.; Bustamante-Baena, P.; Osorio-Botero, J.D.; Daza-álvarez, C.A. Diseño Geométrico de Espesador-Sedimentador y Espesador En Contracorriente (CCD)

- En Minería de Oro Para Disposición de Relaves. *Boletín de Ciencias de la Tierra* **2019**, 2019, 19–26, doi:10.15446/rbct.n46.77553.
31. Cámara de Diputados Informe de La Comisión Investigadora Sobre La Situación En Que Se Encuentran Los Depósitos de Relaves Mineros Existentes En El País. **2010**.
 32. Superintendencia de Riesgos del Trabajo CEMENTO. **2024**.
 33. 02 – Materiales Para El Hormigón - Instituto Del Cemento y Del Hormigón de Chile Available online: <https://ich.cl/unidades/02-materiales-para-el-hormigon/> (accessed on 10 September 2025).
 34. Taylor, H.F.W. Cement Chemistry. *Cement chemistry* **1997**, doi:10.1680/CC.25929.
 35. Clínter Para Fabricación de Cemento y Hormigón | CEMEX España Available online: <https://www.cemex.es/cemento/clinker> (accessed on 10 September 2025).
 36. Autoclave, E. Guía de Laboratorio Para Determinar La Expansión Del Concreto.
 37. NCH 148-1968 Cemento. Terminologías, Clasificación y Especificaciones Generales | PDF | Cemento | Química Available online: <https://es.scribd.com/document/493105705/NCh-148-1968-Cemento-Terminologias-clasificacion-y-especificaciones-generales> (accessed on 10 September 2025).
 38. Fraguado Del Hormigón y Su Importancia - PROQUICESA Available online: <https://www.proquicesa.com/fraguado-del-hormigon-y-por-que-importa/> (accessed on 10 September 2025).
 39. NCH 152-1971 Cemento. Método de Determinación Del Tiempo de Fraguado | PDF | Hogar, Jardinería y Bricolaje | Informática Available online: <https://es.scribd.com/document/493105753/NCh-152-1971-Cemento-Metodo-de-determinacion-del-tiempo-de-fraguado> (accessed on 10 September 2025).
 40. Cementos Melón *Cemento: Evaluación de La Resistencia Del Hormigón*; 2016;
 41. NCH 154-1969 Cemento. Determinación Del Peso Específico Relativo | PDF | Cemento | Naturaleza Available online: <https://es.scribd.com/document/493105755/NCh-154->

- 1969-Cemento-Determinacion-del-peso-especifico-relativo (accessed on 10 September 2025).
42. Cañas, J. Determinación Del Peso Específico Del Cemento.
 43. Obando-Angulo, V.M.; Obando-Angulo, V.M. Valor Del Peso Específico Del Cemento Para Diseño de Concretos. *Revista Tecnología en Marcha* **2023**, *36*, 59–67, doi:10.18845/TM.V36I4.6311.
 44. Análisis Del Cemento | Elvatech Ltd. Available online: <https://elvatech.com/es/aplicaciones/cement/> (accessed on 10 September 2025).
 45. ¿Por Qué Se Determina La Resistencia a La Compresión En El Concreto? | Cemex Peru Available online: <https://www.cemex.com.pe/-/por-que-se-determina-la-resistencia-a-la-compresion-en-el-concreto-> (accessed on 10 September 2025).
 46. Cemento Portland: Tipos, Propiedades y Usos Available online: <https://www.paviconj-es.es/noticias/cemento-portland/> (accessed on 10 September 2025).
 47. Tamaño Del Mercado Del Cemento Portland Ordinario y Análisis de Participación – Informe de Investigación de La Industria – Tendencias de Crecimiento Available online: <https://www.mordorintelligence.ar/industry-reports/global-ordinary-portland-cement-market> (accessed on 10 September 2025).
 48. Verma, Y.K.; Mazumdar, B.; Ghosh, P. Thermal Energy Consumption and Its Conservation for a Cement Production Unit. *Environmental Engineering Research* **2021**, *26*, doi:10.4491/EER.2020.111.
 49. Cemento Portland - Construmatica Available online: https://www.construmatica.com/construpedia/Cemento_Portland (accessed on 10 September 2025).
 50. ASTM C150/C150M-22 - Standard Specification for Portland Cement Available online: <https://webstore.ansi.org/standards/astm/astmc150c150m22?source=blog> (accessed on 10 September 2025).

51. Cement - Composition, Properties, Major Cements | Britannica Available online: <https://www.britannica.com/technology/cement-building-material/The-major-cements-composition-and-properties> (accessed on 10 September 2025).
52. Portland Cement Types - The Cement Institute Available online: <https://thecementinstitute.com/portland-cement-types/> (accessed on 10 September 2025).
53. Proceso de Hidratación Del Cemento – 360enconcreto Available online: <https://360enconcreto.com/blog/detalle/proceso-hidratacion-del-cemento/> (accessed on 10 September 2025).
54. Ustabas, I.; Erdogan, S.; Omur, I.; Yilmaz, E. Pozzolanic Effect on the Hydration Heat of Cements Incorporating Fly Ash, Obsidian, and Slag Additives. *Advances in Civil Engineering* **2021**, 2021, 2342896, doi:10.1155/2021/2342896.
55. Munizaga, G. Fisuración Por Retracción En Hormigones: Influencia Del Tipo de Cemento. **2009**.
56. Liu, X.; Li, S.; Ding, Y.; Lu, Z.; Stephan, D.; Chen, Y.; Wang, Z.; Cui, S. Investigation on Admixtures Applied to Alkali-Activated Materials: A Review. *Journal of Building Engineering* **2023**, 64, 105694, doi:10.1016/J.JOBE.2022.105694.
57. Odler, I. Hydration, Setting and Hardening of Portland Cement. *Lea's Chemistry of Cement and Concrete* **2003**, 241–297, doi:10.1016/B978-075066256-7/50018-7.
58. Mostafa, N.Y.; Brown, P.W. Heat of Hydration of High Reactive Pozzolans in Blended Cements: Isothermal Conduction Calorimetry. *Thermochim Acta* **2005**, 435, 162–167, doi:10.1016/j.tca.2005.05.014.
59. What Is Cement Hydration? Phases & It's Importance| UltraTech Cement Available online: <https://www.ultratechcement.com/for-homebuilders/home-building-explained-single/descriptive-articles/what-is-cement-hydration> (accessed on 10 September 2025).
60. ¿Cuánto Tarda En Fragar El Cemento? - PROQUICESA Available online: <https://www.proquicesa.com/cuanto-tarda-en-fragar-el-cemento/> (accessed on 10 September 2025).

61. What Is a Pozzolan? Available online: <https://www.concrete.org/frequentlyaskedquestions.aspx?faqid=688> (accessed on 10 September 2025).
62. ASTM-C0618-08 - Ceniza Volante de Carbón y Puzolana Natural En Crudo o Calcinada Para Uso En Concreto | PDF | Cemento | Material Compuesto Available online: <https://es.scribd.com/document/506914146/ASTM-C0618-08-Ceniza-Volante-de-Carbon-y-Puzolana-Natural-en-Crudo-o-Calcinada-para-Uso-en-Concreto> (accessed on 10 September 2025).
63. SCMs in Concrete: Natural Pozzolans Available online: <https://precast.org/blog/scms-concrete-natural-pozzolans/> (accessed on 10 September 2025).
64. Natural Pozzolans : GCCA Available online: <https://gccassociation.org/cement-and-concrete-innovation/clinker-substitutes/natural-pozzolans/> (accessed on 10 September 2025).
65. de Brito, J.; Kurda, R. The Past and Future of Sustainable Concrete: A Critical Review and New Strategies on Cement-Based Materials. *J Clean Prod* **2021**, *281*, 123558, doi:10.1016/J.JCLEPRO.2020.123558.
66. Hormigones Con Cenizas de Cáscara de Arroz - Asociación Argentina Del Hormigón Elaborado Available online: https://hormigonelaborado.com/hormigones-con-cenizas-de-cascara-de-arroz/?utm_source=chatgpt.com (accessed on 10 September 2025).
67. Supplementary Cementitious Materials: Artificial Pozzolan Available online: <https://codeconcrete.com/supplementary-cementitious-materials-artificial-pozzolan/> (accessed on 10 September 2025).
68. Ayub, M.; Othman, M.H.D.; Khan, I.U.; Hubadillah, S.K.; Kurniawan, T.A.; Ismail, A.F.; Rahman, M.A.; Jaafar, J. Promoting Sustainable Cleaner Production Paradigms in Palm Oil Fuel Ash as an Eco-Friendly Cementitious Material: A Critical Analysis. *J Clean Prod* **2021**, *295*, 126296, doi:10.1016/J.JCLEPRO.2021.126296.
69. Sánchez De Rojas, M.I.; Frías, M.; Rivera, J.; Escorihuela, M.J.; Marín, F.P. *Investigación Sobre La Actividad Puzolanica de Materiales de Desecho Procedentes de*

Arcilla Cocida Research about the Pozzolanic Activity of Waste Materials from Calcined Clay;

70. Yanguatin, H.; Tobón, J.; Ramírez, J. Reactividad Puzolánica de Arcillas Caolíníticasuna Revisión. *Revista ingeniería de construcción* **2017**, *32*, 13–24, doi:10.4067/S0718-50732017000200002.
71. ¿Qué Es Un Mortero? | Tipos de Mortero | BECOSAN® Available online: <https://www.becosan.com/es/que-es-un-mortero/> (accessed on 10 September 2025).
72. ¿Para Qué Sirve El Mortero En La Construcción? | Cemix Available online: <https://www.cemix.com/para-que-sirve-el-mortero-construccion/> (accessed on 10 September 2025).
73. Es Aprobada Norma Tecnica Nacional NCh2256/1:2013 Morteros - Parte 1: Requisitos | INN Available online: <https://www.inn.cl/es-aprobada-norma-tecnica-nacional-nch225612013-morteros-parte-1-requisitos> (accessed on 10 September 2025).
74. NCH 2256-01 Available online: <https://es.scribd.com/document/614219624/NCh-2256-01-2013-046> (accessed on 10 September 2025).
75. NCh 2256-1 of 2001: Morteros - Requisitos Generales Available online: <https://pdfcoffee.com/nch-2256-1-of-2001-morteros-parte-1-requisitos-generales-2-pdf-free.html> (accessed on 10 September 2025).
76. Cheng, Y.; Huang, F.; Qi, S.; Li, W.; Liu, R.; Li, G. Durability of Concrete Incorporated with Siliceous Iron Tailings. *Constr Build Mater* **2020**, *242*, 118147, doi:10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.118147.
77. Li, L.; Yu, H.; Zhou, S.; Dao, V.; Chen, M.; Ji, L.; Benhelal, E. Activation and Utilization of Tailings as CO₂ Mineralization Feedstock and Supplementary Cementitious Materials: A Critical Review. *Materials Today Sustainability* **2023**, *24*, 100530, doi:10.1016/J.MTSUST.2023.100530.
78. What Is Concrete Available online: <https://www.concretecentre.com/Specification/What-is-Concrete.aspx> (accessed on 10 September 2025).

79. Simonsen, A.M.T.; Solismaa, S.; Hansen, H.K.; Jensen, P.E. Evaluation of Mine Tailings' Potential as Supplementary Cementitious Materials Based on Chemical, Mineralogical and Physical Characteristics. *Waste Management* **2020**, *102*, 710–721, doi:10.1016/J.WASMAN.2019.11.037.
80. Varas Rodríguez, J. Síntesis de Zn₂SnO₄ Mediante Activación Mecánica y Tratamiento Térmico. **2023**.
81. Grabias-Blicharz, E.; Franus, W. A Critical Review on Mechanochemical Processing of Fly Ash and Fly Ash-Derived Materials. *Science of the Total Environment* **2023**, *860*, doi:10.1016/j.scitotenv.2022.160529.
82. Kumar, R.; Kumar, S.; Mehrotra, S.P. Towards Sustainable Solutions for Fly Ash through Mechanical Activation. *Resour Conserv Recycl* **2007**, *52*, 157–179, doi:10.1016/J.RESCONREC.2007.06.007.
83. Blanco, E.A. Molienda. *II*.
84. Li, J.; Hitch, M. Mechanical Activation of Magnesium Silicates for Mineral Carbonation, a Review. *Miner Eng* **2018**, *128*, 69–83, doi:10.1016/J.MINENG.2018.08.034.
85. Yang, H.; Yang, W.; Hu, Y.; Du, C.; Tang, A. Effect of Mechanochemical Processing on Illite Particles. *Particle & Particle Systems Characterization* **2005**, *22*, 207–211, doi:10.1002/PPSC.200500953.
86. Mañosa, J.; Alvarez-Coscojuela, A.; Marco-Gibert, J.; Maldonado-Alameda, A.; Chimenos, J.M. Enhancing Reactivity in Muscovitic Clays: Mechanical Activation as a Sustainable Alternative to Thermal Activation for Cement Production. *Appl Clay Sci* **2024**, *250*, 107266, doi:10.1016/J.CLAY.2024.107266.
87. Makó, É.; Kristóf, J.; Horváth, E.; Vágvolgyi, V. Kaolinite–Urea Complexes Obtained by Mechanochemical and Aqueous Suspension Techniques—A Comparative Study. *J Colloid Interface Sci* **2009**, *330*, 367–373, doi:10.1016/J.JCIS.2008.10.054.
88. Valdés, M.F. *Evaluación de Morteros Con Reemplazo de Cemento y Áridos Utilizando Relaves Activados Mecánicamente: Proceso de Molienda*; 2025;

89. Bertagnolli, C.; Kleinübing, S.J.; da Silva, M.G.C. Preparation and Characterization of a Brazilian Bentonite Clay for Removal of Copper in Porous Beds. *Appl Clay Sci* **2011**, *53*, 73–79, doi:10.1016/J.CLAY.2011.05.002.
90. Castillo, R.; Fernández, R.; Antoni, M.; Scrivener, K.; Alujas, A.; Martirena, J.F. Activación de Arcillas de Bajo Grado a Altas Temperaturas. *Revista ingeniería de construcción* **2010**, *25*, 329–352, doi:10.4067/S0718-50732010000300001.
91. Wang, Z.; Li, Z.; Zhang, Y.; Fu, P. Carbon-Based Catalysts for Hydrodeoxygenation of Biomass Derivatives: A Review of Heteroatom Doping Strategies. *Molecular Catalysis* **2024**, *569*, doi:10.1016/j.mcat.2024.114539.
92. Tironi, A.; Trezza, M.; Irassar, E.; Scian, A. Activación Térmica de Bentonitas Para Su Utilización Como Puzolanas. *Revista de la construcción* **2012**, *11*, 44–53, doi:10.4067/S0718-915X2012000100005.
93. Salazar, R. *Evaluación Del Efecto de Reemplazo de Cemento y Áridos En Morteros Mediante El Uso de Relave de Cobre Por Calcinación*; 2025;
94. Vega, F. *Efecto Del Reemplazo de Cemento Por La Fracción Fina de Un Relave Calcinado En El Comportamiento Del Mortero*; 2025;
95. Ilić, B.; Radonjanin, V.; Malešev, M.; Zdujčić, M.; Mitrović, A. Effects of Mechanical and Thermal Activation on Pozzolanic Activity of Kaolin Containing Mica. *Appl Clay Sci* **2016**, *123*, 173–181, doi:10.1016/J.CLAY.2016.01.029.
96. Jindal, B.B. Investigations on the Properties of Geopolymer Mortar and Concrete with Mineral Admixtures: A Review. *Constr Build Mater* **2019**, *227*, 116644, doi:10.1016/J.CONBUILDMAT.2019.08.025.
97. Tironi, A.; Trezza, M.A.; Scian, A.N.; Irassar, E.F. Utilización de Caolín Calcinado Como Puzolana: Determinación de La Temperatura Óptima de Calcinación. *Universidad Nacional la Plata* **2012**, 406–411.
98. Maruthupandian, S.; Chaliasou, A.; Kanellopoulos, A. Recycling Mine Tailings as Precursors for Cementitious Binders – Methods, Challenges and Future Outlook. *Constr Build Mater* **2021**, *312*, 125333, doi:10.1016/J.CONBUILDMAT.2021.125333.

99. Torres-Carrasco, M.; Puertas, F. Alkaline Activation of Different Aluminosilicates as an Alternative to Portland Cement: Alkali Activated Cements or Geopolymers. *Revista ingeniería de construcción* **2017**, *32*, 05–12, doi:10.4067/S0718-50732017000200001.
100. Xu, H.; Van Deventer, J.S.J. The Geopolymerisation of Alumino-Silicate Minerals. *Int J Miner Process* **2000**, *59*, 247–266, doi:10.1016/S0301-7516(99)00074-5.
101. Bernal, S.A.; Provis, J.L. Durability of Alkali-Activated Materials: Progress and Perspectives. *Journal of the American Ceramic Society* **2014**, *97*, 997–1008, doi:10.1111/JACE.12831.
102. Álcalis Cáusticos y No Cáusticos En La Industria: Una Visión General - Orapi Maintenance Iberia Available online: <https://orapitransnet.com/blog/alcalis-causticos-y-no-causticos-en-la-industria-una-vision-general/> (accessed on 10 September 2025).
103. Fernández-Jiménez, A.; Palomo, A. Propiedades y Aplicaciones de Los Cementos Alcalinos. *Revista ingeniería de construcción* **2009**, *24*, 213–232, doi:10.4067/S0718-50732009000300001.
104. Aydın, S.; Kızıltepe, C.Ç. Valorization of Boron Mine Tailings in Alkali-Activated Mortars. *Journal of Materials in Civil Engineering* **2019**, *31*, 04019224, doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002871.
105. Ye, N.; Yang, J.; Ke, X.; Zhu, J.; Li, Y.; Xiang, C.; Wang, H.; Li, L.; Xiao, B. Synthesis and Characterization of Geopolymer from Bayer Red Mud with Thermal Pretreatment. *Journal of the American Ceramic Society* **2014**, *97*, 1652–1660, doi:10.1111/JACE.12840.
106. Espinoza Espinoza, A.; García Ochoa, E.; Espol Preparación, Caracterización y Evaluación de Concreto de Geopolímero Reforzado Con Fibra de Polipropileno. **2018**.
107. Obenaus-Emler, R.; Falah, M.; Illikainen, M. Assessment of Mine Tailings as Precursors for Alkali-Activated Materials for on-Site Applications. *Constr Build Mater* **2020**, *246*, 118470, doi:10.1016/J.CONBUILDMAT.2020.118470.
108. BENEFICIOS PROPIEDADES Para Estructuras Durables.
109. Norma Chilena NCh163: Áridos Para Morteros y Hormigones-Requisitos. **2013**.

110. NCH 1498-2012 | PDF | Densidad | Cloruro Available online: <https://es.scribd.com/document/327314468/NCh-1498-2012> (accessed on 10 September 2025).
111. Contreras, H.; La Fuente, S.; Jorge, J. Influencia de La Activación Alcalina Del Relave Minero Para El Sosténimiento Con Shotcrete En Una Mina Del Centro Del Perú. **2023**.
112. NCH 158 PDF | PDF | Tolerancia de Ingeniería | Hormigón Available online: <https://es.scribd.com/document/124382956/NCh-158-pdf> (accessed on 10 September 2025).
113. Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-Mm] Cube Specimens)., doi:10.1520/C0109_C0109M.
114. NCH 2261-2010 M0-Confección de Probetas En Obra y Determinación de La Resistencia A Compresión | PDF Available online: <https://es.scribd.com/document/790591122/NCh-2261-2010-M0-Confeccion-de-probetas-en-obra-y-determinacion-de-la-resistencia-a-compresion> (accessed on 10 September 2025).
115. Astm C642-97 | PDF | Densidad | Agua Available online: <https://es.scribd.com/document/744948289/ASTM-C642-97> (accessed on 10 September 2025).
116. Astm C 78 | PDF | Hormigón Available online: <https://es.scribd.com/document/523878924/ASTM-C-78> (accessed on 10 September 2025).
117. Pozo, C.; Lisboa, J.; Marin, J.; Olivares, L. *Molienda Mecánica de Aleación UMo Interacción Del Sistema UMo-Al*;
118. Hollanders, S. *Mineralogical Study of the Pozzolan Properties of Calcined Clays*; 2017;
119. NCH 1019.Of2009 Hormigón - Determinación de La Docilidad - Método Del Asentamiento Del Cono de Abrams | PDF | Chile | Hormigón Available online: <https://es.scribd.com/document/323008012/NCh-1019-Of2009-Hormigon->

Determinacion-de-La-Docilidad-Metodo-Del-Asentamiento-Del-Cono-de-Abrams
(accessed on 10 September 2025).

120. Sánchez, P.; Jiménez, M.; Pascual, J.; Raigón, M.; Pérez, J. Influencia de Los Tratamientos Mecánicos y Térmicos En Primas Que Contienen Pirofilita. **2000**.
121. Cabrera, L.; Tironi, A.; Scian, A.N.; Irassar, E.F. Influencia Del Grado de Molienda En La Actividad Puzolánica de Arcillas Que Contienen Caolinita y Halloysita. *Av. cien. ing* **2016**, 7, 81–90.
122. Herrero, G. Transformaciones Minerales En El Proceso de Cocción de Arcillas Bauxíticas y Su Relación Con Propiedades Físicas de Refractarios. **2020**.
123. Albita – Museo Virtual de Moléculas y Minerales Available online: <https://virtual-museum.soils.wisc.edu/display/albite/> (accessed on 27 October 2025).
124. Moscovita – La Geología Es El Camino Available online: <https://geologyistheway.com/minerals/muscovite-phengite/> (accessed on 27 October 2025).
125. Kapeluszna, E.; Kotwica, Ł.; Różycka, A.; Gólek, Ł. Incorporation of Al in C-A-S-H Gels with Various Ca/Si and Al/Si Ratio: Microstructural and Structural Characteristics with DTA/TG, XRD, FTIR and TEM Analysis. *Constr Build Mater* **2017**, 155, 643–653, doi:10.1016/J.CONBUILDMAT.2017.08.091.
126. Mehdipour, I.; Khayat, K.H. Effect of Particle-Size Distribution and Specific Surface Area of Different Binder Systems on Packing Density and Flow Characteristics of Cement Paste. *Cem Concr Compos* **2017**, 78, 120–131, doi:10.1016/J.CEMCONCOMP.2017.01.005.
127. Li, R.; Lei, L.; Plank, J. Impact of Metakaolin Content and Fineness on the Behavior of Calcined Clay Blended Cements Admixed with HPEG PCE Superplasticizer. *Cem Concr Compos* **2022**, 133, 104654, doi:10.1016/J.CEMCONCOMP.2022.104654.
128. Alujas, A.; Fernández, R.; Quintana, R.; Scrivener, K.L.; Martirena, F. Pozzolanic Reactivity of Low Grade Kaolinitic Clays: Influence of Calcination Temperature and

- Impact of Calcination Products on OPC Hydration. *Appl Clay Sci* **2015**, *108*, 94–101, doi:10.1016/J.CLAY.2015.01.028.
129. Irassar, E.F.; Bonavetti, V.L.; Menéndez, G.; Carrasco, M.F.; Irassar, E.F.; Bonavetti, V.L.; Menéndez, G.; Carrasco, M.F. Hidratación y Propiedades de Cemento Ternarios Con Filler Calcáreo y Escoria. *Revista ALCONPAT* **2015**, *5*, 84–96.
 130. V. L. Bonavetti; V. F. Rahhal Interacción de Adiciones Minerales Pastas De. **2006**, *5*, 33–41.
 131. Rosell, M.; Costafreda, J.; Parra, J.L.; Calvo, B. Influencia de La Adición de Zeolita En Las Propiedades Micro y Macroestructurales En Pastas y Morteros.
 132. Zhu, X.; Richardson, I.G. Morphology-Structural Change of C-A-S-H Gel in Blended Cements. *Cem Concr Res* **2023**, *168*, 107156, doi:10.1016/J.CEMCONRES.2023.107156.
 133. Nş, A.; Bilenler Altundal, M.; Nş, A.; Bilenler Altundal, M. Durability Performance of Alkali-Activated Concretes Exposed to Sulfuric Acid Attack. *Revista de la construcción* **2023**, *22*, 16–35, doi:10.7764/RDLC.22.1.16.
 134. Zhou, J.; Dong, Y.; Qiu, T.; Lv, J.; Guo, P.; Liu, X. The Microstructure and Modification of the Interfacial Transition Zone in Lightweight Aggregate Concrete: A Review. *Buildings* **2025**, *Vol. 15*, Page 2784 **2025**, *15*, 2784, doi:10.3390/BUILDINGS15152784.
 135. Vargas Del Río, D.; Zárate Del Valle, P.F.; Pulido, H.G. *Actividad Puzolánica de Las Tobas Pumíticas de La Zona Metropolitana de Guadalajara*; 2005;
 136. Nguyen, Q.D.; Afroz, S.; Castel, A. Influence of Calcined Clay Reactivity on the Mechanical Properties and Chloride Diffusion Resistance of Limestone Calcined Clay Cement (LC3) Concrete. *Journal of Marine Science and Engineering* **2020**, *Vol. 8*, Page 301 **2020**, *8*, 301, doi:10.3390/JMSE8050301.
 137. Ferreiro, S.; Canut, M.M.C.; Lund, J.; Herfort, D. Influence of Fineness of Raw Clay and Calcination Temperature on the Performance of Calcined Clay-Limestone Blended Cements. *Appl Clay Sci* **2019**, *169*, 81–90, doi:10.1016/J.CLAY.2018.12.021.

138. Leng, A.; Mathieu, A.; Alujas, A.; Martirena, J.; Scrivener, K. Effect of Fineness in Clinker-Calcined Clays-Limestone Cements Available online: <https://www.emerald.com/jadcr/article-abstract/27/9/546/437164/Effect-of-fineness-in-clinker-calcined-clays?redirectedFrom=PDF> (accessed on 10 November 2025).
139. Luo, Z.; Ge, M.; Ou, J.; Liu, X.; Mu, Y.; Zhang, W.; Ye, J.; Zhang, M.; Gao, M.; Yang, Y.; et al. Precalcination-Modified Lead-Zinc Tailings for Supersulfated Cement Production: Insights into Phase Assemblages, Microstructure, and Mechanical Properties. *Constr Build Mater* **2025**, *473*, 141076, doi:10.1016/J.CONBUILDMAT.2025.141076.
140. Castillo, R.; Fernández, R.; Antoni, M.; Scrivener, K.; Alujas, A.; Martirena, J.F. Activation of Low Grade Clays at High Temperatures. *Revista ingeniería de construcción* **2010**, *25*, 329–352, doi:10.4067/S0718-50732010000300001.
141. Ananthi, G.; Roy, K.; Boakye, C.; Khorami, K.; Boakye, K.; Khorami, M. Performance of Calcined Impure Kaolinitic Clay as a Partial Substitute for Portland Cement Concrete: A Review. *Journal of Composites Science* **2025**, *Vol. 9, Page 145* **2025**, *9*, 145, doi:10.3390/JCS9040145.
142. Perumal, P.; Niu, H.; Kiventerä, J.; Kinnunen, P.; Illikainen, M. Upcycling of Mechanically Treated Silicate Mine Tailings as Alkali Activated Binders. *Miner Eng* **2020**, *158*, 106587, doi:10.1016/J.MINENG.2020.106587.
143. Ahmed, A. Assessing the Effects of Supplementary Cementitious Materials on Concrete Properties:A Review. *Discover Civil Engineering* **2024** *1:1* **2024**, *1*, 1–47, doi:10.1007/S44290-024-00154-Z.

8 Anexos

8.1 DRX del relave

El presente anexo presenta el difractograma de la muestra de relave 1 en estado bruto, es decir, sin separación entre las fracciones fina y gruesa. Este registro sirve como línea base mineralógica del material de partida y permite identificar las fases cristalinas predominantes para su posterior comparación con las fracciones y tratamientos evaluados. La Figura 28 presenta el difractograma correspondiente.

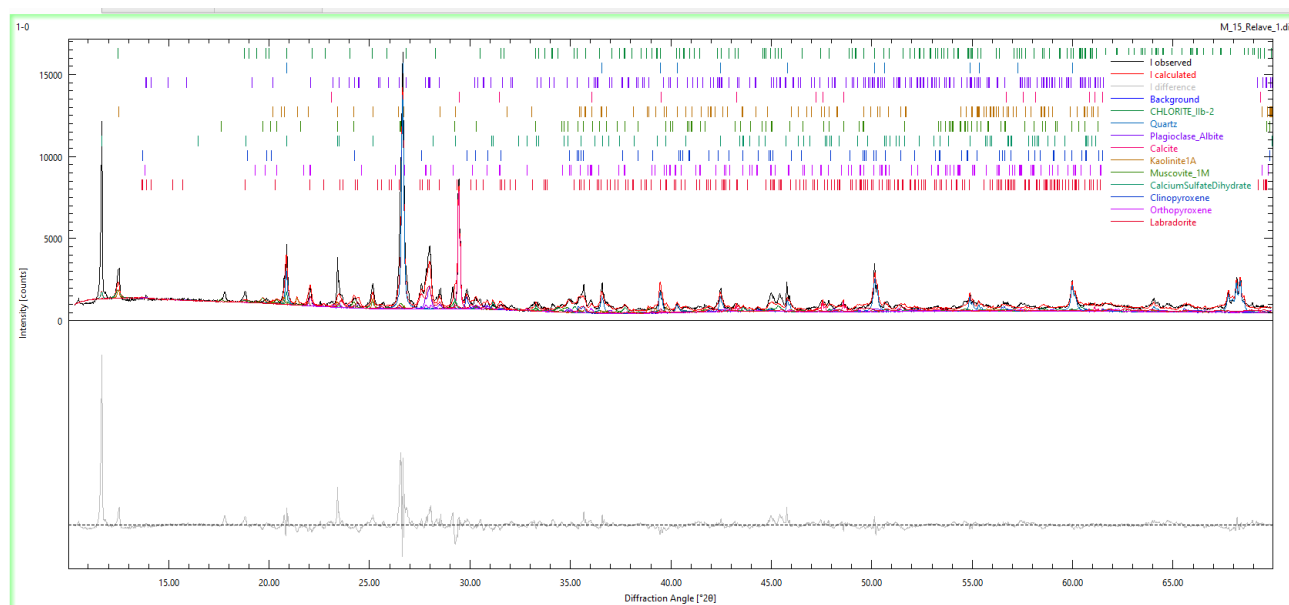


Figura 28. Difractograma DRX del relave 1 completo.

8.2 Proceso de tamizaje: Preparación material para elaboración de muestras

Para la incorporación de relave activado químicamente se dispuso de 7000 [g] de material. El relave se fraccionó en tandas de 100 [g] para su clasificación granulométrica en un tamiz electromagnético. Cada tanda se tamizó en la serie de mallas N° 4, 10, 20, 30, 50, 100 y 200, registrando el retenido en cada malla y el pasante final. Se definió como fracción fina el pasante de la malla N° 100 ($<150\text{ }\mu\text{m}$) y como fracción gruesa el material retenido sobre dicha malla ($\geq 150\text{ }\mu\text{m}$). La Figura 29 muestra el tamiz electromagnético utilizado.



Figura 29. Tamiz electromagnético Sieve Shaker.

Las fracciones obtenidas se almacenaron en recipientes etiquetados para su posterior activación y dosificación.

8.3 Detalles de las dosificaciones

En el siguiente anexo se presentan en detalle las dosificaciones utilizadas durante el desarrollo del estudio. Para cada mezcla se especifican: la fracción del relave empleada (fina o gruesa), el tipo de activación ya sea mecánica, térmica (800, 925, 940 y 1000 °C) y/o química con cal al 10% y 20%, el tiempo de permanencia de la mezcla de relave activado (1, 2, 3, 5 y 7 días), el porcentaje de reemplazo de cemento por relave (10% y 20%) y la nomenclatura utilizada para identificar cada muestra.

A continuación, se presenta el sistema de abreviaturas utilizado en las tablas:

- AD: Agua destilada.
- Ca: Cal.
- R: Relave.
- %RC: Porcentaje de reemplazo de cemento.
- C: Cemento.
- PRA: Pasta de relave activado.
- AF: Áridos finos.
- H2O: Agua.

Asimismo, se define la nomenclatura empleada para identificar cada muestra:

- Ctrl: Muestra de control.
- R1: Relave utilizado.
- 10RC o 20RC: Porcentaje de reemplazo de cemento empleado.
- F15m o FG15m: Fracción fina (F) o gruesa (FG) sometida a molienda durante 15 minutos.
- 800, 925, 940 o 1000: Temperatura de calcinación.
- C10 o C20: Porcentaje en peso de cal respecto del relave.
- 1, 2, 3, 5 o 7d: Días de permanencia de la mezcla de relave activado.

La Tabla 10 resume las dosificaciones consideradas en la elaboración de las muestras de control:

Tabla 10. Dosificaciones muestras de control.

	Activación Química			Mortero				
Muestra	AD [g]	Ca [g]	R [g]	%RC	C [g]	PRA[g]	AF[g]	H2O [g]
Ctrl_1	0	0	0	0	500	0	1000	300

Ctrl_2	0	0	0	0	500	0	1000	300
Ctrl_c10	0	5	0	0	495	0	1000	300
Ctrl_c20	0	11	0	0	490	0	1000	300

La Tabla 11 resume las dosificaciones consideradas en la elaboración de las muestras de fino:

Tabla 11. Dosificaciones muestras de material fino elaboradas durante la primera etapa del estudio.

	Activación Química			Mortero				
Muestra	AD [g]	Ca [g]	R [g]	%RC	C [g]	PRA[g]	AF[g]	H2O [g]
R110RCF15m800c10-1d	40,3	5,5	55	10	450	86,67	1000	263,3
R110RCF15m800c10-3d	40,3	5,5	55	10	450	86,67	1000	263,3
R110RCF15m800c10-7d	40,3	5,5	55	10	450	86,67	1000	263,3
R110RCF15m800c20-1d	44,0	11	55	10	450	90,00	1000	260,0
R110RCF15m800c20-3d	44,0	11	55	10	450	90,00	1000	260,0
R110RCF15m800c20-7d	44,0	11	55	10	450	90,00	1000	260,0
R110RCF15m925c10-1d	40,3	5,5	55	10	450	86,67	1000	263,3
R110RCF15m925c10-3d	40,3	5,5	55	10	450	86,67	1000	263,3
R110RCF15m925c10-7d	40,3	5,5	55	10	450	86,67	1000	263,3
R110RCF15m925c20-1d	44,0	11	55	10	450	90,00	1000	260,0
R110RCF15m925c20-3d	44,0	11	55	10	450	90,00	1000	260,0
R110RCF15m925c20-7d	44,0	11	55	10	450	90,00	1000	260,0
R110RCF15m1000c10-1d	40,3	5,5	55	10	450	86,67	1000	263,3
R110RCF15m1000c10-3d	40,3	5,5	55	10	450	86,67	1000	263,3
R110RCF15m1000c10-7d	40,3	5,5	55	10	450	86,67	1000	263,3
R110RCF15m1000c20-1d	44,0	11	55	10	450	90,00	1000	260,0
R110RCF15m1000c20-3d	44,0	11	55	10	450	90,00	1000	260,0
R110RCF15m1000c20-7d	44,0	11	55	10	450	90,00	1000	260,0

La Tabla 12 resume las dosificaciones consideradas en la elaboración de las muestras de grueso:

Tabla 12. Dosificaciones muestras de material grueso elaboradas durante la primera etapa del estudio.

	Activación Química	Mortero
--	--------------------	---------

Muestra	AD [g]	Ca [g]	R [g]	%RC	C [g]	PRA[g]	AF[g]	H2O [g]
R110RCFG15m800c10-1d	40,3	5,5	55	10	450	86,67	1000	263,3
R110RCFG15m800c10-3d	40,3	5,5	55	10	450	86,67	1000	263,3
R110RCFG15m800c10-7d	40,3	5,5	55	10	450	86,67	1000	263,3
R110RCFG15m800c20-1d	44,0	11	55	10	450	90,00	1000	260,0
R110RCFG15m800c20-3d	44,0	11	55	10	450	90,00	1000	260,0
R110RCFG15m800c20-7d	44,0	11	55	10	450	90,00	1000	260,0
R110RCFG15m925c10-1d	40,3	5,5	55	10	450	86,67	1000	263,3
R110RCFG15m925c10-3d	40,3	5,5	55	10	450	86,67	1000	263,3
R110RCFG15m925c10-7d	40,3	5,5	55	10	450	86,67	1000	263,3
R110RCFG15m925c20-1d	44,0	11	55	10	450	90,00	1000	260,0
R110RCFG15m925c20-3d	44,0	11	55	10	450	90,00	1000	260,0
R110RCFG15m925c20-7d	44,0	11	55	10	450	90,00	1000	260,0
R110RCFG15m1000c10-1d	40,3	5,5	55	10	450	86,67	1000	263,3
R110RCFG15m1000c10-3d	40,3	5,5	55	10	450	86,67	1000	263,3
R110RCFG15m1000c10-7d	40,3	5,5	55	10	450	86,67	1000	263,3
R110RCFG15m1000c20-1d	44,0	11	55	10	450	90,00	1000	260,0
R110RCFG15m1000c20-3d	44,0	11	55	10	450	90,00	1000	260,0
R110RCFG15m1000c20-7d	44,0	11	55	10	450	90,00	1000	260,0

La Tabla 13 resume las dosificaciones consideradas en la elaboración de la etapa complementaria del estudio, diferenciándose entre sí según el objetivo de elaboración de las muestras:

Tabla 13. Dosificaciones muestras elaboradas durante la etapa complementaria del estudio.

	Activación Química			Mortero				
Muestra	AD [g]	Ca [g]	R [g]	%RC	C [g]	PRA[g]	AF[g]	H2O [g]
ACTIVACIÓN MECÁNICA Y QUÍMICA								
R110RCF15mc10-1d	40,3	5,5	55	10	450	86,67	1000	263,3
R110RCF15mc10-3d	40,3	5,5	55	10	450	86,67	1000	263,3
R110RCF15mc10-7d	40,3	5,5	55	10	450	86,67	1000	263,3
R110RCFG15mc10-1d	40,3	5,5	55	10	450	86,67	1000	263,3

R110RCFG15mc10-3d	40,3	5,5	55	10	450	86,67	1000	263,3
R110RCFG15mc10-7d	40,3	5,5	55	10	450	86,67	1000	263,3
REEMPLAZO DEL 20% DE CEMENTO POR RELAVE								
R120RCF15m800c10-1d	80,7	11	110	20	400	173,33	1000	226,7
R120RCF15m925c10-3d	80,7	11	110	20	400	173,33	1000	226,7
R120RCFG15m925c10-3d	80,7	11	110	20	400	173,33	1000	226,7
COMPORTAMIENTO EN TIEMPOS INTERMEDIOS								
R110RCFG15m925c10-2d	40,3	5,5	55	10	450	86,67	1000	263,3
R110RCFG15m925c10-5d	40,3	5,5	55	10	450	86,67	1000	263,3
RANGO DE TEMPERATURA ENTRE 925-1000°C								
R110RCF15m940c10-1d	40,3	5,5	55	10	450	86,67	1000	263,3
R110RCF15m940c10-2d	40,3	5,5	55	10	450	86,67	1000	263,3
R110RCF15m940c10-3d	40,3	5,5	55	10	450	86,67	1000	263,3
R110RCF15m940c10-5d	40,3	5,5	55	10	450	86,67	1000	263,3
R110RCF15m940c10-7d	40,3	5,5	55	10	450	86,67	1000	263,3

8.4 Activación mecánica del relave: Molienda

La conminución del relave se efectuó mediante molienda en molino de bolas tipo Marcy durante 15 minutos. La Figura 30 muestra el equipo utilizado.



Figura 30. Proceso de molienda en molino de bolas: (a) Vista del equipo; (b) Interior con distribución de las bolas de acero; (c) Separación del material molido de los cuerpos moledores.

A continuación, en la Tabla 14 se detalla la distribución de la carga balanceada del molino de bolas tipo Marcy.

Tabla 14. Distribución molino de bolas tipo Marcy.

Diámetro de las bolas [in]	Número de bolas	Peso [g]
1 1/2	12	2840
1 1/4	14	1890
1	11	780
7/8	15	720
3/4	20	580
5/8	15	260
Total	87	7070

8.5 Preparación muestra de relave activado

Antes de la elaboración del mortero, el relave fue activado químicamente con un aditivo de cal. Para ello, se pesaron el relave, la cal y el agua destilada, según las dosificaciones establecidas, tal como se muestra en la Figura 31.

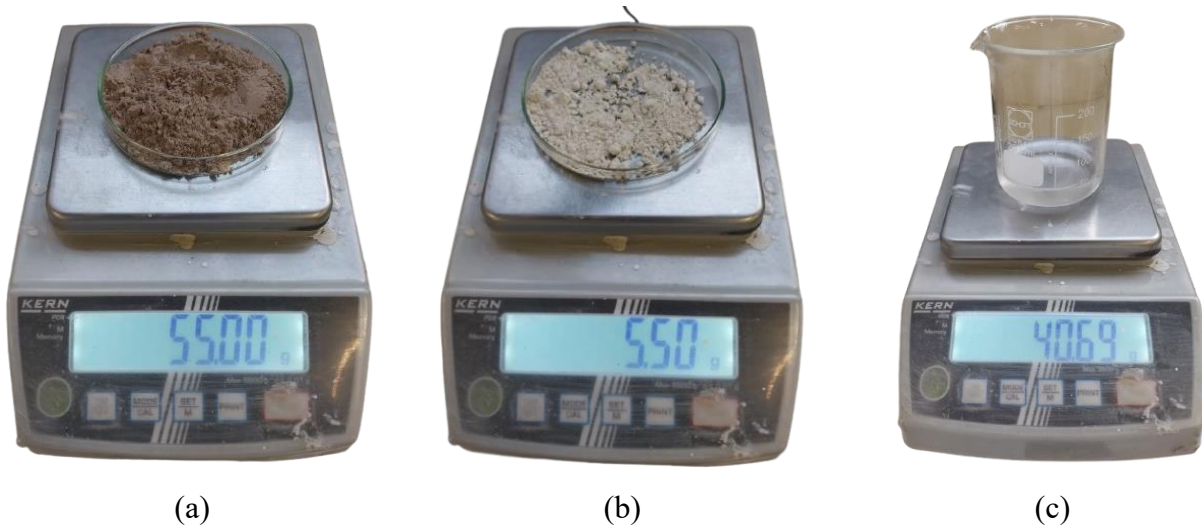


Figura 31. Activación química. (a) Pesaje del relave; (b) Pesaje de la cal; (c) Pesaje del agua destilada.

Una vez realizado el pesaje, se procede a mezclar el relave activado en un agitador magnético. Primero, se añade el agua destilada con la cal, manteniéndola en agitación durante aproximadamente 30 segundos. Luego, se incorpora el relave y se continúa agitando hasta obtener una pasta homogénea. A continuación, se mide el pH inicial de la mezcla y se deja reposar en un desecador de vidrio durante los tiempos de permanencia establecidos (1, 3 y 7 días). Transcurrido ese tiempo, se mide nuevamente el pH final de la mezcla. Este procedimiento se ilustra en la Figura 32.



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 32. Procedimiento de mezcla del relave activado con cal y agua destilada. (a) Agitación de agua destilada con cal; (b) Incorporación del relave; (c) Medición de pH; (d) Reposo de la mezcla de relave activado.

8.6 Preparación muestras DRX: Preparación de muestras y pulverización

Tras el tamizado y la separación del relave en fracción fina ($<150\text{ }\mu\text{m}$) y fracción gruesa ($\geq 150\text{ }\mu\text{m}$), se calcinó una selección representativa a 800, 925 y 1000 °C. Posteriormente, tanto el material tratado como el no tratado se caracterizaron mediante difracción de rayos X. La Figura 33 presenta el conjunto de muestras sometidas a DRX, que comprenden:

- Fracción fina sin tratar.
- Fracción fina molida.
- Fracción fina molida y calcinada a 800 °C.
- Fracción fina molida y calcinada a 925 °C.
- Fracción fina molida y calcinada a 1000 °C.
- Fracción gruesa sin tratar.
- Fracción gruesa molida.
- Fracción gruesa molida y calcinada a 800 °C.
- Fracción gruesa molida y calcinada a 925 °C.
- Fracción gruesa molida y calcinada a 1000 °C.



Figura 33. Muestras caracterizadas mediante DRX.

Dado que el equipo de DRX admite un tamaño máximo de partícula de $\sim 200\text{ }\mu\text{m}$, fue necesario pulverizar la fracción gruesa hasta cumplir dicha condición, con el fin de asegurar la homogeneidad de la muestra. Para ello, se seleccionaron 100 [g] de la muestra de grueso sin tratar, la cual fue

sometida a conminución de tamaño en un molino pulverizador de laboratorio, como se observa en la Figura 34.



(a)



(b)

Figura 34. Preparación de la muestra gruesa sin tratar: (a) Material distribuido en cilindros de acero; (b) Muestra instalada en el molino pulverizador.

8.7 Procedimiento para la elaboración del mortero

En el siguiente anexo se detalla el procedimiento completo para la elaboración de la mezcla de mortero conforme la Norma NCh 158.

1. Pesaje de materiales:

Para la preparación de las mezclas, se efectuó el pesaje por separado del cemento, el agua, el árido y la mezcla de relave activado en una balanza digital de precisión, con tarado previo del contenedor para evitar sesgos en la lectura. La Figura 35 presenta el proceso de pasaje de los componentes.

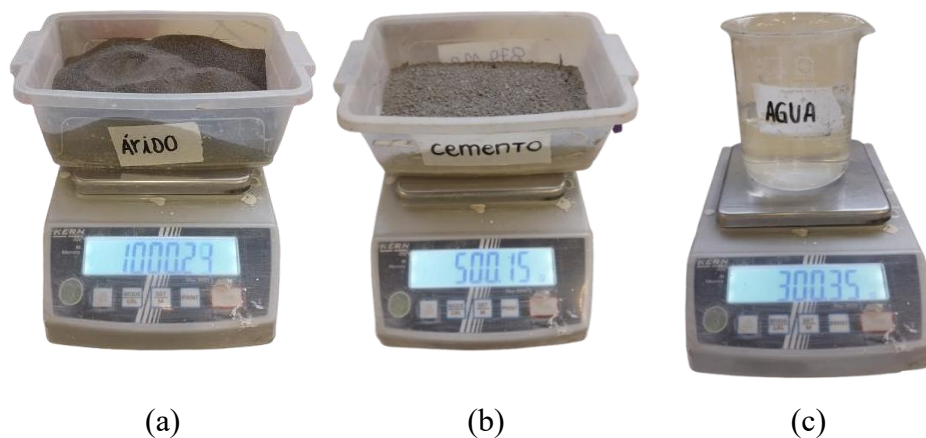


Figura 35. Pesaje de los componentes. (a) Árido fino; (b) Cemento Bio Bio; (c) Agua.

2. Mezclado de la dosificación:

De acuerdo con la norma mencionada, la mezcla de mortero se preparó siguiendo una secuencia controlada de tiempos y velocidades: primero se vertió el agua en el recipiente (previamente limpio y tarado), para luego incorporar el cemento; inmediatamente se puso en marcha la mezcladora de accionamiento eléctrico a velocidad lenta durante 30 [s]. Cumplido ese periodo de tiempo, se añadió el árido fino de manera continua y gradual durante 30 [s]. Con todo el árido ya dentro, se aumentó a velocidad alta y se mezcló por 30 [s], tras lo cual se detuvo el equipo por 1 [min] 30 [s]: durante los primeros 15 [s] de esa pausa se raspó cuidadosamente con una espátula de goma el material adherido a las paredes y al fondo, empujándolo hacia la zona de mezclado sin compactarlo. Transcurrida la pausa, se reanudó la operación a velocidad alta por 1 [min] adicional. La Figura 36 presenta la secuencia llevada a cabo durante la preparación de la mezcla de mortero.

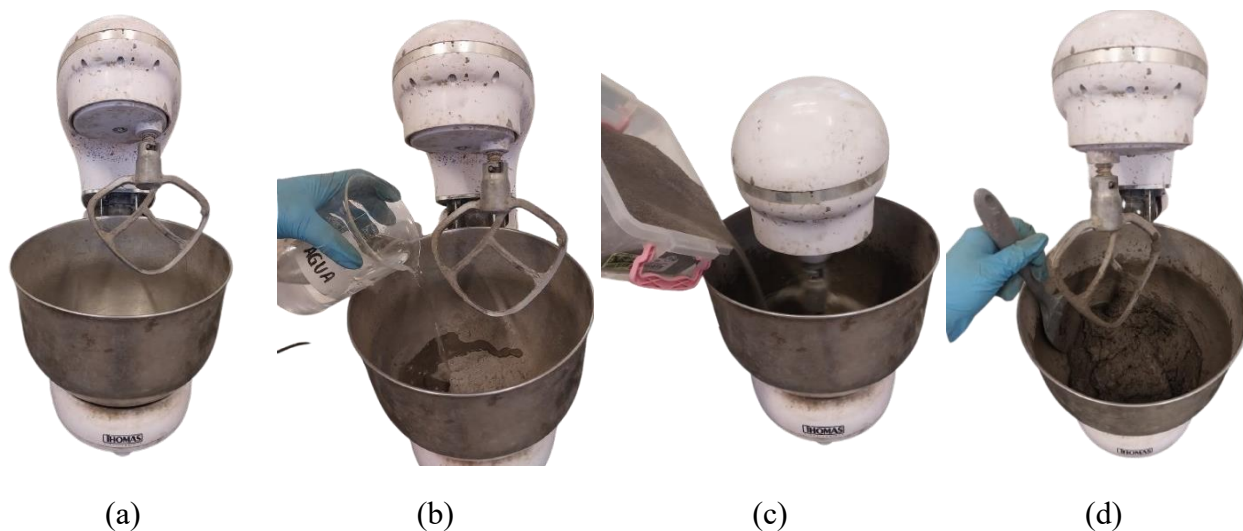


Figura 36. Preparación de la mezcla de mortero. (a) Mezcladora de accionamiento eléctrico; (b) Incorporación de agua y cemento; (c) Adición de árido; (d) Raspado de las paredes del recipiente.

3. Evaluación de la trabajabilidad:

La trabajabilidad de la mezcla de mortero se determinó mediante el ensayo de flujo conforme a la Norma ASTM C-1437. Primero, se limpia y seca la superficie y, sobre ella, se ubica el molde tipo cono (Cono de Abrams) previamente humedecido. A continuación, se incorpora en el molde una primera capa de mortero de aproximadamente 25 [mm] y se apisona 20 golpes uniformes, aplicando presión suficiente para asegurar un llenado homogéneo. Luego, se completa el molde con la segunda capa y se repiten 20 golpes con el apisonador. Finalizado el llenado, se retira el exceso de mezcla y se enraza la superficie. Posteriormente, se levanta el molde en forma vertical y se deja la muestra en reposo durante 1 [min]. Finalmente, se mide el asentamiento de la mezcla con respecto al molde. La Figura 37 muestra parte del procedimiento del ensayo de trabajabilidad.

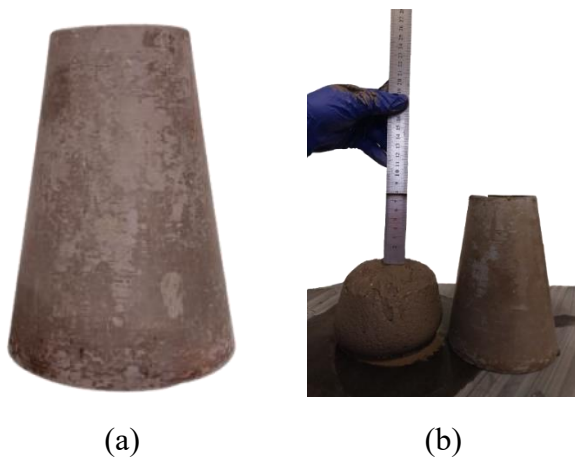


Figura 37. Ensayo de trabajabilidad. (a) Cono de Abrams; (b) Medición del asentamiento.

4. Moldeo de probetas:

El moldeo de las probetas se efectuó con moldes RILEM prismáticos de tres compartimientos ($40 \times 40 \times 160$ [mm]), de acuerdo con la Norma NCh 158. El mortero se vació en dos capas: la primera hasta la mitad de la capacidad del molde, apisonándola con 20 golpes uniformes sobre toda la superficie; luego se añadió el resto de la mezcla y se repitieron 20 golpes. Completado el llenado, se enrasó la superficie retirando el excedente y se compactó el conjunto en una mesa vibratoria eléctrica durante 7–10 [s] para minimizar la presencia de burbujas. La Figura 38 describe el proceso de moldeo.

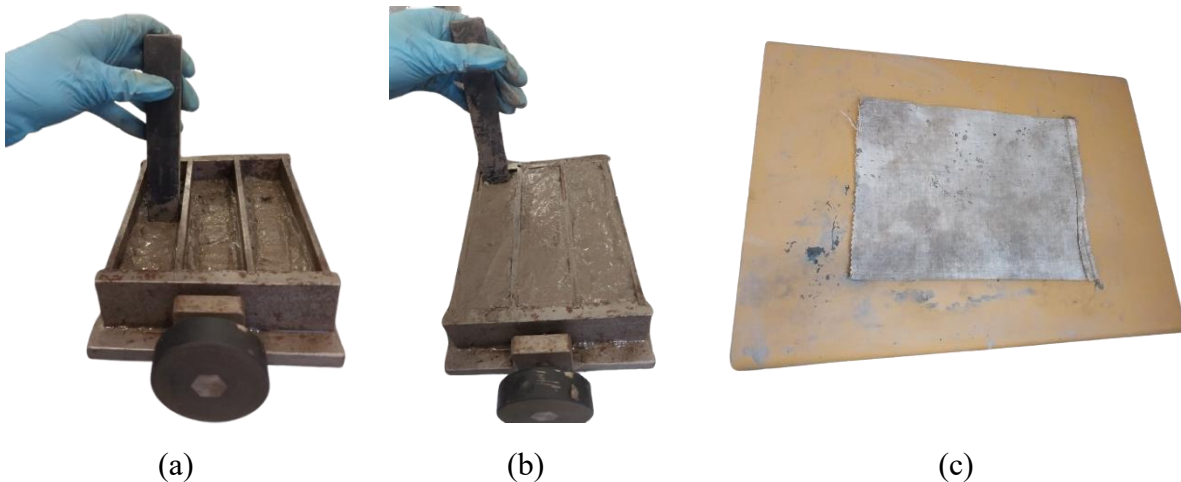


Figura 38. Proceso de moldeo. (a) Apisonamiento de la primera capa de mortero; (b) Apisonamiento tras el llenado completo; (c) Mesa vibratoria eléctrica.

5. Fraguado, desmolde, curado y secado:

Una vez que se ha completado el llenado de los moldes, las probetas se cubren con una lámina de plástico para evitar la pérdida de humedad y se colocan sobre un mesón durante 24 horas, lo que permite iniciar su fraguado inicial. Tras este periodo, se procede a desmoldar las probetas, se les asigna un número de identificación y luego se someten al proceso de curado por inmersión, conforme a la Norma NCh 1017, durante períodos de 28, 56 y 84 días. La Figura 39 describe el proceso de fraguado, desmolde y curado.

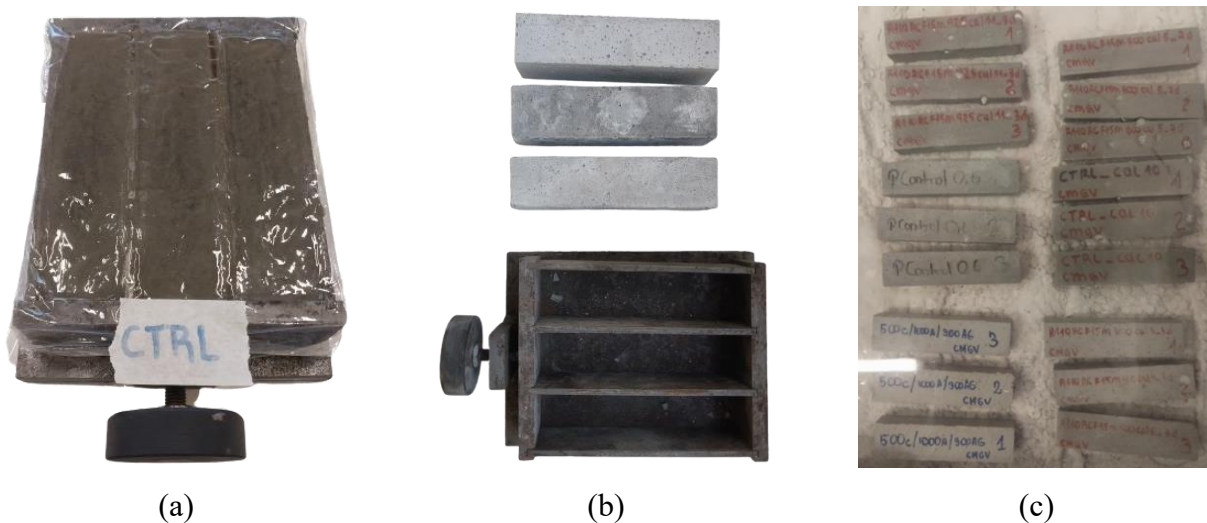
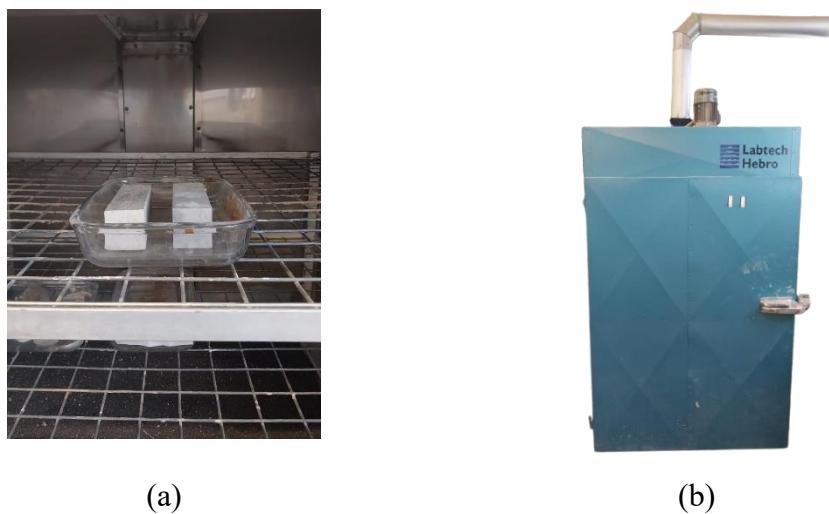


Figura 39. Proceso posterior al moldeo. (a) Cubierta de plástico; (b) Desmolde; (c) Curado por inmersión.

Una vez transcurrido el periodo de curado, las muestras se someten a un proceso de secado en horno, tras lo cual se pesan y miden sus dimensiones, siguiendo lo estipulado por la Norma ASTM C642. El procedimiento se ilustra en la Figura 40.





(c)



(d)

Figura 40. Proceso posterior al curado. (a) Secado de las muestras; (b) Horno de secado Labtech Hebro; (c) Pesaje de las muestras; (d) Dimensionamiento de las muestras.

8.8 Dimensionamiento de las probetas

En el presente anexo se presenta el dimensionamiento de las probetas prismáticas correspondientes a los tres tiempos de curado establecidos: 28, 56 y 84 días de inmersión, descritos en las tablas 15, 16 y 17 adjuntas.

Tabla 15. Dimensionamiento de las probetas a los 28 días de curado.

Muestra	ID	A1	A2	B1	B2	H1	H2	H3	H4
		mm							
		PROBETAS CON 28 DÍAS DE CURADO - SECADO DE 1 DÍA							
control	1	161,02	161,27	40,27	40,59	38,43	39,59	39,82	39,43
	2	160,64	160,73	40,14	40,62	41,55	40,23	39,45	39,99
ctrl_cal10	3	158,67	158,94	38,91	39,54	40,34	40,17	40,20	41,09
ctrl_cal20	3	160,60	160,26	39,81	40,16	40,92	40,01	39,44	39,81
R1_10RC_F15m_800_cal10_1d	3	158,69	159,65	39,11	39,96	40,51	40,55	40,90	40,98
R1_10RC_F15m_800_cal10_3d	3	160,22	160,17	40,54	40,53	40,57	40,19	38,83	39,83
R1_10RC_F15m_800_cal10_7d	3	160,71	160,05	39,87	39,93	39,11	39,67	40,54	40,10
R1_10RC_F15m_800_cal20_1d	3	160,94	160,97	38,54	40,38	40,34	40,57	40,74	40,79
R1_10RC_F15m_800_cal20_3d	3	159,89	159,87	40,11	38,79	41,42	41,53	40,48	40,97
R1_10RC_F15m_800_cal20_7d	3	160,42	159,92	39,58	40,25	40,21	40,19	40,38	40,81
R1_10RC_F15m_925_cal10_1d	3	161,12	161,43	39,98	40,65	40,02	40,01	39,92	39,98
R1_10RC_F15m_925_cal10_3d	3	160,19	160,36	40,47	40,39	40,01	40,27	40,84	40,42
R1_10RC_F15m_925_cal10_7d	3	159,94	160,06	40,39	40,08	39,45	39,74	39,36	39,10
R1_10RC_F15m_925_cal20_1d	3	160,66	161,00	40,21	40,43	39,78	39,83	40,09	39,62
R1_10RC_F15m_925_cal20_3d	3	159,27	159,02	40,73	39,94	40,38	40,99	40,19	40,13
R1_10RC_F15m_925_cal20_7d	3	161,32	161,30	40,12	39,85	40,22	40,90	41,08	40,90
R1_10RC_F15m_1000_cal10_1d	3	160,53	160,65	40,07	40,13	40,05	40,71	40,01	39,99
R1_10RC_F15m_1000_cal10_3d	3	161,93	161,71	38,80	38,12	41,56	41,16	40,61	41,28
R1_10RC_F15m_1000_cal10_7d	3	160,90	161,48	39,06	38,30	39,98	40,27	40,37	41,16
R1_10RC_F15m_1000_cal20_1d	3	160,38	159,90	38,07	40,84	39,21	40,82	39,81	39,08
R1_10RC_F15m_1000_cal20_3d	1	161,50	161,43	41,23	40,28	41,23	39,53	38,91	40,40
R1_10RC_F15m_1000_cal20_7d	3	161,91	161,86	39,52	37,99	40,40	41,27	41,37	42,22
R1_10RC_FG15m_800_cal10_1d	3	160,35	160,60	40,47	40,66	39,13	39,89	41,57	39,79
R1_10RC_FG15m_800_cal10_3d	3	160,88	161,20	40,20	38,56	41,35	41,65	40,67	40,96
R1_10RC_FG15m_800_cal10_7d	3	161,20	159,90	40,00	39,80	40,20	40,00	40,80	40,20
R1_10RC_FG15m_800_cal20_1d	3	159,51	159,14	40,03	40,23	40,25	40,87	39,98	40,17
R1_10RC_FG15m_800_cal20_3d	3	160,02	160,11	39,05	38,91	40,14	40,04	40,20	40,33
R1_10RC_FG15m_800_cal20_7d	3	160,50	160,00	39,80	39,76	40,10	40,00	40,00	40,50
R1_10RC_FG15m_925_cal10_1d	3	161,31	161,56	40,32	40,47	39,23	39,23	39,28	39,18
R1_10RC_FG15m_925_cal10_3d	1	160,86	160,95	39,10	39,24	39,88	40,00	40,17	39,96
R1_10RC_FG15m_925_cal10_7d	1	161,24	161,11	38,91	36,76	40,66	41,45	41,58	41,39

R1_10RC_FG15m_925_cal20_1d	3	160,53	160,82	41,36	40,59	41,94	40,41	40,95	41,23
R1_10RC_FG15m_925_cal20_3d	1	160,99	160,90	39,37	40,34	40,23	41,09	40,30	40,32
R1_10RC_FG15m_925_cal20_7d	1	161,26	161,38	39,31	39,18	40,14	40,41	40,21	40,63
R1_10RC_FG15m_1000_cal10_1d	3	161,17	161,14	40,68	39,02	40,32	40,30	40,34	40,28
R1_10RC_FG15m_1000_cal10_3d	3	161,32	161,61	39,67	39,91	40,46	41,23	41,28	41,19
R1_10RC_FG15m_1000_cal10_7d	3	161,36	161,88	39,88	39,32	41,28	41,03	40,59	41,86
R1_10RC_FG15m_1000_cal20_1d	3	161,54	161,60	40,85	40,26	40,60	39,78	39,94	40,05
R1_10RC_FG15m_1000_cal20_3d	3	159,82	160,19	39,22	41,31	40,24	40,78	40,37	40,23
R1_10RC_FG15m_1000_cal20_7d	3	160,14	160,05	40,62	39,10	40,21	40,16	39,95	40,84
Control nuevo	3	161,62	161,45	40,20	40,25	38,57	38,58	38,59	38,40
R1_10RC_F15m_cal10_1d	3	160,67	160,71	40,25	40,19	38,01	37,39	37,09	37,38
R1_10RC_F15m_cal10_3d	3	160,64	160,83	40,02	39,95	42,22	39,86	40,58	39,83
R1_10RC_F15m_cal10_7d	3	161,40	161,52	40,32	40,12	40,45	40,09	38,94	39,38
R1_10RC_FG15m_cal10_1d	3	160,86	160,94	38,29	38,32	40,05	40,12	40,49	40,83
R1_10RC_FG15m_cal10_3d	3	160,81	160,86	40,22	40,14	38,59	39,71	40,41	39,46
R1_10RC_FG15m_cal10_7d	3	160,10	160,28	39,37	41,76	40,17	40,27	40,36	40,35
R1_20RC_F15m_800_cal10_1d	3	160,68	161,38	40,06	40,68	39,85	39,60	39,25	39,73
R1_20RC_F15m_925_cal10_3d	3	160,57	160,53	39,32	40,48	40,19	40,16	40,25	40,33
R1_20RC_FG15m_925_cal10_3d	3	160,36	160,68	40,17	40,28	38,15	39,42	41,51	39,76
R1_10RC_FG15m_925_cal10_2d	3	160,63	160,59	40,54	40,10	40,52	40,17	41,01	40,45
R1_10RC_FG15m_925_cal10_5d	3	160,67	160,62	37,31	40,42	40,86	40,43	40,38	40,80
R1_10RC_F15m_940_cal10_1d	3	160,95	160,94	39,41	39,36	41,12	40,85	41,17	40,62
R1_10RC_F15m_940_cal10_2d	3	160,72	160,85	37,99	40,33	40,33	40,22	40,43	40,20
R1_10RC_F15m_940_cal10_3d	3	160,66	160,31	40,48	40,34	40,77	38,74	37,46	38,59
R1_10RC_F15m_940_cal10_5d	3	162,02	161,98	38,95	40,49	40,59	40,28	40,12	40,11
R1_10RC_F15m_940_cal10_7d	3	161,41	161,23	41,54	38,69	40,37	40,22	40,42	40,36

Tabla 16. Dimensionamiento de las probetas a los 56 días de curado.

Muestra	ID	A1	A2	B1	B2	H1	H2	H3	H4
		mm							
		PROBETAS CON 56 DÍAS DE CURADO - SECADO DE 1 DÍA							
control	3	160,57	160,61	38,49	40,23	40,22	40,24	40,22	40,33
ctrl_cal10	2	159,20	158,97	38,74	37,58	40,66	41,29	41,28	40,76
ctrl_cal20	2	161,28	161,15	40,12	39,12	41,31	40,85	40,82	40,92
R1_10RC_F15m_800_cal10_1d	2	158,95	159,73	38,79	38,63	41,39	41,15	40,48	38,96
R1_10RC_F15m_800_cal10_3d	2	160,91	160,66	39,80	42,03	41,06	40,52	40,49	40,73
R1_10RC_F15m_800_cal10_7d	2	160,91	160,69	39,67	40,70	40,31	40,12	40,09	40,40
R1_10RC_F15m_800_cal20_1d	2	161,32	160,72	40,23	38,84	40,11	40,18	40,52	40,17
R1_10RC_F15m_800_cal20_3d	2	160,64	160,04	39,64	40,73	40,76	41,04	40,64	40,79
R1_10RC_F15m_800_cal20_7d	2	160,92	160,76	40,12	40,42	39,22	39,87	40,52	40,04
R1_10RC_F15m_925_cal10_1d	2	161,14	161,17	39,31	38,52	40,09	39,99	40,01	40,07
R1_10RC_F15m_925_cal10_3d	2	160,64	160,65	39,59	40,20	40,63	40,71	40,39	40,65

R1_10RC_F15m_925_cal10_7d	2	160,07	160,04	39,16	39,46	40,39	40,59	39,60	40,47
R1_10RC_F15m_925_cal20_1d	2	160,95	161,06	40,07	39,94	40,17	40,66	40,22	40,32
R1_10RC_F15m_925_cal20_3d	2	160,19	158,96	40,27	39,49	40,26	41,16	40,24	40,48
R1_10RC_F15m_925_cal20_7d	2	161,15	161,39	39,40	40,59	40,15	40,39	40,25	39,96
R1_10RC_F15m_1000_cal10_1d	2	160,29	160,27	40,11	40,11	40,10	40,24	39,75	40,24
R1_10RC_F15m_1000_cal10_3d	2	161,58	161,78	38,75	39,80	40,34	40,57	40,41	40,85
R1_10RC_F15m_1000_cal10_7d	2	161,29	161,11	39,64	38,86	40,29	40,82	40,47	41,30
R1_10RC_F15m_1000_cal20_1d	2	159,67	159,71	40,23	40,41	36,95	39,31	41,07	39,34
R1_10RC_F15m_1000_cal20_3d	2	161,49	161,31	40,92	40,52	37,93	40,19	40,86	39,41
R1_10RC_F15m_1000_cal20_7d	2	161,78	161,80	40,15	39,24	40,43	39,87	40,15	39,87
R1_10RC_FG15m_800_cal10_1d	2	160,51	160,49	40,19	40,38	39,16	40,20	41,03	40,43
R1_10RC_FG15m_800_cal10_3d	2	161,03	160,92	37,44	39,73	40,20	40,01	39,86	40,01
R1_10RC_FG15m_800_cal10_7d	2	161,08	160,96	38,85	40,33	40,08	40,04	40,09	41,34
R1_10RC_FG15m_800_cal20_1d	2	159,44	159,63	40,28	40,23	39,92	39,28	39,75	38,94
R1_10RC_FG15m_800_cal20_3d	2	159,91	160,11	40,47	39,91	39,98	40,21	39,84	39,77
R1_10RC_FG15m_800_cal20_7d	2	160,70	160,75	39,62	39,80	40,48	40,40	40,13	40,09
R1_10RC_FG15m_925_cal10_1d	2	160,91	160,60	38,52	39,61	40,14	40,19	40,18	40,30
R1_10RC_FG15m_925_cal10_3d	2	160,93	160,77	38,25	37,28	41,28	40,73	40,38	41,20
R1_10RC_FG15m_925_cal10_7d	2	160,91	161,28	39,59	37,82	40,21	40,14	40,17	40,08
R1_10RC_FG15m_925_cal20_1d	2	160,55	160,65	39,97	38,24	40,52	40,21	40,10	40,16
R1_10RC_FG15m_925_cal20_3d	2	161,11	161,16	39,67	40,06	40,05	40,41	40,16	40,43
R1_10RC_FG15m_925_cal20_7d	2	160,99	160,97	39,29	39,63	41,03	40,75	40,36	40,51
R1_10RC_FG15m_1000_cal10_1d	2	161,39	161,40	40,14	40,24	40,72	39,44	38,88	39,72
R1_10RC_FG15m_1000_cal10_3d	2	160,72	160,88	39,97	39,44	40,13	40,26	39,93	40,22
R1_10RC_FG15m_1000_cal10_7d	2	161,63	161,54	38,32	37,11	40,39	40,46	40,18	40,46
R1_10RC_FG15m_1000_cal20_1d	2	161,27	160,93	40,46	40,28	40,64	40,62	40,16	41,07
R1_10RC_FG15m_1000_cal20_3d	2	160,06	159,98	39,21	41,51	41,31	41,21	40,48	41,67
R1_10RC_FG15m_1000_cal20_7d	2	159,83	159,96	38,38	41,10	40,44	42,12	40,28	40,44
Control nuevo	2	161,42	161,33	40,25	40,25	38,56	38,32	37,97	38,37
R1_10RC_F15m_cal10_1d	2	161,33	161,27	40,28	40,28	37,19	36,96	36,55	37,14
R1_10RC_F15m_cal10_3d	2	160,67	160,74	40,35	40,29	40,49	40,10	40,03	39,97
R1_10RC_F15m_cal10_7d	2	162,20	162,48	39,89	41,29	40,15	40,07	40,48	40,36
R1_10RC_FG15m_cal10_1d	2	161,42	160,76	39,57	39,26	40,16	40,03	40,48	40,12
R1_10RC_FG15m_cal10_3d	2	160,48	160,43	38,92	41,05	40,33	40,34	40,19	40,29
R1_10RC_FG15m_cal10_7d	2	160,44	160,66	38,40	41,39	40,20	40,50	40,43	40,36
R1_20RC_F15m_800_cal10_1d	2	161,02	160,98	39,08	39,02	40,06	40,04	40,49	39,95
R1_20RC_F15m_925_cal10_3d	2	160,10	160,10	40,28	41,19	40,17	39,85	40,01	39,86
R1_20RC_FG15m_925_cal10_3d	2	160,63	160,67	38,05	41,85	40,16	40,11	40,08	40,14
R1_10RC_FG15m_925_cal10_2d	2	160,14	160,55	40,47	40,48	40,27	39,94	40,15	40,01
R1_10RC_FG15m_925_cal10_5d	2	161,24	161,03	40,77	37,56	40,41	40,25	40,40	40,08
R1_10RC_F15m_940_cal10_1d	2	160,36	160,48	39,73	39,75	40,38	39,94	40,01	40,08
R1_10RC_F15m_940_cal10_2d	2	160,36	160,34	38,81	40,52	40,30	40,26	40,27	40,38
R1_10RC_F15m_940_cal10_3d	2	160,43	160,68	37,83	39,97	40,29	40,42	40,45	40,58
R1_10RC_F15m_940_cal10_5d	2	162,78	162,76	40,25	39,44	40,04	40,08	40,09	40,21

R1_10RC_F15m_940_cal10_7d	2	160,80	160,81	41,14	38,11	40,13	40,11	40,47	40,15
---------------------------	---	--------	--------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

Tabla 17. Dimensionamiento de las probetas a los 84 días de curado

Muestra	ID	A1	A2	B1	B2	H1	H2	H3	H4
		mm							
		PROBETAS CON 84 DÍAS DE CURADO - SECADO DE 1 DÍA							
control	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ctrl_cal10	1	158,98	159,00	39,47	38,48	40,23	40,18	39,96	40,77
ctrl_cal20	1	161,05	160,83	40,55	39,19	40,16	40,24	40,14	40,23
R1_10RC_F15m_800_cal10_1d	1	159,02	159,64	38,32	38,51	40,00	40,10	40,35	40,32
R1_10RC_F15m_800_cal10_3d	1	161,03	160,72	39,93	40,83	40,16	40,25	40,69	40,26
R1_10RC_F15m_800_cal10_7d	1	160,94	161,11	40,75	39,79	40,10	40,13	40,04	40,17
R1_10RC_F15m_800_cal20_1d	1	161,13	161,16	39,37	39,96	40,20	40,69	40,96	40,65
R1_10RC_F15m_800_cal20_3d	1	160,01	159,99	40,01	40,91	40,34	40,11	40,72	40,09
R1_10RC_F15m_800_cal20_7d	1	160,20	160,36	40,29	40,10	40,34	40,49	40,36	40,46
R1_10RC_F15m_925_cal10_1d	1	161,52	161,64	40,24	40,60	40,01	40,81	40,47	40,11
R1_10RC_F15m_925_cal10_3d	1	160,03	160,14	40,02	40,14	39,99	40,16	40,95	40,32
R1_10RC_F15m_925_cal10_7d	1	160,28	160,30	39,19	38,98	40,11	40,01	40,02	40,12
R1_10RC_F15m_925_cal20_1d	1	161,32	161,10	40,27	40,08	40,39	41,02	41,31	41,13
R1_10RC_F15m_925_cal20_3d	1	160,10	159,29	40,10	38,97	41,29	41,16	40,44	40,76
R1_10RC_F15m_925_cal20_7d	1	160,84	160,99	38,84	40,33	40,32	40,57	40,45	40,40
R1_10RC_F15m_1000_cal10_1d	1	160,46	160,51	39,58	40,31	40,02	40,23	40,19	40,03
R1_10RC_F15m_1000_cal10_3d	1	161,44	161,84	39,15	40,07	40,30	40,14	40,01	40,16
R1_10RC_F15m_1000_cal10_7d	1	161,49	161,52	37,84	37,73	40,37	40,83	41,27	40,79
R1_10RC_F15m_1000_cal20_1d	1	159,91	159,98	37,32	40,58	40,83	40,22	40,15	40,12
R1_10RC_F15m_1000_cal20_3d	3	161,08	161,53	39,35	36,76	40,34	40,09	40,26	40,11
R1_10RC_F15m_1000_cal20_7d	1	161,41	161,41	39,31	40,27	40,02	40,30	40,23	40,48
R1_10RC_FG15m_800_cal10_1d	1	160,55	160,66	41,33	39,69	40,16	40,20	40,21	40,50
R1_10RC_FG15m_800_cal10_3d	1	161,41	161,21	40,30	38,91	40,54	40,25	40,24	40,33
R1_10RC_FG15m_800_cal10_7d	1	160,54	161,18	36,16	38,50	40,20	40,17	40,18	40,41
R1_10RC_FG15m_800_cal20_1d	1	160,07	160,30	40,15	38,96	41,27	40,84	40,60	40,78
R1_10RC_FG15m_800_cal20_3d	1	160,35	160,42	39,49	39,81	40,29	40,12	40,30	40,03
R1_10RC_FG15m_800_cal20_7d	1	161,14	160,72	40,39	40,49	40,20	40,78	41,42	40,85
R1_10RC_FG15m_925_cal10_1d	1	161,18	160,94	37,91	38,66	40,31	40,51	40,36	40,43
R1_10RC_FG15m_925_cal10_3d	2	160,95	160,96	39,44	38,38	40,46	41,02	40,92	40,81
R1_10RC_FG15m_925_cal10_7d	3	161,44	160,98	38,89	40,17	36,93	37,92	39,14	39,19
R1_10RC_FG15m_925_cal20_1d	1	160,67	160,84	40,39	38,74	40,45	40,42	40,22	40,38
R1_10RC_FG15m_925_cal20_3d	3	161,91	161,48	40,47	40,10	41,12	40,08	40,20	40,08
R1_10RC_FG15m_925_cal20_7d	3	161,18	160,97	40,32	40,33	40,30	40,11	40,38	40,27
R1_10RC_FG15m_1000_cal10_1d	1	160,97	161,08	38,81	40,65	40,38	40,26	40,43	40,33
R1_10RC_FG15m_1000_cal10_3d	1	161,04	160,93	39,89	39,77	40,56	41,33	40,46	40,10
R1_10RC_FG15m_1000_cal10_7d	1	161,37	161,32	40,59	39,42	40,14	39,82	40,19	40,17

R1_10RC_FG15m_1000_cal20_1d	1	161,39	161,44	39,22	40,58	40,62	40,09	40,12	40,26
R1_10RC_FG15m_1000_cal20_3d	1	160,16	160,34	39,49	38,41	40,30	40,11	40,67	40,16
R1_10RC_FG15m_1000_cal20_7d	1	160,20	160,57	37,66	39,81	41,15	40,93	40,43	40,99
Control nuevo	1	161,50	161,52	34,99	34,88	40,36	40,99	40,42	40,54
R1_10RC_F15m_cal10_1d	1	160,90	161,06	39,93	39,32	40,06	40,19	40,20	40,03
R1_10RC_F15m_cal10_3d	1	161,07	161,03	39,94	40,43	40,05	40,21	40,10	40,03
R1_10RC_F15m_cal10_7d	1	161,63	161,62	41,12	39,56	40,20	40,17	39,97	39,99
R1_10RC_FG15m_cal10_1d	1	160,47	160,45	36,36	36,12	40,19	40,13	40,07	40,02
R1_10RC_FG15m_cal10_3d	1	160,61	160,90	40,36	38,73	40,19	40,23	40,21	40,24
R1_10RC_FG15m_cal10_7d	1	160,44	160,49	39,09	40,76	40,05	40,15	40,10	40,11
R1_20RC_F15m_800_cal10_1d	1	161,26	161,21	39,37	39,64	39,97	40,00	39,90	39,89
R1_20RC_F15m_925_cal10_3d	1	160,36	160,48	39,57	40,12	41,34	41,06	40,52	41,08
R1_20RC_FG15m_925_cal10_3d	1	160,53	160,93	38,18	42,01	40,13	40,19	40,20	40,45
R1_10RC_FG15m_925_cal10_2d	1	160,19	160,43	40,81	40,64	40,01	40,21	40,02	40,24
R1_10RC_FG15m_925_cal10_5d	1	160,97	160,85	38,37	41,64	40,28	40,24	40,51	40,18
R1_10RC_F15m_940_cal10_1d	1	161,18	161,10	39,39	39,47	40,00	39,89	39,85	39,83
R1_10RC_F15m_940_cal10_2d	1	160,46	160,52	39,53	41,76	40,22	40,21	40,11	40,34
R1_10RC_F15m_940_cal10_3d	1	160,17	160,13	40,83	38,97	40,61	40,57	40,22	40,17
R1_10RC_F15m_940_cal10_5d	1	161,46	161,61	38,40	37,09	40,13	40,20	40,03	40,04
R1_10RC_F15m_940_cal10_7d	1	161,30	161,27	41,05	39,61	40,25	40,11	40,27	40,01

8.9 Pesaje de las probetas

El presente anexo detalla los valores numéricos obtenidos tras el pesaje de las muestras, realizado después de los periodos de curado de 28, 56 y 84 días, y tras 24 horas de secado. Los resultados se presentan en la Tabla 18.

Tabla 18. Pesaje de las muestras correspondientes a los periodos de curado de 28, 56 y 84 días.

Muestra	Peso en seco		
	g		
	28 días	56 días	84 días
control	476,77	-	-
	479,99	477,46	-
ctrl_cal10	469,80	499,21	492,07
ctrl_cal20	484,07	531,95	507,71
R1_10RC_F15m_800_cal10_1d	463,17	516,99	468,73
R1_10RC_F15m_800_cal10_3d	467,07	526,73	488,89
R1_10RC_F15m_800_cal10_7d	479,67	518,41	508,12
R1_10RC_F15m_800_cal20_1d	469,81	533,98	493,76
R1_10RC_F15m_800_cal20_3d	467,36	517,78	476,18
R1_10RC_F15m_800_cal20_7d	483,57	515,80	513,95
R1_10RC_F15m_925_cal10_1d	497,80	468,35	529,39
R1_10RC_F15m_925_cal10_3d	487,90	533,74	497,86
R1_10RC_F15m_925_cal10_7d	482,09	487,07	480,88
R1_10RC_F15m_925_cal20_1d	477,76	477,30	529,80
R1_10RC_F15m_925_cal20_3d	472,65	515,71	477,86
R1_10RC_F15m_925_cal20_7d	497,32	486,76	487,11
R1_10RC_F15m_1000_cal10_1d	497,50	493,40	499,50
R1_10RC_F15m_1000_cal10_3d	500,20	485,70	495,55
R1_10RC_F15m_1000_cal10_7d	504,93	488,88	511,55
R1_10RC_F15m_1000_cal20_1d	520,44	496,85	496,21
R1_10RC_F15m_1000_cal20_3d	509,41	491,11	470,76
R1_10RC_F15m_1000_cal20_7d	516,80	494,19	535,16
R1_10RC_FG15m_800_cal10_1d	499,54	480,40	487,00
R1_10RC_FG15m_800_cal10_3d	507,16	455,31	517,23
R1_10RC_FG15m_800_cal10_7d	481,21	517,19	456,72
R1_10RC_FG15m_800_cal20_1d	491,61	474,97	484,74
R1_10RC_FG15m_800_cal20_3d	486,52	460,63	505,29
R1_10RC_FG15m_800_cal20_7d	519,78	513,23	492,14
R1_10RC_FG15m_925_cal10_1d	508,41	488,84	481,00
R1_10RC_FG15m_925_cal10_3d	479,28	493,05	492,46
R1_10RC_FG15m_925_cal10_7d	498,32	475,94	509,47

R1_10RC_FG15m_925_cal20_1d	521,73	482,63	499,26
R1_10RC_FG15m_925_cal20_3d	487,96	499,95	497,12
R1_10RC_FG15m_925_cal20_7d	508,43	492,46	540,55
R1_10RC_FG15m_1000_cal10_1d	526,95	500,63	500,70
R1_10RC_FG15m_1000_cal10_3d	502,10	489,00	492,46
R1_10RC_FG15m_1000_cal10_7d	527,17	469,40	525,33
R1_10RC_FG15m_1000_cal20_1d	524,86	515,30	500,22
R1_10RC_FG15m_1000_cal20_3d	507,70	491,06	484,27
R1_10RC_FG15m_1000_cal20_7d	514,58	497,05	520,68
Control nuevo	484,49	518,27	449,71
R1_10RC_F15m_cal10_1d	470,48	498,35	502,53
R1_10RC_F15m_cal10_3d	496,47	491,10	499,45
R1_10RC_F15m_cal10_7d	505,40	490,98	533,22
R1_10RC_FG15m_cal10_1d	489,77	530,70	463,10
R1_10RC_FG15m_cal10_3d	493,35	499,18	504,14
R1_10RC_FG15m_cal10_7d	519,94	492,58	532,37
R1_20RC_F15m_800_cal10_1d	535,89	494,11	501,40
R1_20RC_F15m_925_cal10_3d	497,95	534,94	509,60
R1_20RC_FG15m_925_cal10_3d	485,29	518,76	494,20
R1_10RC_FG15m_925_cal10_2d	528,42	529,96	539,03
R1_10RC_FG15m_925_cal10_5d	476,29	486,26	503,06
R1_10RC_F15m_940_cal10_1d	531,97	489,81	495,99
R1_10RC_F15m_940_cal10_2d	504,65	496,79	536,76
R1_10RC_F15m_940_cal10_3d	515,29	515,00	526,87
R1_10RC_F15m_940_cal10_5d	482,04	531,39	475,01
R1_10RC_F15m_940_cal10_7d	492,52	482,92	500,28

8.10 Ensayos de resistencia mecánica

Una vez finalizado el proceso de curado por inmersión de las muestras, las probetas se someten, en primer lugar, a ensayos de flexo-tracción. Este ensayo se realizó en el equipo electromecánico Multispeed, en el cual se posiciona la probeta y se somete a carga en tres puntos, según el método estándar. La Figura 41 muestra la ejecución del ensayo y el resultado de las probetas después de haber sido sometidas a la prueba.

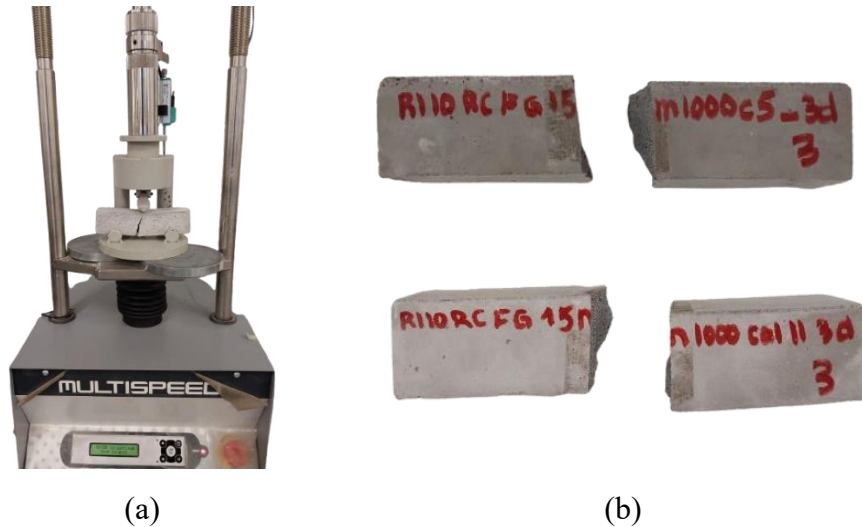


Figura 41. Ensayo de flexo-tracción. (a) Equipo electromecánico Multispeed; (b) Probetas post ensayo.

Tras la rotura por flexo-tracción, las probetas se dividen en dos mitades, las cuales son sometidas a un nuevo ensayo en la máquina MATEST modelo C088-11N. La Figura 42 muestra la ejecución del ensayo.



Figura 42. Ensayo de resistencia a la compresión. (a) Equipo MATEST modelo C088-11N; (b) Ejecución del ensayo.

8.11 Resultados de DRX

Este anexo presenta los difractogramas obtenidos mediante análisis de Difracción de Rayos X (DRX), correspondientes a las muestras de relave según la fracción seleccionada: relave completo, fracción fina o fracción gruesa. Las muestras fueron sometidas a distintos tratamientos, específicamente molienda durante 15 minutos y calcinación a temperaturas variables de 800, 925 y 1000°C.

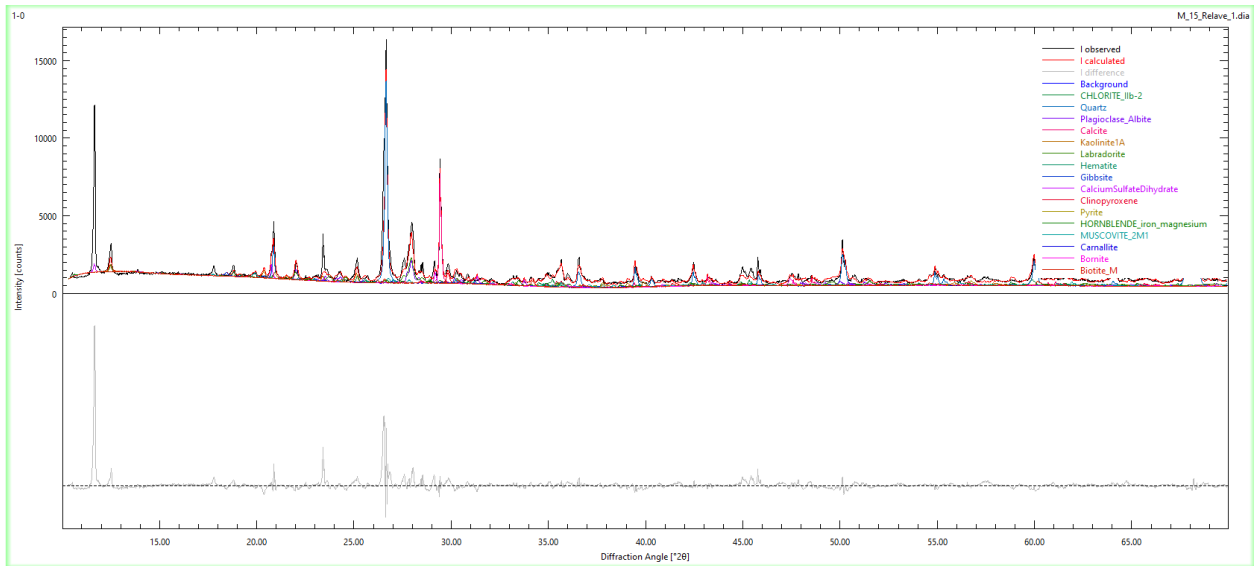


Figura 43. Difractograma DRX del relave sin tratamiento.

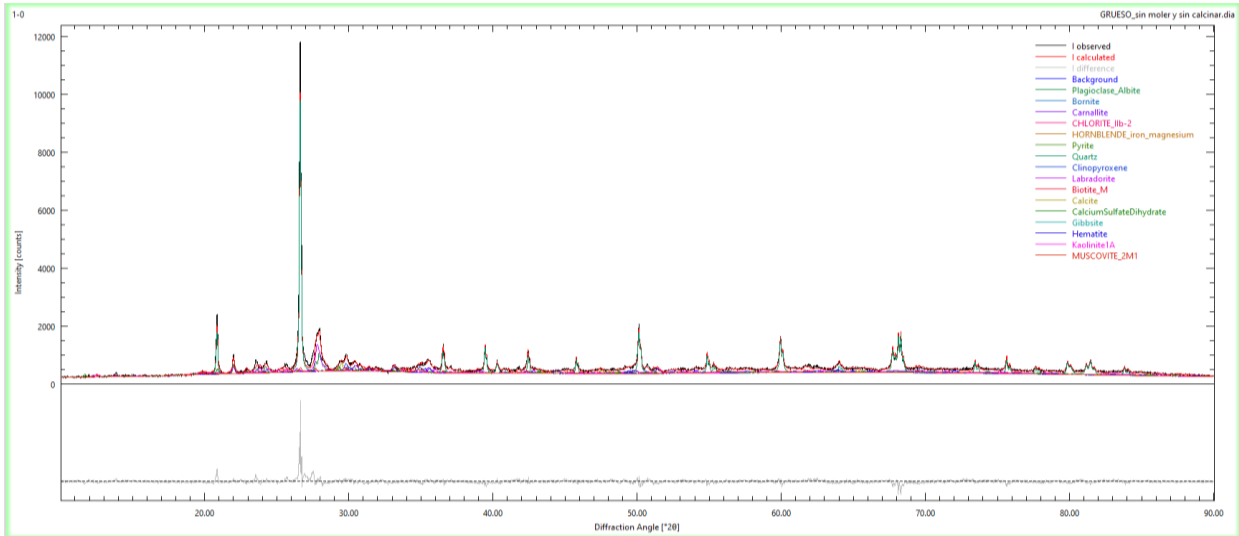


Figura 44. Difractograma DRX del relave grueso ($\geq 150 \mu\text{m}$), sin moler y sin calcinar.

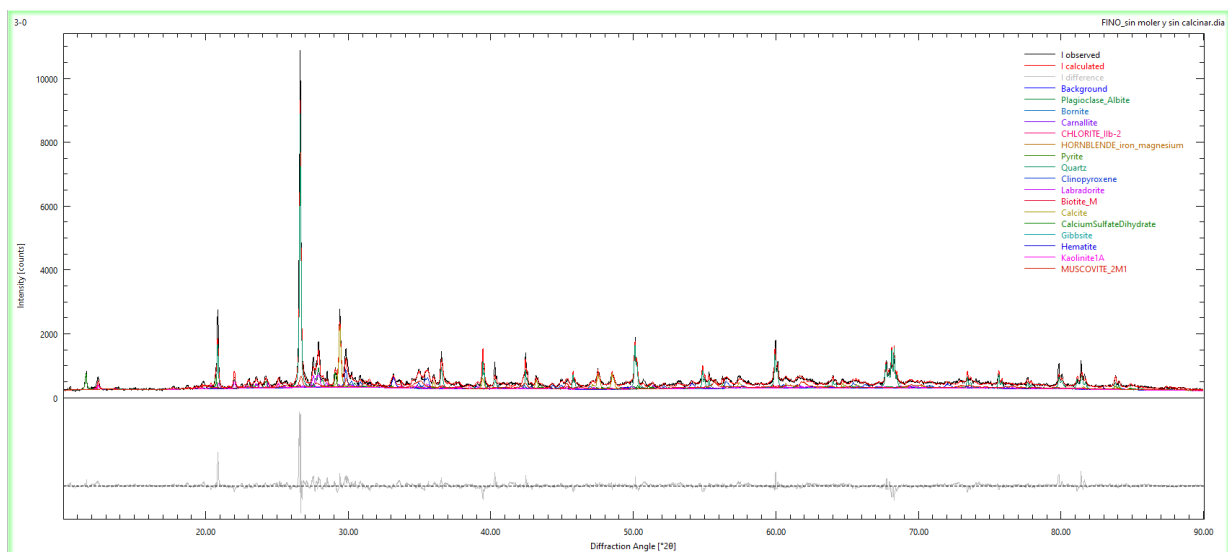


Figura 45. Difractograma DRX del relave fino ($< 150 \mu\text{m}$), sin moler y sin calcinar.

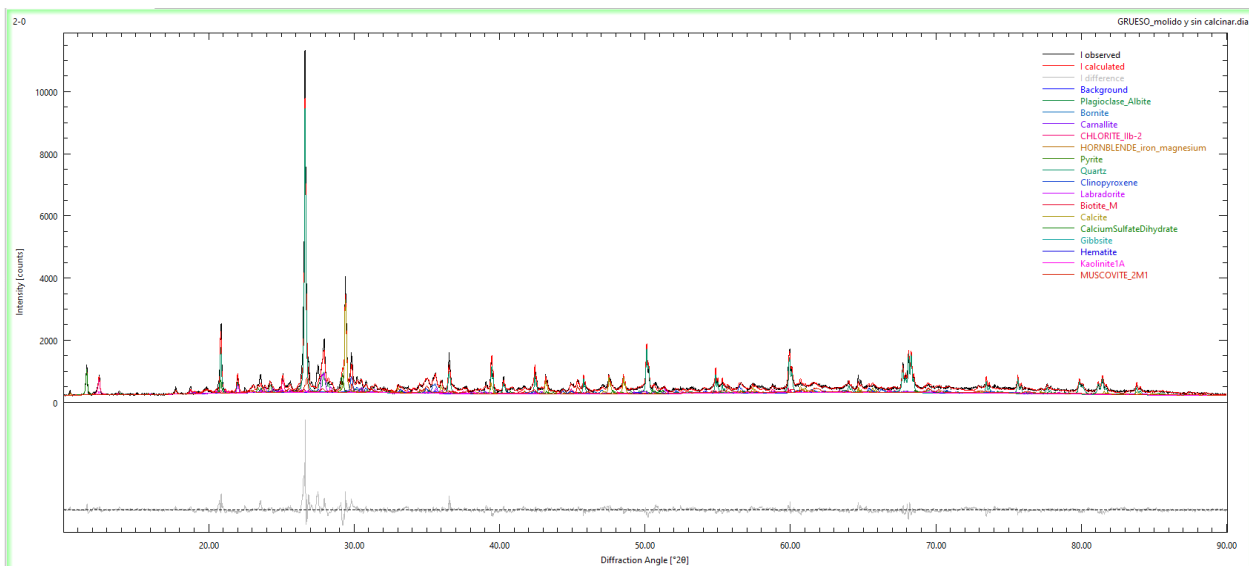


Figura 46. Difractograma DRX del relave grueso ($\geq 150 \mu\text{m}$), molido y sin calcinar.

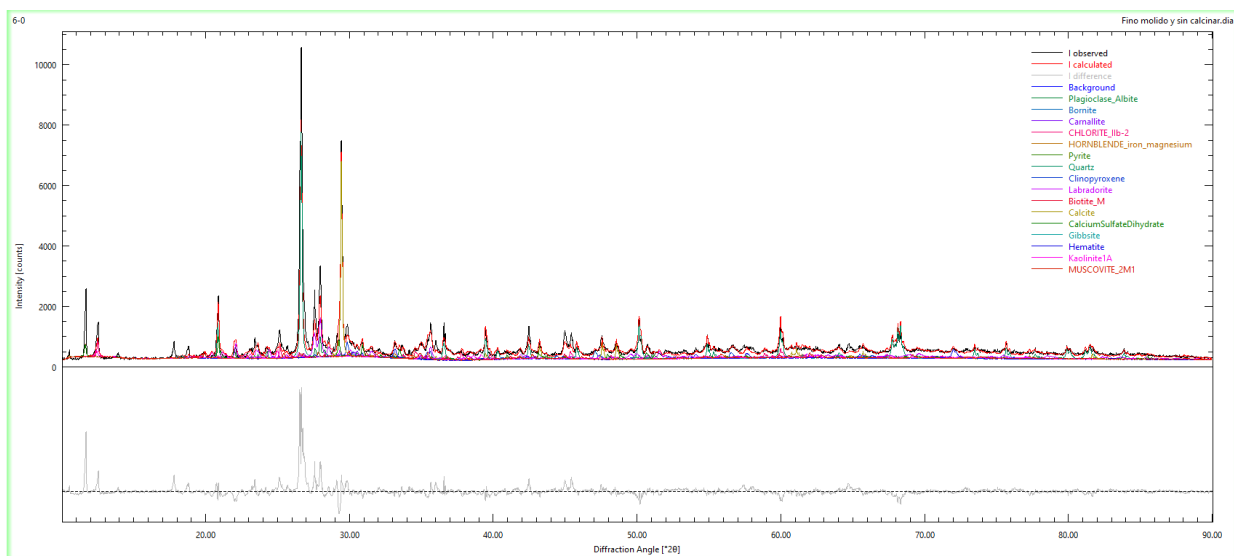


Figura 47. Difractograma DRX del relave fino ($< 150 \mu\text{m}$), molido y sin calcinar.

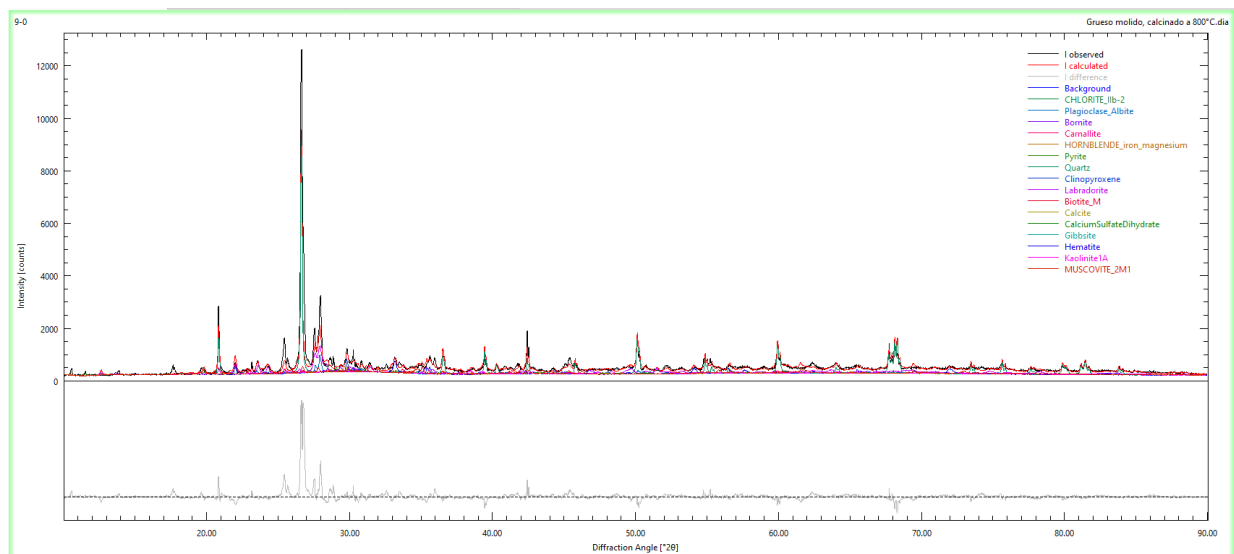


Figura 48. Difractograma DRX del relave grueso ($\geq 150 \mu\text{m}$), molido y calcinado a 800°C .

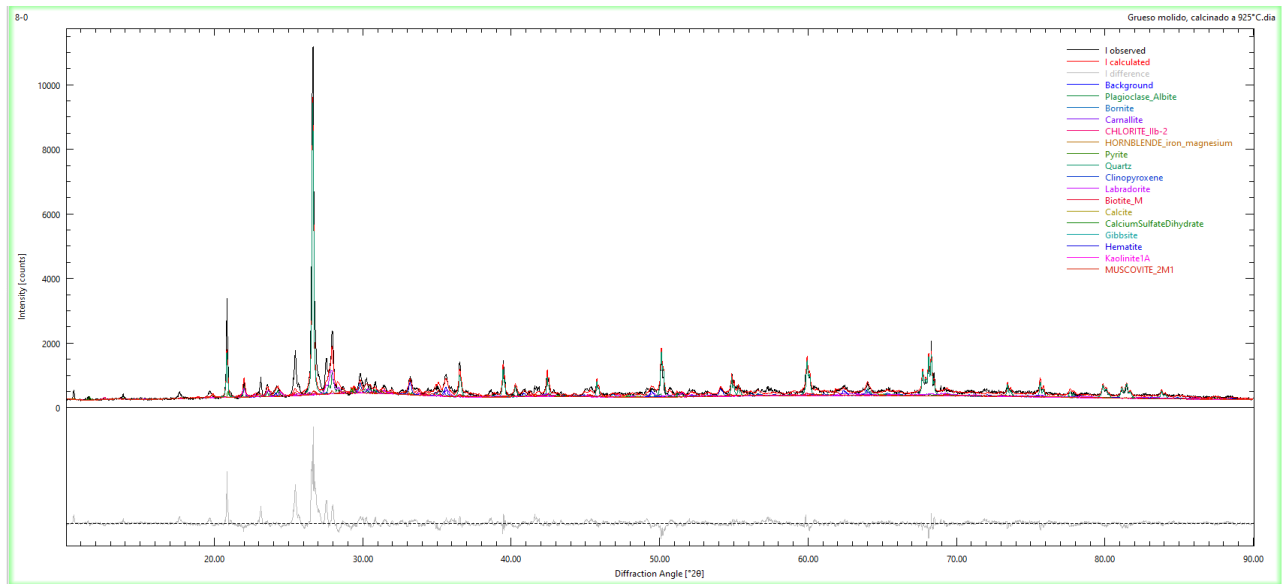


Figura 49. Difractograma DRX del relave grueso ($\geq 150 \mu\text{m}$), molido y calcinado a 925°C .

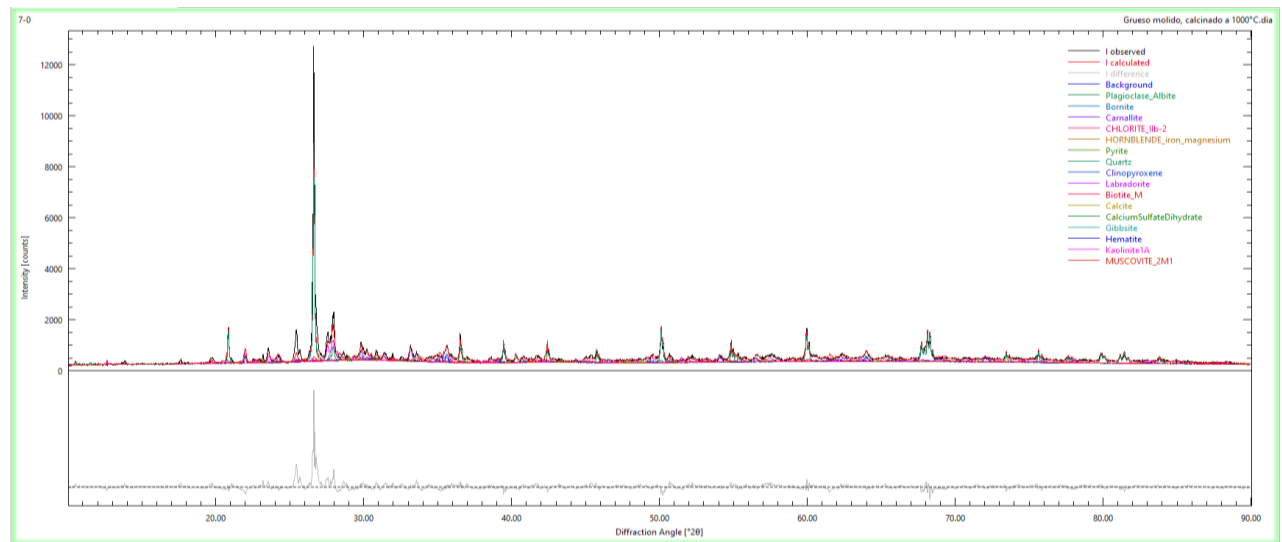


Figura 50. Difractograma DRX del relave grueso ($\geq 150 \mu\text{m}$), molido y calcinado a 1000°C .

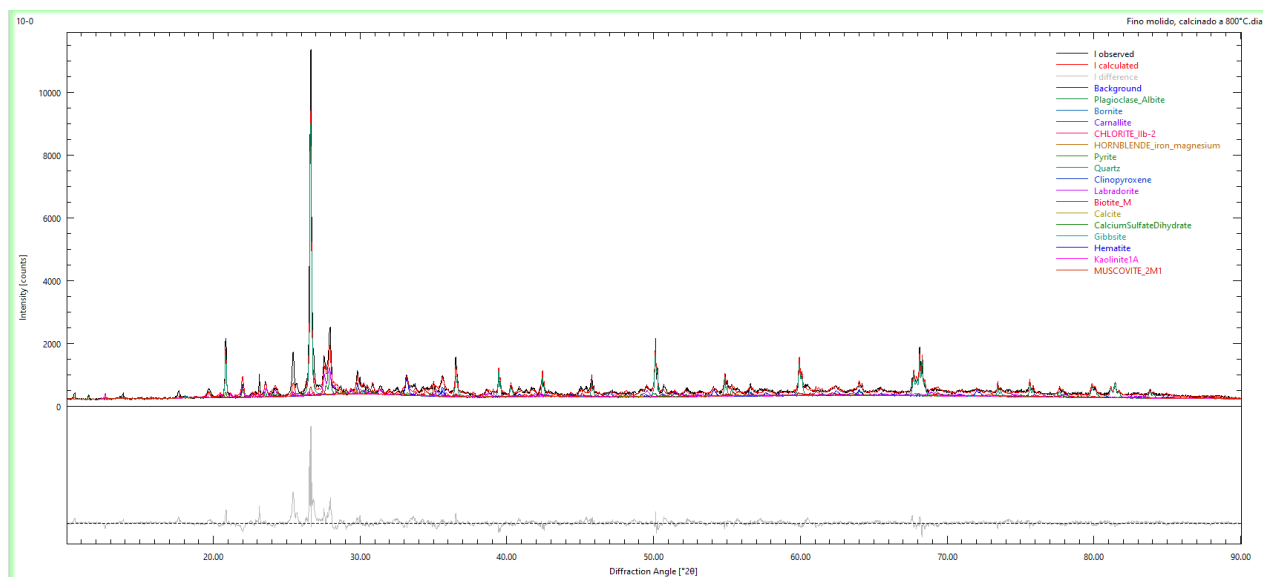


Figura 51. Difractograma DRX del relave fino (< 150 μm), molido y calcinado a 800°C.

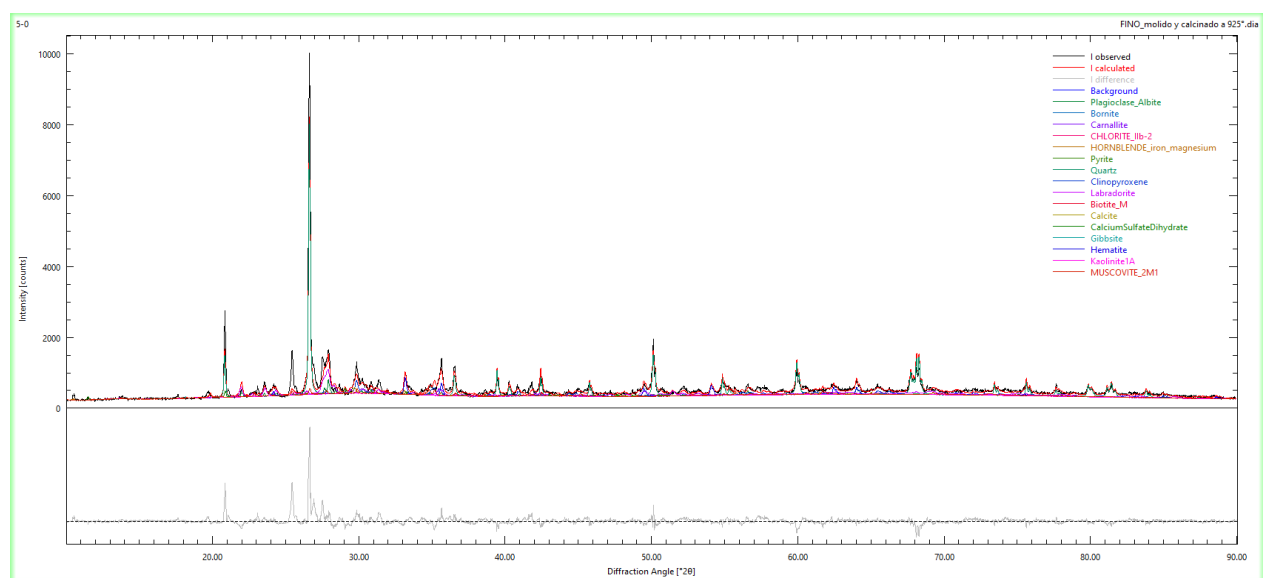


Figura 52. Difractograma DRX del relave fino (< 150 μm), molido y calcinado a 925°C.

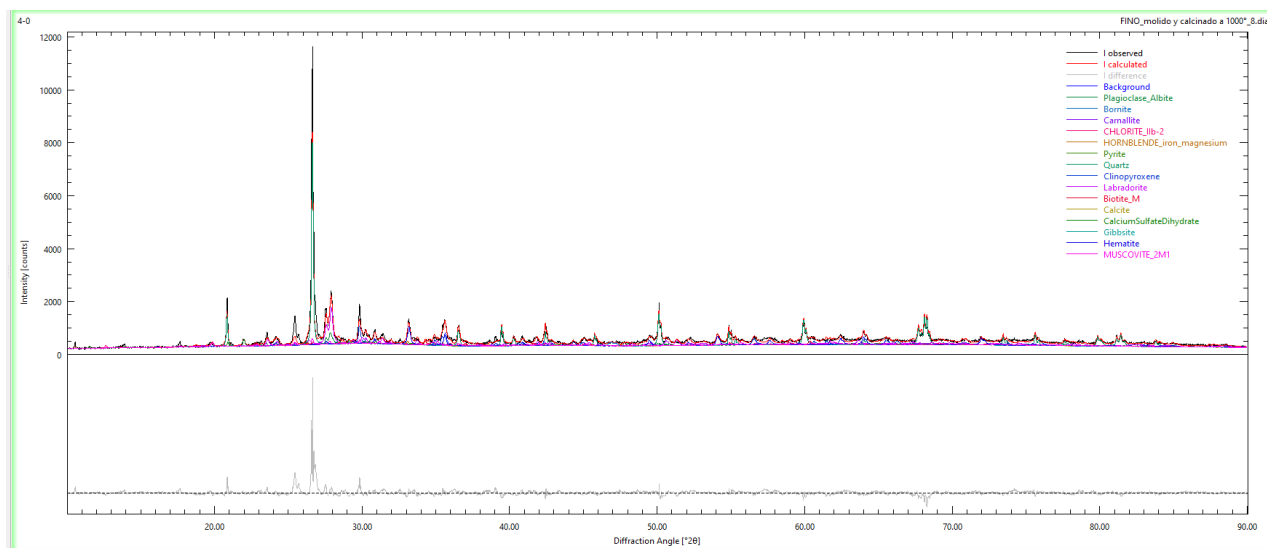


Figura 53. Difractograma DRX del relave fino (< 150 μm), molido y calcinado a 1000°C.

8.12 Preparación análisis químico

Para evaluar el efecto y la cinética de disolución durante la etapa de activación química, se elabora una solución alcalina al mezclar agua destilada con cal junto con el relave de cobre.

Una vez iniciada la reacción, se medirán cationes de interés como el Si, Al, Mg, Na y K mediante absorción atómica, con el fin de determinar la cantidad de elementos que pasan a disolución y que participarán en el proceso puzolánico posterior. Para ello, se realizará una asociación entre cada elemento y los minerales presentes en el relave, previamente identificados mediante difracción de rayos X (DRX).

El análisis se llevará a cabo sobre la fracción fina del relave ($<150\text{ }\mu\text{m}$), considerando tres condiciones: sin moler, molido durante 15 minutos y molido durante 15 minutos seguido de calcinación a 925°C . Las muestras se evaluarán en distintos tiempos de reacción: 6 h, 1 día, 3 días, 5 días y 7 días.

Se empleó una relación sólido-líquido de 1:4 en peso, utilizando 10 [g] de relave, 40 [ml] de agua destilada y 1 [g] de cal viva. Cada muestra se depositó en tubos de centrifuga de hasta 50 [ml] y se sometió a agitación en un agitador rotatorio durante los tiempos indicados. Tras la agitación, las preparaciones se centrifugaron a 4000 [r.p.m]. durante 11,5 minutos, permitiendo que el sólido sedimentara en el fondo y el sobrenadante quedara sobre él. Finalmente, el sobrenadante se filtró mediante un filtro de jeringa de $0,45\text{ }\mu\text{m}$, para su posterior análisis.

De manera análoga, se efectuó un segundo análisis químico con la misma preparación de muestras; no obstante, en esta etapa el objetivo fue evaluar si el comportamiento de los cationes obedecía a una disolución de tipo coloidal. Para ello, se tomaron 20 [ml] de muestra y se adicionaron 10 [ml] de ácido nítrico concentrado llevando la solución a una placa calefactora hasta concentrarla a 1-2 [ml]. Tras enfriar, se incorporaron 5 [ml] de ácido perclórico y 0,5 [ml] de fluoruro de hidrógeno, reanudando el calentamiento hasta la aparición de humos blancos característicos del ácido perclórico. Luego, se dejó enfriar, se filtró y se aforó en un matraz volumétrico de 25 [ml]. Finalmente, se realizó la determinación de cada elemento mediante absorción atómica.

Para elaborar las muestras que posteriormente serán analizadas, es necesario llevar a cabo una serie de etapas de preparación, las cuales son descritas a continuación:

- Selección de muestras: Se prepararon ocho muestras de relave; todas fueron activadas químicamente, salvo F15m925_SinCal, elaborada únicamente con relave y agua destilada (sin activación química). Las dosificaciones empleadas se detallan en la Tabla 19.

Tabla 19. Dosificación muestras de análisis químico.

Muestra	Relave [g]	Cal [g]	Agua destilada [ml]	Tiempo de agitación
F15m925-7d	10	1	40	7 días
F15m925-5d	10	1	40	5 días
F15m925-3d	10	1	40	3 días
F15m925-1d	10	1	40	1 día
Fmolido-1d	10	1	40	1 día
Fsinmoler-1d	10	1	40	1 día
F15m925_SinCal	10	0	40	1 día
F15m925-6h	10	1	40	6 horas

- Agitación: Las dosificaciones se prepararon en tubos de centrifuga y se sometieron a agitación durante los tiempos previamente definidos (véase Figura 54).



Figura 54. Muestras destinadas para análisis químico en periodo de agitación.

- Centrifugado: Finalizado el periodo de agitación, las muestras se centrifugaron en un equipo de laboratorio a 4000 [r.p.m] durante 11,5 [min], con el fin de separar la fase sólida de la líquida. En la Figura 55 se describe el proceso de centrifugado.

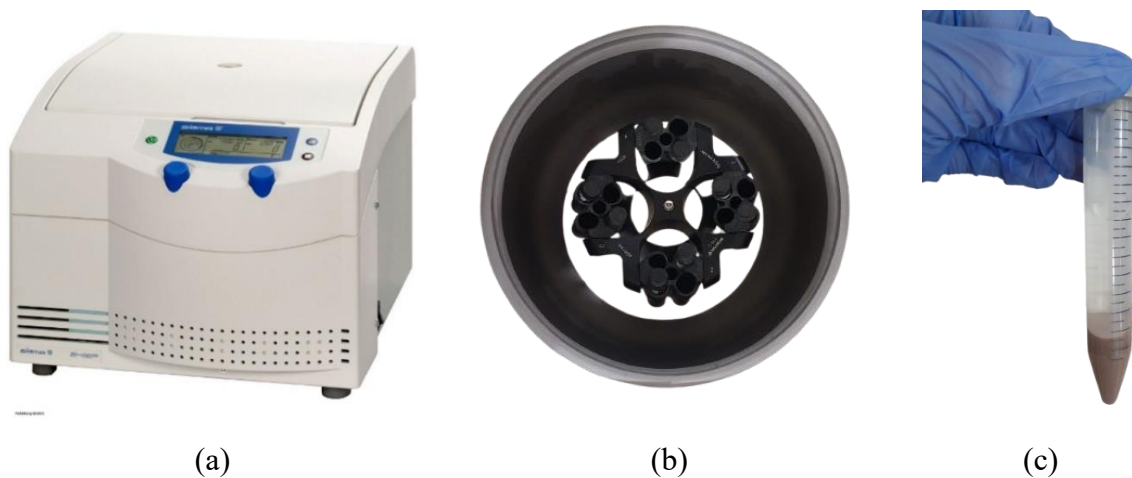


Figura 55. Proceso de centrifugado: (a) Centrifuga universal SIGMA 2-16P; (b) Distribución de los tubos de centrifuga; (c) Separación sólido-líquido.

- Extracción del sobrenadante: Concluido el centrifugado, el sobrenadante se recuperó mediante filtración con jeringa y se transfirió a tubos de centrifuga limpios. Las muestras se conservaron en refrigeración hasta su análisis químico. La Figura 56 ilustra el procedimiento.

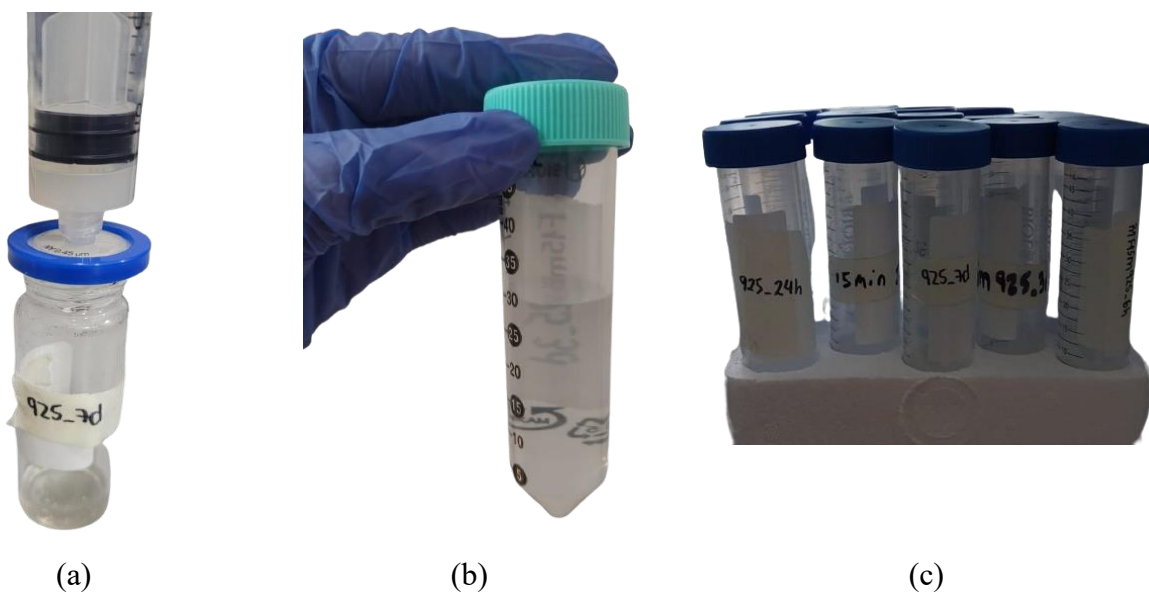


Figura 56. Proceso de extracción del sobrenadante: (a) Extracción; (b) Disposición del sobrenadante; (c) Refrigeración de las muestras.

8.13 Resultados análisis químico

Una vez preparadas las muestras, se procedió al análisis químico mediante la técnica de absorción atómica. Los resultados obtenidos en el primer análisis se presentan en la Tabla 20, mientras que el análisis complementario, mostrado en la Tabla 21, tuvo como objetivo determinar la presencia de una disolución de carácter parcial o coloidal.

Tabla 20. Resultados análisis químico inicial.

Muestra	Si [mg/L]	Al [mg/L]	Mg [mg/L]	K [mg/L]	Na [mg/L]
F-24H agua	<L.D	<L.D	<L.D	35,70	48,90
F15m925-5d	<L.D	<L.D	<L.D	69,60	98,90
F15m925-7d	<L.D	2,51	<L.D	86,60	168,60
Fmolido-1d	<L.D	<L.D	<L.D	47,00	265,70
F sin moler 1d	<L.D	<L.D	<L.D	70,60	360,40
F15m925-1d	<L.D	<L.D	<L.D	61,40	63,90
F15m925-6h	<L.D	<L.D	<L.D	74,90	40,60
F15m925-3d	<L.D	<L.D	<L.D	81,10	49,90

Tabla 21. Resultados análisis químico complementario.

Muestra	Si [mg/L]	Al [mg/L]	Mg [mg/L]	K [mg/L]	Na [mg/L]
F15m925-6h	<L.D	121,60	15,50	36,65	509,10
F sin moler-1d	<L.D	122,30	19,00	45,16	705,10
F15m925-24H	<L.D	174,80	20,90	35,10	641,90
Fmolido-1d	<L.D	105,20	18,50	45,91	680,40
F15m925-1d	<L.D	128,20	15,70	34,18	546,90
F15m925-3d	<L.D	114,30	22,90	48,08	681,80
F15m925-7d	<L.D	118,50	31,30	102,50	512,00
F15m925-5d	<L.D	125,00	27,60	83,09	532,10

8.14 Resultados medición de pH

El presente anexo registra los resultados de la medición de pH de la mezcla de relave activado, los cuales se detallan en la Tabla 22.

Tabla 22. Resultados medición de pH inicial y final.

Muestra	pH inicial	pH final
R1_10RC_F15m_800_cal10_1d	11,53	11,91
R1_10RC_F15m_800_cal10_3d	11,60	11,86
R1_10RC_F15m_800_cal10_7d	11,74	11,70
R1_10RC_F15m_800_cal20_1d	12,01	11,93
R1_10RC_F15m_800_cal20_3d	11,24	11,88
R1_10RC_F15m_800_cal20_7d	11,84	11,93
R1_10RC_F15m_925_cal10_1d	11,91	11,93
R1_10RC_F15m_925_cal10_3d	11,98	11,96
R1_10RC_F15m_925_cal10_7d	11,82	12,09
R1_10RC_F15m_925_cal20_1d	12,14	11,92
R1_10RC_F15m_925_cal20_3d	11,94	11,87
R1_10RC_F15m_925_cal20_7d	11,99	12,02
R1_10RC_F15m_1000_cal10_1d	12,28	12,08
R1_10RC_F15m_1000_cal10_3d	11,93	11,83
R1_10RC_F15m_1000_cal10_7d	12,23	11,91
R1_10RC_F15m_1000_cal20_1d	12,10	11,95
R1_10RC_F15m_1000_cal20_3d	12,07	11,94
R1_10RC_F15m_1000_cal20_7d	12,14	12,07
R1_10RC_FG15m_800_cal10_1d	11,78	12,13
R1_10RC_FG15m_800_cal10_3d	11,78	11,85
R1_10RC_FG15m_800_cal10_7d	12,10	12,15
R1_10RC_FG15m_800_cal20_1d	12,15	12,01
R1_10RC_FG15m_800_cal20_3d	12,00	12,03
R1_10RC_FG15m_800_cal20_7d	12,19	12,25
R1_10RC_FG15m_925_cal10_1d	11,64	12,17
R1_10RC_FG15m_925_cal10_3d	11,67	12,15
R1_10RC_FG15m_925_cal10_7d	11,77	12,01
R1_10RC_FG15m_925_cal20_1d	12,22	12,29
R1_10RC_FG15m_925_cal20_3d	12,19	12,03
R1_10RC_FG15m_925_cal20_7d	12,18	12,17
R1_10RC_FG15m_1000_cal10_1d	12,29	12,13
R1_10RC_FG15m_1000_cal10_3d	12,22	12,05

R1_10RC_FG15m_1000_cal10_7d	12,32	11,80
R1_10RC_FG15m_1000_cal20_1d	12,13	12,11
R1_10RC_FG15m_1000_cal20_3d	12,22	12,08
R1_10RC_FG15m_1000_cal20_7d	12,25	11,76
R1_10RC_F15m_cal10_1d	12,10	12,24
R1_10RC_F15m_cal10_3d	12,29	12,40
R1_10RC_F15m_cal10_7d	12,46	12,46
R1_10RC_FG15m_cal10_1d	12,08	12,36
R1_10RC_FG15m_cal10_3d	12,07	12,36
R1_10RC_FG15m_cal10_7d	11,92	12,28
R1_20RC_F15m_800_cal10_1d	12,12	12,20
R1_20RC_F15m_925_cal10_3d	12,22	12,26
R1_20RC_FG15m_925_cal10_3d	12,23	12,08
R1_10RC_FG15m_925_cal10_2d	12,16	12,32
R1_10RC_FG15m_925_cal10_5d	12,20	12,20
R1_10RC_F15m_940_cal10_1d	12,23	12,31
R1_10RC_F15m_940_cal10_2d	12,39	12,02
R1_10RC_F15m_940_cal10_3d	12,39	12,36
R1_10RC_F15m_940_cal10_5d	12,45	12,07
R1_10RC_F15m_940_cal10_7d	12,36	12,04

8.15 Resultados de los ensayos de trabajabilidad

Este anexo presenta los resultados numéricos del asentamiento registrado en el ensayo de trabajabilidad, conforme a la Norma ASTM C1437, los cuales se encuentran detallados en la Tabla 23.

Tabla 23. Resultados ensayos de trabajabilidad.

Muestra	Asentamiento [mm]
Control inicial	67
Ctrl_cal10	82,5
Ctrl_cal20	95
Control nuevo	115
R1_10RC_F15m_800_cal10_1d	83,5
R1_10RC_F15m_800_cal10_3d	30
R1_10RC_F15m_800_cal10_7d	40
R1_10RC_F15m_800_cal20_1d	82,5
R1_10RC_F15m_800_cal20_3d	35
R1_10RC_F15m_800_cal20_7d	70
R1_10RC_F15m_925_cal10_1d	67,5
R1_10RC_F15m_925_cal10_3d	75
R1_10RC_F15m_925_cal10_7d	77
R1_10RC_F15m_925_cal20_1d	75
R1_10RC_F15m_925_cal20_3d	85
R1_10RC_F15m_925_cal20_7d	80
R1_10RC_F15m_1000_cal10_1d	115
R1_10RC_F15m_1000_cal10_3d	120
R1_10RC_F15m_1000_cal10_7d	115
R1_10RC_F15m_1000_cal20_1d	100
R1_10RC_F15m_1000_cal20_3d	120
R1_10RC_F15m_1000_cal20_7d	105
R1_10RC_FG15m_800_cal10_1d	74
R1_10RC_FG15m_800_cal10_3d	48
R1_10RC_FG15m_800_cal10_7d	90
R1_10RC_FG15m_800_cal20_1d	84
R1_10RC_FG15m_800_cal20_3d	63
R1_10RC_FG15m_800_cal20_7d	100
R1_10RC_FG15m_925_cal10_1d	105
R1_10RC_FG15m_925_cal10_3d	105
R1_10RC_FG15m_925_cal10_7d	100

R1_10RC_FG15m_925_cal20_1d	105
R1_10RC_FG15m_925_cal20_3d	104
R1_10RC_FG15m_925_cal20_7d	118
R1_10RC_FG15m_1000_cal10_1d	110
R1_10RC_FG15m_1000_cal10_3d	123
R1_10RC_FG15m_1000_cal10_7d	110
R1_10RC_FG15m_1000_cal20_1d	100
R1_10RC_FG15m_1000_cal20_3d	112
R1_10RC_FG15m_1000_cal20_7d	115
R1_10RC_F15m_cal10_1d	100
R1_10RC_F15m_cal10_3d	105
R1_10RC_F15m_cal10_7d	90
R1_10RC_FG15m_cal10_1d	100
R1_10RC_FG15m_cal10_3d	95
R1_10RC_FG15m_cal10_7d	97
R1_20RC_F15m_800_cal10_1d	80
R1_20RC_F15m_925_cal10_3d	95
R1_20RC_FG15m_925_cal10_3d	80
R1_10RC_FG15m_925_cal10_2d	90
R1_10RC_FG15m_925_cal10_5d	90
R1_10RC_F15m_940_cal10_1d	104
R1_10RC_F15m_940_cal10_2d	100
R1_10RC_F15m_940_cal10_3d	98
R1_10RC_F15m_940_cal10_5d	107
R1_10RC_F15m_940_cal10_7d	100

8.16 Resultados resistencia a la flexo-tracción

El presente anexo detalla los resultados numéricos obtenidos tras la ejecución de los ensayos de flexo-tracción en cada una de las muestras. Los registros correspondientes a los períodos de curado por inmersión de 28, 56 y 84 días se presentan en la Tabla 24 adjunta.

Tabla 24. Resultados resistencia a la flexo-tracción.

Muestra	Esfuerzo [MPa]		
	28 días de curado	56 días de curado	84 días de curado
Control	11,1047		
ctrl_cal10	6,6891		
ctrl_cal20	5,9249		
R1_10RC_F15m_800_cal10_1d	10,1787	6,5897	5,8061
R1_10RC_F15m_800_cal10_3d	7,3437	6,7472	5,8333
R1_10RC_F15m_800_cal10_7d	7,5402	5,8984	6,1281
R1_10RC_F15m_800_cal20_1d	9,7976	6,6110	5,4936
R1_10RC_F15m_800_cal20_3d	6,1766	6,0582	4,0282
R1_10RC_F15m_800_cal20_7d	-	5,6250	6,4110
R1_10RC_F15m_925_cal10_1d	8,2386	11,7779	6,5862
R1_10RC_F15m_925_cal10_3d	9,3194	5,3172	10,1089
R1_10RC_F15m_925_cal10_7d	6,1518	10,9339	7,7498
R1_10RC_F15m_925_cal20_1d	7,8740	13,4493	5,9399
R1_10RC_F15m_925_cal20_3d	8,7713	5,8239	8,0078
R1_10RC_F15m_925_cal20_7d	7,6728	9,3478	11,3127
R1_10RC_F15m_1000_cal10_1d	5,1929	5,6108	6,8738
R1_10RC_F15m_1000_cal10_3d	4,2661	3,1025	5,1787
R1_10RC_F15m_1000_cal10_7d	4,6567	5,2344	5,0343
R1_10RC_F15m_1000_cal20_1d	6,1376	4,0234	5,8984
R1_10RC_F15m_1000_cal20_3d	5,3338	4,7798	7,3520
R1_10RC_F15m_1000_cal20_7d	6,7424	5,2569	7,1662
R1_10RC_FG15m_800_cal10_1d	6,0937	8,2339	7,8220
R1_10RC_FG15m_800_cal10_3d	4,1418	10,0793	7,1106
R1_10RC_FG15m_800_cal10_7d	5,4794	5,9197	9,9941
R1_10RC_FG15m_800_cal20_1d	5,2912	8,0469	6,5791
R1_10RC_FG15m_800_cal20_3d	3,9441	7,3071	4,4389
R1_10RC_FG15m_800_cal20_7d	-	5,0320	12,1899
R1_10RC_FG15m_925_cal10_1d	5,9339	7,2100	7,5556
R1_10RC_FG15m_925_cal10_3d	14,1181	6,8549	9,0495
R1_10RC_FG15m_925_cal10_7d	6,7365	3,5701	7,1425
R1_10RC_FG15m_925_cal20_1d	6,9981	7,1674	6,2725
R1_10RC_FG15m_925_cal20_3d	12,5627	5,9493	10,5007
R1_10RC_FG15m_925_cal20_7d	4,6591	4,7372	7,8634

R1_10RC_FG15m_1000_cal10_1d	5,6877	5,0876	5,2652
R1_10RC_FG15m_1000_cal10_3d	5,2154	4,6792	4,3714
R1_10RC_FG15m_1000_cal10_7d	5,7363	5,2486	6,3814
R1_10RC_FG15m_1000_cal20_1d	6,7294	5,7955	9,8449
R1_10RC_FG15m_1000_cal20_3d	5,2012	5,5102	3,3073
R1_10RC_FG15m_1000_cal20_7d	5,2012	5,7860	3,7216
Control nuevo	7,9214	5,1065	7,5225
R1_10RC_F15m_cal10_1d	6,8963	7,0110	9,1856
R1_10RC_F15m_cal10_3d	8,1877	7,8066	8,0054
R1_10RC_F15m_cal10_7d	3,9429	8,5440	5,2853
R1_10RC_FG15m_cal10_1d	11,0322	7,1307	10,8748
R1_10RC_FG15m_cal10_3d	7,6563	8,8400	9,3655
R1_10RC_FG15m_cal10_7d	5,0994	8,1783	4,9195
R1_20RC_F15m_800_cal10_1d	5,9588	11,1636	7,2041
R1_20RC_F15m_925_cal10_3d	6,5151	5,8298	7,5627
R1_20RC_FG15m_925_cal10_3d	7,8030	5,9316	7,6787
R1_10RC_FG15m_925_cal10_2d	4,2850	6,3838	6,9567
R1_10RC_FG15m_925_cal10_5d	9,0447	14,1110	9,8509
R1_10RC_F15m_940_cal10_1d	5,2498	8,8684	9,8745
R1_10RC_F15m_940_cal10_2d	4,9254	10,4072	6,1139
R1_10RC_F15m_940_cal10_3d	3,8151	3,8625	5,5682
R1_10RC_F15m_940_cal10_5d	8,4624	4,6911	8,1061
R1_10RC_F15m_940_cal10_7d	7,1709	8,6293	6,9555

8.17 Resultados resistencia a la compresión

El presente anexo presenta los resultados obtenidos de los ensayos de compresión realizados en las muestras. Los valores registrados tras los períodos de curado por inmersión de 28, 56 y 84 días están detallados en la Tabla 25 adjunta.

Tabla 25. Resultados resistencia a la compresión.

Muestra	Resistencia a la compresión [MPa]		
	28 días de curado	56 días de curado	84 días de curado
Control	22,3939		
ctrl_cal10	18,2733		
ctrl_cal20	21,0803		
R1_10RC_F15m_800_cal10_1d	23,6625	24,3823	23,3745
R1_10RC_F15m_800_cal10_3d	17,9943	15,4753	18,0483
R1_10RC_F15m_800_cal10_7d	21,9348	17,9223	21,5930
R1_10RC_F15m_800_cal20_1d	22,6190	23,8423	23,5545
R1_10RC_F15m_800_cal20_3d	14,2955	15,7270	16,3208
R1_10RC_F15m_800_cal20_7d	19,1818	21,8450	22,4390
R1_10RC_F15m_925_cal10_1d	20,2075	26,1458	25,8398
R1_10RC_F15m_925_cal10_3d	17,9673	17,7783	27,7290
R1_10RC_F15m_925_cal10_7d	20,6573	22,2050	22,9605
R1_10RC_F15m_925_cal20_1d	18,6960	22,8528	21,3593
R1_10RC_F15m_925_cal20_3d	20,0095	16,0690	22,2948
R1_10RC_F15m_925_cal20_7d	18,4800	21,4493	23,1945
R1_10RC_F15m_1000_cal10_1d	19,1100	25,7498	24,1303
R1_10RC_F15m_1000_cal10_3d	18,0663	23,5725	22,9788
R1_10RC_F15m_1000_cal10_7d	18,6960	20,9453	21,9170
R1_10RC_F15m_1000_cal20_1d	22,4208	28,8808	25,0300
R1_10RC_F15m_1000_cal20_3d	19,7938	23,5183	24,0765
R1_10RC_F15m_1000_cal20_7d	21,0533	25,4440	24,0403
R1_10RC_FG15m_800_cal10_1d	20,6035	21,2333	19,7398
R1_10RC_FG15m_800_cal10_3d	13,9095	23,7525	16,6988
R1_10RC_FG15m_800_cal10_7d	18,3903	20,4955	28,6830
R1_10RC_FG15m_800_cal20_1d	17,7963	19,2540	21,4853
R1_10RC_FG15m_800_cal20_3d	12,2540	22,5468	15,8170
R1_10RC_FG15m_800_cal20_7d	19,9220	18,9118	24,3820
R1_10RC_FG15m_925_cal10_1d	21,1793	25,6058	25,3898
R1_10RC_FG15m_925_cal10_3d	26,3795	25,8398	28,4670
R1_10RC_FG15m_925_cal10_7d	19,0918	22,4390	23,5363
R1_10RC_FG15m_925_cal20_1d	21,0535	20,9995	23,6983
R1_10RC_FG15m_925_cal20_3d	24,8680	26,3438	26,6495
R1_10RC_FG15m_925_cal20_7d	19,5418	24,2383	23,2665

R1_10RC_FG15m_1000_cal10_1d	19,0020	27,7110	24,4543
R1_10RC_FG15m_1000_cal10_3d	18,0120	22,6368	21,1973
R1_10RC_FG15m_1000_cal10_7d	18,9120	23,1048	20,028
R1_10RC_FG15m_1000_cal20_1d	21,3413	29,1148	27,4233
R1_10RC_FG15m_1000_cal20_3d	15,2050	19,6495	19,5598
R1_10RC_FG15m_1000_cal20_7d	20,6753	24,2743	23,2125
Control nuevo	28,3230	29,5645	32,1198
R1_10RC_F15m_cal10_1d	31,4000	27,8190	27,2613
R1_10RC_F15m_cal10_3d	30,1043	23,2305	23,3925
R1_10RC_F15m_cal10_7d	27,6573	23,1585	26,7215
R1_10RC_FG15m_cal10_1d	32,8035	30,9680	31,8678
R1_10RC_FG15m_cal10_3d	27,8010	26,5955	27,6570
R1_10RC_FG15m_cal10_7d	24,7420	23,9683	28,2150
R1_20RC_F15m_800_cal10_1d	24,4543	28,2690	28,7368
R1_20RC_F15m_925_cal10_3d	24,9580	26,2718	28,1970
R1_20RC_FG15m_925_cal10_3d	21,7730	23,1588	23,5365
R1_10RC_FG15m_925_cal10_2d	24,3643	25,5338	26,4515
R1_10RC_FG15m_925_cal10_5d	30,0505	29,6905	31,4000
R1_10RC_F15m_940_cal10_1d	23,4465	24,5983	28,6108
R1_10RC_F15m_940_cal10_2d	26,0558	27,1895	29,9785
R1_10RC_F15m_940_cal10_3d	29,5285	25,1740	27,4233
R1_10RC_F15m_940_cal10_5d	23,6983	29,2948	28,1250
R1_10RC_F15m_940_cal10_7d	22,9425	19,9738	22,1690

8.18 Resultados densidad de las probetas

Se describen a continuación en las Tablas 26, 27 y 28 los datos utilizados para la obtención de la densidad de las muestras.

Tabla 26. Cálculo de la densidad de las probetas con 28 días de curado.

Muestra	Volumen [cm³]	Masa en seco [g]	Densidad [g/cm³]
R1_10RC_F15m_800_cal5_1d	256,34	463,17	1,81
R1_10RC_F15m_800_cal5_3d	258,80	467,07	1,80
R1_10RC_F15m_800_cal5_7d	255,04	479,67	1,88
R1_10RC_F15m_800_cal11_1d	257,93	469,81	1,82
R1_10RC_F15m_800_cal11_3d	259,23	467,36	1,80
R1_10RC_F15m_800_cal11_7d	258,27	483,57	1,87
R1_10RC_F15m_925_cal5_1d	259,96	497,80	1,91
R1_10RC_F15m_925_cal5_3d	261,69	487,90	1,86
R1_10RC_F15m_925_cal5_7d	253,72	482,09	1,90
R1_10RC_F15m_925_cal11_1d	258,28	477,76	1,85
R1_10RC_F15m_925_cal11_3d	259,48	472,65	1,82
R1_10RC_F15m_925_cal11_7d	263,00	497,32	1,89
R1_10RC_F15m_1000_cal5_1d	258,81	497,50	1,92
R1_10RC_F15m_1000_cal5_3d	256,12	500,20	1,95
R1_10RC_F15m_1000_cal5_7d	252,17	504,93	2,00
R1_10RC_F15m_1000_cal11_1d	251,03	520,44	2,07
R1_10RC_F15m_1000_cal11_3d	263,34	509,41	1,93
R1_10RC_F15m_1000_cal11_7d	259,20	516,80	1,99
R1_10RC_FG15m_800_cal5_1d	261,01	499,54	1,91
R1_10RC_FG15m_800_cal5_3d	261,01	507,16	1,94
R1_10RC_FG15m_800_cal5_7d	258,16	481,21	1,86
R1_10RC_FG15m_800_cal11_1d	257,78	491,61	1,91
R1_10RC_FG15m_800_cal11_3d	250,68	486,52	1,94
R1_10RC_FG15m_800_cal11_7d	255,95	519,78	2,03
R1_10RC_FG15m_925_cal5_1d	255,83	508,41	1,99
R1_10RC_FG15m_925_cal5_3d	252,12	479,28	1,90
R1_10RC_FG15m_925_cal5_7d	251,67	498,32	1,98
R1_10RC_FG15m_925_cal11_1d	270,80	521,73	1,93
R1_10RC_FG15m_925_cal11_3d	259,69	487,96	1,88
R1_10RC_FG15m_925_cal11_7d	255,44	508,43	1,99
R1_10RC_FG15m_1000_cal5_1d	258,87	526,95	2,04
R1_10RC_FG15m_1000_cal5_3d	263,67	502,10	1,90
R1_10RC_FG15m_1000_cal5_7d	263,62	527,17	2,00
R1_10RC_FG15m_1000_cal11_1d	262,70	524,86	2,00
R1_10RC_FG15m_1000_cal11_3d	260,31	507,70	1,95

R1_10RC_FG15m_1000_cal11_7d	257,11	514,58	2,00
-----------------------------	--------	--------	------

Tabla 27. Cálculo de la densidad de las probetas con 56 días de curado.

Muestra	Volumen [cm³]	Masa en seco [g]	Densidad [g/cm³]
R1_10RC_F15m_800_cal5_1d	249,78	516,99	2,07
R1_10RC_F15m_800_cal5_3d	267,75	526,73	1,97
R1_10RC_F15m_800_cal5_7d	259,96	518,41	1,99
R1_10RC_F15m_800_cal11_1d	256,20	533,98	2,08
R1_10RC_F15m_800_cal11_3d	262,93	517,78	1,97
R1_10RC_F15m_800_cal11_7d	258,51	515,80	2,00
R1_10RC_F15m_925_cal5_1d	251,10	468,35	1,87
R1_10RC_F15m_925_cal5_3d	260,17	533,74	2,05
R1_10RC_F15m_925_cal5_7d	253,32	487,07	1,92
R1_10RC_F15m_925_cal11_1d	259,85	477,30	1,84
R1_10RC_F15m_925_cal11_3d	257,96	515,71	2,00
R1_10RC_F15m_925_cal11_7d	259,21	486,76	1,88
R1_10RC_F15m_1000_cal5_1d	257,68	493,40	1,91
R1_10RC_F15m_1000_cal5_3d	257,44	485,70	1,89
R1_10RC_F15m_1000_cal5_7d	257,64	488,88	1,90
R1_10RC_F15m_1000_cal11_1d	252,19	496,85	1,97
R1_10RC_F15m_1000_cal11_3d	260,24	491,11	1,89
R1_10RC_F15m_1000_cal11_7d	257,40	494,19	1,92
R1_10RC_FG15m_800_cal5_1d	259,96	480,40	1,85
R1_10RC_FG15m_800_cal5_3d	248,57	455,31	1,83
R1_10RC_FG15m_800_cal5_7d	257,46	517,19	2,01
R1_10RC_FG15m_800_cal11_1d	253,50	474,97	1,87
R1_10RC_FG15m_800_cal11_3d	256,91	460,63	1,79
R1_10RC_FG15m_800_cal11_7d	257,05	513,23	2,00
R1_10RC_FG15m_925_cal5_1d	252,47	488,84	1,94
R1_10RC_FG15m_925_cal5_3d	248,43	493,05	1,98
R1_10RC_FG15m_925_cal5_7d	250,34	475,94	1,90
R1_10RC_FG15m_925_cal11_1d	252,76	482,63	1,91
R1_10RC_FG15m_925_cal11_3d	258,63	499,95	1,93
R1_10RC_FG15m_925_cal11_7d	258,30	492,46	1,91
R1_10RC_FG15m_1000_cal5_1d	257,45	500,63	1,94
R1_10RC_FG15m_1000_cal5_3d	256,24	489,00	1,91
R1_10RC_FG15m_1000_cal5_7d	246,04	469,40	1,91
R1_10RC_FG15m_1000_cal11_1d	264,19	515,30	1,95
R1_10RC_FG15m_1000_cal11_3d	265,88	491,06	1,85
R1_10RC_FG15m_1000_cal11_7d	259,38	497,05	1,92

Tabla 28. Cálculo de la densidad de las probetas con 84 días de curado.

Muestra	Volumen [cm³]	Masa en seco [g]	Densidad [g/cm³]
R1_10RC_F15m_800_cal5_1d	246,00	468,73	1,91
R1_10RC_F15m_800_cal5_3d	262,05	488,89	1,87
R1_10RC_F15m_800_cal5_7d	260,09	508,12	1,95
R1_10RC_F15m_800_cal11_1d	259,67	493,76	1,90
R1_10RC_F15m_800_cal11_3d	260,98	476,18	1,82
R1_10RC_F15m_800_cal11_7d	260,36	513,95	1,97
R1_10RC_F15m_925_cal5_1d	263,53	529,39	2,01
R1_10RC_F15m_925_cal5_3d	258,93	497,86	1,92
R1_10RC_F15m_925_cal5_7d	251,00	480,88	1,92
R1_10RC_F15m_925_cal11_1d	265,30	529,80	2,00
R1_10RC_F15m_925_cal11_3d	258,30	477,86	1,85
R1_10RC_F15m_925_cal11_7d	257,56	487,11	1,89
R1_10RC_F15m_1000_cal5_1d	257,18	499,50	1,94
R1_10RC_F15m_1000_cal5_3d	257,08	495,55	1,93
R1_10RC_F15m_1000_cal5_7d	249,07	511,55	2,05
R1_10RC_F15m_1000_cal11_1d	251,25	496,21	1,97
R1_10RC_F15m_1000_cal11_3d	246,77	470,76	1,91
R1_10RC_F15m_1000_cal11_7d	258,55	535,16	2,07
R1_10RC_FG15m_800_cal5_1d	261,98	487,00	1,86
R1_10RC_FG15m_800_cal5_3d	257,72	517,23	2,01
R1_10RC_FG15m_800_cal5_7d	241,64	456,72	1,89
R1_10RC_FG15m_800_cal11_1d	258,97	484,74	1,87
R1_10RC_FG15m_800_cal11_3d	255,55	505,29	1,98
R1_10RC_FG15m_800_cal11_7d	265,61	492,14	1,85
R1_10RC_FG15m_925_cal5_1d	249,13	481,00	1,93
R1_10RC_FG15m_925_cal5_3d	255,54	492,46	1,93
R1_10RC_FG15m_925_cal5_7d	244,04	509,47	2,09
R1_10RC_FG15m_925_cal11_1d	256,75	499,26	1,94
R1_10RC_FG15m_925_cal11_3d	262,97	497,12	1,89
R1_10RC_FG15m_925_cal11_7d	261,54	540,55	2,07
R1_10RC_FG15m_1000_cal5_1d	258,14	500,70	1,94
R1_10RC_FG15m_1000_cal5_3d	260,41	492,46	1,89
R1_10RC_FG15m_1000_cal5_7d	258,70	525,33	2,03
R1_10RC_FG15m_1000_cal11_1d	259,37	500,22	1,93
R1_10RC_FG15m_1000_cal11_3d	251,60	484,27	1,92
R1_10RC_FG15m_1000_cal11_7d	253,94	520,68	2,05

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

Título: "Efecto de la activación mecánica, térmica y química de relaves mineros como reemplazo del cemento en morteros"		
Nombre Memorista: Cristel Maryory González Vergara		
Modalidad	Proyecto	Profesor (es) Patrocinante (s)
Concepto	EXCELENTE	 Prof. Roberto Gómez Espina
Calificación	7.0	
Fecha	04-12-2025	
 Prof. Ramón Díaz N.		Ingeniero Supervisor:
		Institución:
Comisión (Nombre y Firma)		
 Prof. René Gómez Puigpinos		
Resumen		
La utilización de relaves mineros como reemplazo parcial del cemento en morteros ha ganado relevancia como una estrategia para mitigar los impactos ambientales asociados a los pasivos mineros. Estos residuos, que suelen acumularse en depósitos en superficie sin un propósito definido ni una gestión adecuada, representan un desafío ambiental significativo. En este contexto, ofrecer un nuevo uso para los relaves resalta la necesidad de implementar soluciones que favorezcan la utilización sostenible de recursos, contribuyendo así a la creación de aplicaciones prácticas para este residuo y su aprovechamiento eficaz. Este estudio tuvo como objetivo evaluar la viabilidad de utilizar relaves de pórfido cuprífero activados como reemplazo parcial del cemento en la fabricación de morteros. Para ello, se elaboraron distintas dosificaciones que combinaron molienda y activación térmica a tres temperaturas: 800, 925 y 1000°C, junto con una activación química. Tras la aplicación de los tratamientos, se analizaron los relaves mediante técnicas de análisis granulométrico, mineralógico y químico. Posteriormente, se evaluaron diversas propiedades de las mezclas de mortero, como la trabajabilidad, la densidad de las probetas y las resistencias a la flexo-tracción y compresión, con el fin de determinar el comportamiento mecánico de los morteros. Los resultados obtenidos indicaron que el reemplazo de cemento por relave mejoró significativamente las propiedades mecánicas de los morteros, especialmente en las muestras activadas exclusivamente mediante tratamiento mecánico y químico. En particular, las fracciones gruesas de relave, sometidas a una molienda de 15 minutos que solo incluyó partículas mayores a 150 micrones y mezcladas en partes iguales con el fino sin moler, mostraron un desempeño superior en términos de resistencia a la flexo-tracción y compresión. Se concluye que la incorporación de relaves activados en la fabricación de morteros representa una alternativa viable para la reutilización de residuos mineros, con implicancias significativas para la sostenibilidad ambiental en la		

industria de la construcción, al tiempo que ofrece un medio para reducir la huella ecológica del cemento tradicional.