



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA**



**Evaluación de relaves ricos en Fe tratados térmica y
mecánicamente para su uso en morteros**

POR

Francisca Valentina Carmona Opazo

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

Profesor Guía:

Roberto Gómez Espina

Profesor Co-Guía:

René Gómez Puigpinos

Diciembre 2025
Concepción (Chile)

Agradecimientos

A mi madre y mi hermana, por ser mi soporte más firme y amoroso en cada etapa de mi vida. A mi abuela y a mis tíos, cuyo apoyo incondicional y cariño constante me han acompañado siempre. A mis mejores amigos Antonia, Rodrigo y Sebastián, por su paciencia, compañía, cariño y apoyo. A mi grupo de amigos de carrera “chechitos” y a los amigos de otras carreras que conocí a lo largo de mi estadía en la universidad, quienes se convirtieron en mi familia fuera de casa y llenaron este camino de momentos inolvidables.

A mis dos cachorritas Mía y Fo, que con su compañía en tantas noches de estudio hicieron más livianos los días largos y más cálidos los días fríos.

Agradezco profundamente al Proyecto FONDEF ID23I10183 y a los docentes del Departamento de Metalurgia por su guía, dedicación y compromiso durante todo este proceso.

Gracias a todos por ser parte de este camino y por ayudarme a llegar hasta aquí.

Resumen

El presente estudio aborda la necesidad de gestionar y darle valor a los Pasivos Ambientales Mineros (PAM), concentrado en el análisis de los relaves ricos en hierro generados por la industria minera chilena, cuya acumulación representa un desafío logístico, ambiental y económico. Bajo el término de economía circular y simbiosis industrial, esta investigación tuvo como propósito demostrar la factibilidad técnica de transformar estos residuos mediante procesos de activación, en un material puzolánico suplementario (MPS) para la sustitución parcial del clinker de cemento Portland. Esto ofrece una solución doble, mitigar el volumen de relaves y a la vez reducir la huella de carbono asociada a la producción de cemento con sus emisiones de CO₂.

La metodología experimental se basó en la activación mecánica y térmica de 3 relaves ricos en hierro provenientes de yacimientos de tipo pórfido cuprífero identificados como bambas, relave 1 y relave 2, buscando mejorar su reactividad. Dicha activación se ejecutó mediante un tratamiento térmico de calcinación a 1000°C para inducir desorden y desestructuración de las fases cristalinas del relave, y la activación mecánica mediante molienda, orientado a reducir el tamaño de partícula y aumentar su superficie específica. Se fabricaron mezclas de mortero con sustituciones de cemento al 10%, 15% y 20% para visualizar un rango óptimo de reemplazo que no comprometa las propiedades mecánicas del material. La caracterización de estos relaves incluyó el análisis por DRX y FRX para confirmar su composición.

Los resultados confirmaron la viabilidad técnica de la utilización de relaves ricos en hierro provenientes de yacimientos de tipo pórfido cuprífero como reemplazo en morteros. La adición de relaves activados resultó en un incremento constante de densidad en las probetas evidenciando el efecto de relleno que contribuye a su matriz. En términos de desempeño mecánico, se observó una actividad puzolánica retardada, donde las resistencias iniciales correspondientes a 28 días de curado tendieron a ser menores a los resultados obtenidos por la muestra control. No obstante, en etapas de curado mayores como 56 o 84 días, la activación fue más efectiva, pues mezclas con 10% o 15% de reemplazo no solo igualaron, sino que superaron la resistencia a compresión del control. Esto valida la propuesta, estableciendo un rango de sustitución del 10% al 15% como el más prometedor ofreciendo una opción viable para la mitigación de pasivos ambientales y la optimización de recursos mineros.

Abstract

This Study addresses the imperative need to manage and valorize Mining Environmental Liabilities (MEL), focusing specifically on the analysis of iron-rich tailings generated by the Chilean mining industry, the accumulation of which represents a significant logistical, environmental, and economic challenge. Operating under the framework of the circular economy and industrial symbiosis, this research aimed to demonstrate the technical feasibility of transforming these residues, through specific activation processes, into a Supplementary Pozzolanic Material (SPM) for the partial replacement of Portland cement clinker. This approach offers a dual solution: mitigating the volume of tailings and simultaneously reducing the carbon footprint associated with cement production and its CO₂ emissions.

The experimental methodology was based on the mechanical and thermal activation of three identified tailings sources (Bambas, Relave 1, and Relave 2), seeking to enhance their inherent reactivity. This activation was executed through a thermal treatment of calcination at 1000°C to induce the disorder and de-structuring of the tailings' crystalline phases, and mechanical activation via milling, aimed at significantly reducing the particle size and increasing the specific surface area. Mortar mixtures were then fabricated with cement substitution levels of 10%, 15% and 20% to visualize an optimal replacement range that does not compromise the material's mechanical properties. The characterization of these tailings included analysis by X-Ray Diffraction (XRD) and X-Ray Fluorescence (XRF) to confirm their chemical composition.

The results confirmed the technical feasibility of using iron-rich tailings from porphyry copper deposits as a replacement in mortars. The addition of activated tailings resulted in a constant increase in specimen density, evidencing a filler effect within the matrix. Regarding mechanical performance, a delayed pozzolanic activity was observed; while initial strengths at 28 days of curing were lower than the control, at later stages (56 and 84 days), activation became more effective. Specifically, mixtures with 10% and 15% replacement levels matched or exceeded the compressive strength of the control. These findings validate the proposal, establishing a 10% to 15% substitution range as the most promising for mitigating environmental liabilities and optimizing mining resources.

Tabla de Contenido

1.	Introducción	1
1.1.	Objetivos.....	2
1.1.1.	Objetivo General:	2
1.1.2.	Objetivos Específicos	2
1.2.	Alcances.....	2
1.3.	Limitaciones	3
1.4.	Metodología General	3
2.	Marco teórico	4
2.1.	Relaves Mineros	4
2.2.	Cemento.....	6
2.2.1.	Cemento Portland:	7
2.2.2.	Cemento Pozolánico	7
2.2.3.	Cemento Siderúrgico:	8
2.3.	Materiales Pozolánicos	8
2.4.	Morteros	10
2.5.	Economía circular e Innovación	11
2.6.	Caso de estudio I: “Hydration characteristics investigation of iron tailings blended ultra high performance concrete: The effects of mechanical activation and iron tailings content” (Gu, 2022).....	13
2.7.	Caso de estudio II: “Mechanism of Different Mechanically Activated Procedures on the Pozzolanic Reactivity of Binary Supplementary Cementitious Materials”	15
3.	Materiales	18
3.1.	Relave proveniente de yacimientos de tipo pórfido cuprífero.....	18
3.2.	Cemento.....	18
3.3.	Árido fino	19

3.4.	Agua	19
4.	Metodología experimental.....	21
4.1.	Preparación y tratamiento de los relaves	21
4.1.1.	Preparación de muestras	21
4.1.2.	Tratamiento térmico.....	22
4.1.3.	Tratamiento mecánico	22
4.2.	Caracterización física y química de relaves	22
4.2.1.	Análisis de granulometría por difracción láser.....	22
4.2.2.	Microscopía electrónica de barrido (SEM)	25
4.2.3.	Difracción de rayos X (DRX).....	26
4.2.4.	Fluorescencia de rayos X (FRX)	27
4.3.	Dosificación y ensayo de Cono de Abrams	30
4.3.1.	Definición de dosificación y rótulo	30
4.3.2.	Ensayo de cono de Abrams.....	31
4.4.	Elaboración y ensayos mecánicos a morteros	31
4.4.1.	Fabricación de probetas	31
4.4.2.	Fraguado y desmolde.....	32
4.4.3.	Curado	32
4.4.4.	Densidad	33
4.4.5.	Ensayo de flexión	33
4.4.6.	Ensayo de compresión	34
5.	Resultados	35
5.1.	Ensayo de cono de Abrams.....	35
5.2.	Densidad	36
5.3.	Ensayo de flexión	39

5.4.	Ensayo de compresión.....	41
5.5.	Influencia de la densidad del mortero en el desarrollo de resistencia mecánica ..	45
6.	Discusión.....	48
7.	Conclusiones	51
8.	Recomendaciones.....	53
9.	Bibliografía.....	54
10.	Anexos	58

Índice de tablas

Tabla 1: Cantidad de relaves en Chile según su estado	5
Tabla 2. Marco Normativo que regula los depósitos de relaves mineros (Sagner et al., 2019)	6
Tabla 3. Composición Química	7
Tabla 4. Requisitos químicos	8
Tabla 5. Tipos de muestra según trabajabilidad (Polpaico, 2021)	10
Tabla 6. Parámetros granulométricos característicos (D10, D60 y CU) obtenidos por difracción láser	25
Tabla 7. Mineralogía por DRX	26
Tabla 8. Dosificación por cada relave	30
Tabla 9. Ejemplo de cómo está rotulado cada relave	30

Índice de figuras

Figura 1. Cantidad de relaves según su tipo (Sernageomin, 2025)	6
Figura 2. Economía circular (Parlamento Europeo, 2023)	12
Figura 3. Jerarquía de los residuos (Cabrera, 2021)	13
Figura 4. (a) Muestra relave bambas, (b) Muestra relave 1 y (c) Muestra relave 2	18
Figura 5. Cemento Bio-Bio especial	19
Figura 6. Arena fina	19
Figura 7. Diagrama de flujo de tratamiento de relaves.....	21
Figura 8. Curva granulométrica relave bambas.....	23
Figura 9. Curva granulométrica relave 1	23
Figura 10. Curva granulométrica relave 2	24
Figura 11. (a) SEM relave bambas, (b) SEM relave 1, (c) SEM relave 2	26
Figura 12. Composición química mayoritaria de relave 1	28
Figura 13. Composición mayoritaria de relave 2	28
Figura 14. Composición mayoritaria de relave bambas	29
Figura 15. Procedimiento ensayo de cono de Abrams (Polpaico, s.f.)	31
Figura 16. a) Probetas en piscina de curado. (b) Probetas retiradas de piscina de curado. (c) Probetas secadas posterior a curado	32
Figura 17. (a) Probeta quebrada durante ensayo de flexión. (b) Probetas posterior a ensayo de flexión.	34
Figura 18. (a) Probeta quebrada en ensayo de resistencia a compresión. (b) Probeta resultante posterior a ensayo.	34
Figura 19. Variación de trabajabilidad según porcentaje de reemplazo	35
Figura 20. Variación de densidad a 28 días de curado.....	36
Figura 21. Variación de densidad a 56 días de curado.....	37
Figura 22. Variación de densidad a 84 días de curado.....	38
Figura 23. Evolución de la densidad en función de la edad de curado para las distintas mezclas	38
Figura 24. Resistencia a flexión a 28 días de curado.....	39
Figura 25. Resistencia a flexión a 56 días de curado.....	40
Figura 26. Resistencia a flexión a 84 días de curado.....	41

Figura 27. Resistencia a compresión a 28 días de curado	42
Figura 28. Resistencia a compresión a 56 días de curado	43
Figura 29. Resistencia a compresión a 84 días de curado	44
Figura 30. Correlación entre densidad y la resistencia a compresión a 28 días	45
Figura 31. Correlación entre densidad y la resistencia a compresión a 56 días	46
Figura 32. Correlación entre densidad y la resistencia a compresión a 84 días	47
Figura A-33. Mufla Thermolyne F6000	58
Figura A-34. Relave 2 Calcinado	58
Figura A-35. Rodillo para molino de bolas	59
Figura A-36. Molino de bolas	59
Figura A-37. Curva granulométrica bambas sobre tamaño	60
Figura A-38. Curva granulométrica bambas bajo tamaño	60
Figura A-39. Curva granulométrica relave 1 sobre tamaño	61
Figura A-40. Curva granulométrica relave 1 bajo tamaño	61
Figura A-41. Curva granulométrica relave 2 sobre tamaño	62
Figura A-42. Curva granulométrica relave 2 bajo tamaño	62
Figura A-43. SEM obtenida de cemento Bío-Bío	63
Figura A-44. SEM obtenida de arena fina	63
Figura A-45. Difractograma DRX relave bambas	64
Figura A-46. Difractograma DRX relave 1	64
Figura A-47. Difractograma DRX relave 2	65
Figura A-48. Analizador portátil S1 TITAN 800/CTX 800/ TRACER	65
Figura A-49. Elementos extremadamente críticos presentes en Bambas	66
Figura A-50. Elementos moderadamente críticos presentes en Bambas	66
Figura A-51. Elementos extremadamente críticos presentes en R1	67
Figura A-52. Elementos moderadamente críticos en R1	67
Figura A-53. Elementos radiactivos presentes en R1	68
Figura A-54. Elementos extremadamente críticos presentes en R2	68
Figura A-55. Elementos moderadamente críticos presentes en R2	69
Figura A-56. Elementos radiactivos presentes en R2	69
Figura A-57. Elementos usados para realizar ensayo cono de Abrams	70

Figura A-58. Ensayo de cono de Abrams	70
Figura A-59. Batidora de eje vertical utilizada para la elaboración de las mezclas	71
Figura A-60. Máquina vibratoria utilizada para depositar mezcla en moldes	71
Figura A-61. Probetas en proceso de fraguado de 24hrs	72
Figura A-62. Probetas en piscina de curado posterior a su fraguado	72
Figura A-63. Probetas luego de curado	73
Figura A-64. Horno de secado Labtech Hebro	73
Figura A-65. Probetas secadas posterior a curado.	74
Figura A-66. Probeta seca siendo pesada	74
Figura A-67. Comparación de resistencia a flexión con 28-56 y 84 días de curado	75
Figura A-68. Resistencia a compresión con 28 días de curado	75
Figura A-69. Desviación estándar obtenida de la resistencia a compresión.	76
Figura A-70. Carga máxima soportada con 28 días de curado	76
Figura A-71. Desviación estándar obtenida de la carga máxima con 28 días de curado	76
Figura A-72. Resistencia a compresión con 56 días de curado	77
Figura A-73. Desviación estándar obtenida de la resistencia a compresión.	77
Figura A-74. Carga máxima soportada con 56 días de curado	77
Figura A-75. Desviación estándar obtenida de la carga máxima con 56 días de curado	78
Figura A-76. Resistencia a compresión con 84 días de curado	78
Figura A-77. Desviación estándar obtenida de la resistencia a compresión.	78
Figura A-78. Carga máxima soportada con 84 días de curado	79
Figura A-79. Desviación estándar obtenida de la carga máxima con 84 días de curado	79
Figura A-81. Comparación de resistencia a compresión con 28-56 y 84 días de curado	80
Figura A-82. Comparación de máxima carga soportada con 28-56 y 84 días de curado	80

Nomenclatura

Al₂O₃: Óxido de Aluminio (Alúmina).

As: Arsénico.

B: Bambas.

Ca: Calcio.

Ca(OH)₂: Hidróxido de Calcio (Portlandita).

CaO: Óxido de Calcio.

C–S–H: Silicatos de Hidróxido Hidratados (Gel C–S–H).

C–A–H: Hidróxidos de Calcio–Aluminato Hidratados (Fases C–A–H).

C–A–S–H: Gel de Calcio–Aluminio–Silicato Hidratado (Gel C–A–S–H)

CH: **Ca(OH)₂**.

CO₂: Dióxido de Carbono.

Cr: Cromo.

C_u: Coeficiente de Uniformidad

DAM: Drenaje Ácido Minero.

DRX: Difracción de Rayos X.

Fe: Hierro.

Fe₂O₃: Óxido Férrico.

FRX: Fluorescencia de Rayos X.

g: Gramos.

g/cm³ : Gramos por centímetro cúbico

Hg: Mercurio.

K₂O: Óxido de Potasio.

m: Masa.

min: Minutos.

m³: Metro cúbico.

Mg: Magnesio.

MgO: Óxido de Magnesio.

mm: Milímetros.

MPa: Megapascal.

NCh: Norma Chilena.

Ni: Níquel.

PAM: Pasivo Ambiental Minero.

Pb: Plomo.

ρ: Densidad.

R1: Relave 1.

R2: Relave 2.

RC15min: Reemplazo Molido 15 minutos.

RC1000: Reemplazo Calcinado 1000°C.

rpm: Revoluciones por minuto.

Sb: Antimonio.

SEM: Microscopía Electrónica de Barrido.

SH: Ácido Silícico.

SiO₂: Dióxido de Silicio (Sílice).

SO₃: Óxido de Azufre (Trióxido de Azufre).

Th: Torio.

U: Uranio.

UHPC: Hormigón de Ultra Alto Desempeño.

V: Volumen.

μm: Micrón.

1. Introducción

Chile tiene una larga historia en el ámbito de la minería y forma parte de la identidad del país, destaca por ser el mayor productor y exportador de cobre en el mundo lo que genera que el sector minero sea el más activo en el desarrollo de la economía debido a la magnitud de producción y a la cantidad de inversionistas que se interesan en la industria cada año [5]. Al ser una industria de gran magnitud, la minería genera a su vez gran cantidad de pasivos mineros, dentro de los cuales se encuentran los relaves, los que corresponden a pasivos mineros finamente molidos que se descartan durante las operaciones mineras. En una operación minera típica, la fracción de material de interés económico suele ser cercana al 1% del material total extraído. Este material es sometido al proceso de molienda y posteriormente concentrado mediante procesos de flotación, obteniéndose un concentrado de mayor ley que puede ser comercializado o continuar con su procesamiento. Sin embargo, el resto del material, compuesto principalmente por roca molida, agua, reactivos químicos y remanentes de mineral, se denomina relave y se clasifica como un pasivo ambiental minero (PAM). [32]

Los relaves implican diversos impactos ambientales, entre los cuales se encuentra el drenaje ácido de mina (DAM), el cual se produce cuando los minerales sulfurados presentes en los relaves reaccionan con el agua y el oxígeno ambiental, generando ácido sulfúrico. Este proceso puede provocar contaminación de aguas superficiales y subterráneas, así como contaminación de suelos. Adicionalmente, los relaves pueden generar contaminación atmosférica debido a la emisión de material particulado. Otro impacto relevante corresponde a la alteración de la distribución y uso del territorio, ya que los depósitos de relaves aumentan su volumen y extensión con el paso del tiempo [19]. En este contexto, Chile es el tercer país con mayor cantidad de relaves a nivel mundial, después de China y Estados Unidos [6].

Su gestión representa un desafío para la industria, por lo cual se han investigado diferentes alternativas como en biominería reemplazando químicos nocivos por ácidos orgánicos, fabricación de ladrillos, utilización de relaves para fabricar geopolímeros que actúen como aislante, recuperación de metales, entre otros [29].

Una alternativa y que es la que se plantea en este estudio es la utilización de relaves ricos en hierro para su uso en morteros, esto debido a que en la industria cementera de igual manera

se tiene la necesidad de buscar opciones sostenibles para la producción de cemento, ya que se libera diariamente CO_2 a la atmósfera. En peso, se tiene que por cada 1000g de cemento se producen 900g de CO_2 , que provienen en un 60% del proceso de calcinación de piedra caliza que pasa a convertirse en óxido de calcio (CaO) y el 40% restante proviene de la quema de carbón o combustible para proceso de calcinación o formación de clinker [7].

Este estudio lleva el objetivo de evaluar técnicamente la factibilidad de utilizar relaves ricos en hierro tratados térmica y mecánicamente para su uso en mortero, esta activación permitirá que los materiales puzolánicos presentes en los relaves se reactiven y mejoren las propiedades del cemento contribuyendo a sus resultados de trabajabilidad, resistencia a flexión y compresión.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo General:

Evaluar la factibilidad técnica del uso de relaves ricos en hierro provenientes de yacimientos de tipo pórfido cuprífero tratados como reemplazo parcial de cemento en la fabricación de morteros con el fin de determinar su impacto en resistencia y trabajabilidad de las mezclas.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar física y químicamente los relaves antes y posterior a tratamientos térmicos y mecánicos mediante granulometría, FRX y DRX.
- Determinar la influencia del porcentaje de reemplazo de cemento por relave en la trabajabilidad mediante el ensayo de cono de Abrams.
- Evaluar la evolución de la resistencia a la compresión y flexión de mortero a 28, 56 y 84 días.

1.2. Alcances

- El estudio se desarrolla a escala de laboratorio bajo condiciones controladas de curado y ensayo, sin considerar producción industrial.
- Los resultados se enfocan en la factibilidad técnica del uso de relaves, sin considerar análisis de mercado, costos o eficiencia.
- Solo se evalúan probetas estándar con reemplazos parciales en porcentajes definidos.

1.3. Limitaciones

- No se contempla una evaluación económica de la implementación del uso de relaves.
- El estudio no aborda la durabilidad a un plazo mayor a 84 días.
- Resultados ambientales se limitan a identificación de elementos críticos mediante FRX sin considerar estudios de toxicidad.

1.4. Metodología General

En primer lugar, se realizó la preparación y el tratamiento de los relaves, comenzando por el muestreo, el tratamiento térmico que consiste en calcinación y un tratamiento mecánico que consiste en una molienda.

Luego se llevará a cabo una caracterización física y química de los relaves mediante un análisis de granulometría por difracción láser, un análisis de fluorescencia de rayos X (FRX) para determinar la composición química mayoritaria e identificar elementos críticos y difracción de rayos X (DRX) con la finalidad de conocer la mineralogía de los relaves.

Posteriormente, se establecerán proporciones para fabricar las probetas tomando como base las mezclas con un reemplazo parcial de 10%, 15% y 20%, se realizará el ensayo de cono de Abrams para medir el asentamiento de cada mezcla y evaluar su trabajabilidad.

Luego, se elaborarán y se realizarán ensayos mecánicos a los morteros, se tendrá la fabricación, desmolde, curado, secado y ensayo de cada una de las muestras.

Finalmente, se realizará el análisis de resultados donde se realizará una comparación de éstos a los periodos de 28, 56 y 84 días, y además se comparará con un estudio de caso.

2. Marco teórico

2.1. Relaves Mineros

Los relaves corresponden a un tipo de sólido molido finamente que se descarta de las operaciones mineras, en estas operaciones se extrae una gran cantidad de material de los yacimientos que se explotan donde se tiene que la fracción que tiene un valor económico y que se puede recuperar corresponde al menos a 1%, luego de pasar por el proceso de conminución y concentración por procesos de flotación se obtiene un material con una concentración de cobre más alta que se puede comercializar como está o se puede seguir procesando [32].

Como los relaves provienen de las operaciones mineras, están conformados por roca, sustancias químicas, agua y con un contenido mínimo del mineral extraído. Es común la presencia de minerales sulfurados, que no se consideran como contaminante en sí, pero si llegan a contener arsénico, cianuro, cobre, zinc, cromo o plomo éstos pueden reaccionar con agua u oxígeno, solubilizan y pueden movilizarse lo que representaría un riesgo para la población. Debido a esto, cada empresa minera debe indagar desde el proceso de planteamiento de su proyecto cuáles serán los elementos químicos o mineralógicos económicos que caracterizan su yacimiento y el entorno en el cual se encuentra para neutralizar cualquier riesgo [32].

Los depósitos de relaves se clasifican según la cantidad de agua que traen y la forma en la cual se contiene, los tipos que se tienen son:

- **Embalse:** Depósito donde el muro de contención está construido de material de tierra y rocas aledañas, y se encuentra impermeabilización en el coronamiento y en su talud interno.
- **Espesado:** Relaves sometidos a un proceso de sedimentación mediante espesadores para eliminar una parte importante del agua que contienen antes de ser depositados con el objetivo de impedir que el relave fluya a otras áreas distintas del emplazamiento.

- **Filtrado:** Los relaves son sometidos a filtración donde se asegura que la humedad sea menor a un 20%. Requiere una inversión en filtros y en manejo del medio por el cual se depositarán los relaves secos como correas o flota de camiones.
- **En pasta:** Presenta una situación intermedia entre relave espesado y filtrado, corresponde a una mezcla de relave sólido y agua que contiene partículas finas menores a 20 micrones en una concentración en peso superior al 15% similar a una pulpa de alta densidad.
- **Tranque de relave:** Depósito en el cual el muro es construido por la fracción más gruesa del relave, compactado, proveniente de un hidrociclón que se encarga de separar sólido grueso del fino por impulsión usando agua. La fracción fina es la que se ubica en la cubeta del depósito.

Chile es el tercer país con mayor cantidad de tranques de relaves en el mundo luego de China y Estados Unidos, a 2025 el país cuenta con 795 relaves que se encuentran en estado activo, inactivo, abandonado, en construcción y en revisión, lo cual se puede evidenciar en la Tabla 1 y en la Figura 1 se tiene su clasificación según su tipo.

Tabla 1: Cantidad de relaves en Chile según su estado

ESTADO	CANTIDAD
Activo	128
Inactivo	601
Abandonado	53
En construcción	12
En revisión	1

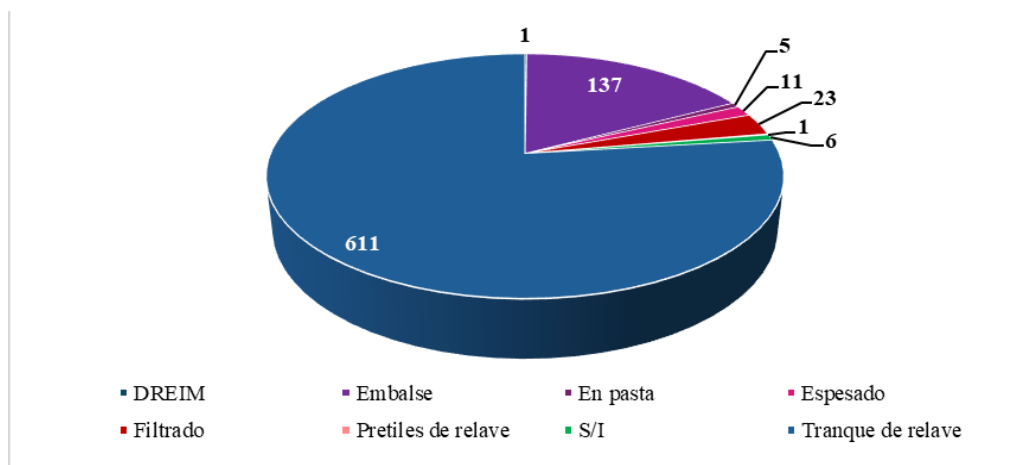


Figura 1. Cantidad de relaves según su tipo (Sernageomin, 2025)

En lo que respecta a la normativa, los relaves en Chile están bajo un marco regulatorio que comenzó a discutirse a partir del año 1965 posterior a un sismo de grado 7,5 Richter que provocó el colapso de la mayoría de los depósitos de relaves de la zona central, esto generó una reacción tanto a nivel nacional y mundial, desarrollándose simposios internacionales en París y Santiago con objeto de discutir sobre seguridad de los relaves y mejorar técnicas. Posterior a esto, con consistente evolución en la industria se ha llegado a lo contenido en la Tabla 2:

Tabla 2. Marco Normativo que regula los depósitos de relaves mineros (Sagner et al., 2019)

Norma	Normativa General	Fecha
DFL N°1.122	Código de Aguas.	1981
Ley N° 18.097	Ley Orgánica Constitucional sobre Concesiones Mineras.	1982
Ley N° 18.248	Código de Minería.	1983
Decreto N° 1	Reglamento del Código de Minería.	1987
Ley N° 19.300	Ley sobre Bases Generales del Medio Ambiente.	1994
Decreto N° 132	Reglamento de Seguridad Minera.	2004
Decreto N° 248	Reglamento para el Proyecto de Diseño Construcción, Operación y Cierre de los Depósitos de Relaves.	2007
D.S. N°40	Reglamento del Sistema de Evaluación del Impacto Ambiental.	2012
Ley N° 20.551	Ley que Regula el Cierre de Faenas e Instalaciones Mineras.	2011
D.S. N°41	Reglamento de la Ley de Cierre de Faenas e Instalaciones Mineras.	2012
Decreto N° 50	Reglamento al artículo 295 inciso 2°, del Código de Aguas (Obras Mayores).	2015

2.2. Cemento

Corresponde a un material pulverizado que por adición de una cantidad conveniente de agua forma una pasta conglomerante capaz de endurecer tanto bajo el agua como en el aire, compuesto por:

- **Clinker:** Es un producto formado esencialmente por silicatos de calcio hidráulicos que se obtienen por calcinación hasta fusión incipiente de una mezcla íntima y adecuadamente dosificada de materiales arcillosos y calcáreos.
- **Yeso:** Se adiciona en cantidades pequeñas para regularizar el tiempo de fraguado.
- **Puzolana:** Es un material sílico-aluminoso que, aunque no posee propiedades aglomerantes por sí solo, las desarrolla cuando está finamente dividido y en presencia de agua por reacción química con hidróxido de calcio a la temperatura ambiente.
- **Escoria granulada de alto horno:** Es el producto que se obtiene por enfriamiento brusco de la masa fundida no metálica que resulta en el tratamiento de mineral de hierro de alto horno.

Se tienen distintos tipos de cemento:

2.2.1. Cemento Portland: Producto que se obtiene de la molienda conjunta de clinker y yeso junto a otras sustancias no perjudiciales y que no sobrepasen el 3% en peso del cemento. Son de composición variable, pero deben comprender ciertos límites contenidos en la Tabla 3.

Tabla 3. Composición Química

Elemento	Contenido (%)
CaO	60-70
SiO ₂	17-25
Al ₂ O ₃	3- 8
Fe ₂ O ₃	0,5-6
MgO	0,1-4,0
SO ₃	1- 3
Alcalís	0,2-3
Pérdida por calcinación	0,6-2
Pérdida insoluble	0,008-0,02

2.2.2. Cemento Puzolánico: Es el producto que se obtiene de la molienda conjunta con clinker, puzolana y yeso, y otras sustancias que no sean perjudiciales y no sobrepasen un 3% en peso del cemento. La puzolana además de incorporarse en la molienda conjunta de clinker y yeso, se puede incorporar como adición en el

hormigón en la misma obra. En Chile, según la dosis de puzolana que tenga el cemento se tiene 2 tipos: Portland puzolánico tiene menos de un 30% de puzolana, puzolánico tiene más de un 30% y menos 50% de puzolana.

2.2.3. Cemento Siderúrgico: Es el producto que se obtiene de la molienda conjunta de clinker, escoria de alto horno y yeso y otras sustancias que no sean perjudiciales y no sobrepasen un 3% en peso del cemento. En Chile, el Portland siderúrgico es aquel que tiene menos de un 30% de puzolana y Siderúrgico el que tiene más de un 30% y menos de un 75% de escoria [14].

A continuación, se tiene la Tabla 4 con los requisitos químicos según el tipo de cemento según la NCh.148 Of 68.

Tabla 4. Requisitos químicos

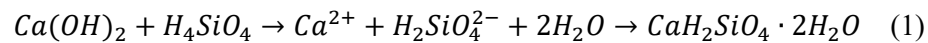
Análisis	Cemento Portland	Cementos siderúrgicos		Cementos puzolánicos		Cementos con agregado tipo A	
		Portland Siderúrgico	Siderúrgico	Portland Puzolánico	Puzolánico	Portland con agregado tipo A	Con agregado tipo A
Perdida por Calcinación máximo %.	3,0	5,0	5,0	4,0	5,0	7,0	9,0
Residuo insoluble, máximo %.	1,5	3,0	4,0	30	50	21,0	35,0
Contenido de SO ₃ , máximo %.	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
Contenido de MgO, máximo %.	5,0	-	-	-	-	-	-
Contenido de MN ₂ O ₃ , máximo %.	-	2,0	2,0	-	-	-	-

La producción del cemento se encuentra particularmente vinculada al fenómeno conocido como cambio climático, los gases de efecto invernadero como el CO₂, no permiten la salida del calor solar y provoca la subida de la temperatura media global [8].

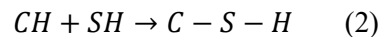
2.3. Materiales Puzolánicos

Los materiales puzolánicos se producen de forma natural en la corteza terrestre como en forma de subproductos de diversos procesos industriales, por ejemplo, cenizas volantes, humo de sílice, cáscara de arroz, riolitas y arcillas, entre otros [11].

Se caracterizan por el empaquetamiento de partículas minerales en donde la sílice amorfa al entrar en contacto con el agua se solubiliza y reacciona con los iones de Ca^{2+} presentes en $\text{Ca}(\text{OH})_2$, lo que forma silicatos de hidróxido hidratados similares a los producidos en las reacciones de hidratación del cemento en donde el alto contenido de sílice, alúmina y óxido de hierro favorece la actividad puzolánica [12]. La reacción puzolánica que se genera es del tipo ácido-base entre la portlandita (o cualquier activador alcalino) y el ácido silícico como se muestra:



O se puede hacer esquemáticamente utilizando la notación química del cemento estándar que se ve a continuación:



La puzonalidad de un compuesto silíceo y aluminoso es función de la composición química, la amorficidad de las fases y la finura, variables que dependen de la temperatura de activación, forma de captura húmeda o seca y su almacenamiento [12].

Estos materiales puzolánicos se pueden activar con los siguientes métodos:

- **Activación térmica:** Se suele aplicar en puzolanas naturales que no son lo suficientemente reactivas, como arcillas caoliníticas y esquistos, se calcina el material a una temperatura entre 600°C - 800°C lo que provoca la deshidroxilación de los minerales, generando así un desorden estructural formando fases amorfas que aumentan la reactividad con el hidróxido de cal.
- **Activación mecánica:** Consiste en la reducción de tamaño de partícula del material mediante molienda fina, al reducir el tamaño de partícula se logra un aumento significativo de la superficie específica, lo que incrementa a su vez la interfaz de contacto para que ocurra la reacción puzolánica con mayor rapidez.
- **Activación química:** Implica usar aditivos para modificar el entorno de reacción o la superficie de la puzolana, se añaden sustancias químicas activadoras que pueden ser hidróxidos, sales o aditivos específicos a la mezcla, éstos pueden

incrementar el pH del medio, acelerando la disolución de la sílice y la alúmina de la puzolana o pueden acelerar la velocidad de hidratación de las puzolanas lo que se traduce en un mejor desarrollo de resistencias.

2.4. Morteros

El mortero es una mezcla constituida por cemento, arena y en algunos casos otro material aglomerante como la cal que, con la adición de agua reacciona y adquiere resistencia. Existen muchos tipos de morteros, pero los principales son los de albañilería y los de revestimientos o estucos.

Los morteros tienen dos tipos de propiedades: las que se desarrollan en estado plástico que son las que determinan la adaptabilidad del mortero en la obra y están relacionadas con las propiedades luego de endurecer, ayudan a determinar si un mortero es adecuado para la obra en la cual se está trabajando, por otro lado, se tienen las propiedades en estado endurecido que son las que ayudan a determinar el comportamiento de la albañilería terminada. Algunas propiedades son:

- **Trabajabilidad:** Es una combinación de varias propiedades como son la plasticidad, consistencia, cohesión y adhesión, un mortero trabajable se puede esparcir fácilmente en las irregularidades superficiales y entre unidades de albañilería, soporta el peso que se coloca sobre él y se adhiere a la superficie vertical en la cual se encuentre. Se puede medir en una mesa de sacudidas y en el asentamiento del cono de Abrams, donde el mortero se clasificará según lo contenido en la Tabla 5:

Tabla 5. Tipos de muestra según trabajabilidad (Polpaico, 2021)

Tipos	Extendido (mm)	Cono (mm)
Seca	<180	<10
Plástica	180-220	10- 30
Fluída	>220	<30

- **Retentividad:** Es una medida de la capacidad de un mortero sometido a succión de retener su agua de mezclado, entrega el tiempo necesario para colocar y ajustar una unidad sin que el mortero se vuelva rígido, cuando hay mucha pérdida de agua por baja retentividad el mortero es incapaz de adherirse antes de colocar la siguiente unidad.
- **Resistencia mecánica:** La resistencia a la compresión es usada como criterio principal para seleccionar un tipo de mortero, esta aumenta con el incremento de contenido de cemento y disminuye con aumento de arena, agua, aire o reemplazos de cemento. El ajuste de trabajabilidad con agua es asociado con la disminución de la resistencia a la compresión del mortero.
- **Adherencia:** Es una propiedad importante del mortero endurecido e influye el contenido de aire, cohesividad, tiempo transcurrido entre la distribución del mortero, colocación de la unidad, succión, retentividad de agua, presión aplicada, entre otras.
- Existen otras propiedades como absorbencia, durabilidad, contenido de aire, tiempo de utilización, velocidad de endurecimiento, compatibilidad con soporte y apariencia uniforme.

2.5. Economía circular e Innovación

La economía circular es un modelo de producción que implica compartir, alquilar, reutilizar, reparar, renovar y reciclar materiales, productos o residuos existentes todas las veces que sea posible para crear un valor añadido y así extender su ciclo de vida, en la Figura 2 se tienen los pilares del modelo de economía circular.



Figura 2. Economía circular (Parlamento Europeo, 2023)

Uno de los beneficios que trae la reutilización es ralentizar el uso de recursos, reducir la alteración del paisaje, limitar la pérdida de biodiversidad y reducir las emisiones, todas estas son problemáticas que se ven tanto en la industria minera con la gestión de relaves y en la industria de construcción con el uso de cemento en morteros, por lo cual en esta investigación se estaría promoviendo la simbiosis entre ambas industrias con el fin de reducir riesgos y pasivos ambientales, transformando el material que corresponde a relave mediante procesos de calcinación y molienda e innovando al realizar activaciones de este material fuera de los parámetros comunes [28].

En lo que respecta a reducir, reparar, recuperar, reutilizar y reciclar se conforma un conjunto de acciones en donde el tratamiento de los desechos es un tema central y existe una jerarquía de los residuos donde se refuerza que la eliminación es un último recurso puesto que previo a aquello se han agotado todas las instancias para que se mantenga el producto, partes, materiales o residuos se mantengan circulando. No se considera la fuente de desechos y no se consideran materiales que requieran tratamiento como desechos inflamables, tóxicos, corrosivos, infecciosos, entre otros. La Figura 3 representa la jerarquía al hablar de residuos:



Figura 3. Jerarquía de los residuos

2.6. Caso de estudio I: “Hydration characteristics investigation of iron tailings blended ultra high performance concrete: The effects of mechanical activation and iron tailings content” [36]

El estudio titulado “Investigación de las características de hidratación del hormigón de ultra rendimiento mezclado con relaves de hierro: Los efectos de la activación mecánica y el contenido de relaves de hierro” tiene como propósito analizar de qué manera influye la activación mecánica y el contenido de relaves de hierro en las características de hidratación y en el comportamiento mecánico del hormigón de ultra alto desempeño (UHPC). Se realiza en el contexto de la necesidad de reducir el consumo de cemento en estos materiales, ya que su demanda implica emisiones de efecto invernadero y costos significativos de producción, de modo que el incorporar los relaves de hierro que presentan una composición química similar al cemento y que se encuentra presente en enormes volúmenes como un material suplementario surge como una alternativa sostenible. Sin embargo, se parte de que los relaves de hierro tienen una composición similar al cemento, pero presentan una baja reactividad a temperatura ambiente, por lo que se requiere una activación que en este caso sería mecánica como una estrategia para aumentar la superficie específica de las partículas y generar defectos estructurales en la estructura cristalina, facilitando reacciones puzolánicas durante la hidratación del cemento.

La metodología del estudio se desarrolla en varias etapas experimentales. En primer lugar, se realiza una caracterización de los relaves de hierro, los cuales fueron

secados, tamizados y clasificados en fracciones ultrafinas de partículas entre 0,075mm y 0,15mm con la idea de mejorar la eficiencia de la molienda. Luego, las fracciones se someten a la activación mecánica en un molino planetario vertical variando los tiempos de molienda.

Una vez activados los relaves, se realizan mezclas de UHPC con 3 tipos de reemplazo de cemento: 10%, 20% y 30% en peso junto a una muestra de control sin reemplazo. La mezcla incorpora cemento Portland, humo de sílice, arena natural, superplastificante para mejorar la trabajabilidad y manteniendo la relación agua-aglutinante constante. Posteriormente, se llevan a cabo ensayos a 3, 7 y 28 días de curado, ensayos de difracción de rayos X (XRD), análisis termogravimétrico (TG-DTG), análisis granulométrico y microscopía electrónica de barrido (SEM) para visualizar como la activación mecánica modifica las propiedades físicas, químicas y microestructurales de los relaves.

Los resultados demostraron que la activación mecánica disminuye significativamente el tamaño medio de partícula de los relaves desde 154 μm a 5,18 μm tras 3,5 horas de molienda y aumenta su superficie de manera exponencial, lo cual incrementa la cantidad de sitios reactivos y la capacidad de los relaves de ser activados. El índice de actividad puzolánica alcanzó un 74,5% tras 3,5 horas de molienda lo cual cumple con requisitos normativos. Al realizar un reemplazo de 10% de relave activado, la resistencia a la compresión alcanza 121,9 MPa a 28 días superando el control. Con un 20% de reemplazo se observa una ligera disminución y con 30% se produce una caída significativa atribuible a la reducción de la cantidad de cemento disponible para la hidratación primaria. El análisis XRD mostró que la incorporación de relaves no modifica la naturaleza de los productos de hidratación, pero incrementa la cantidad de gel C-S-H debido a la reacción entre fases de los relaves. El análisis termogravimétrico confirma un mayor consumo de Ca(OH)_2 en mezclas con relave activado lo que evidencia su participación en reacciones secundarias. Finalmente, la microscopía electrónica de barrido revela una microestructura más densa y compacta en zonas de interfaz entre pasta y partículas

de relave en edades de curado más avanzada, indicando buena integración química y física.

Las conclusiones que se establecen en el estudio son que la activación mecánica es una estrategia eficaz para aumentar la reactividad de los relaves de hierro permitiendo su utilización como material suplementario en UHPC, determinando que el rango óptimo de reemplazo esta entre 10% y 20% logrando mejorar o mantener las propiedades mecánicas. Además, afirma que el uso de relaves activados contribuye a reducir el uso de cemento y, por ende, las emisiones de CO₂, convirtiéndose en una solución viable (Gu, 2022).

2.7. Caso de estudio II: “Mechanism of Different Mechanically Activated Procedures on the Pozzolanic Reactivity of Binary Supplementary Cementitious Materials” [37]

El estudio titulado “Mecanismo de diferentes procedimientos de activación mecánica sobre la reactividad puzolánica de materiales cementantes suplementarios binarios” tiene como objetivo evaluar cómo distintos métodos de activación mecánica influyen en la reactividad puzolánica, el comportamiento de hidratación y el desempeño mecánico de materiales cementantes suplementarios binarios compuestos por ceniza volante y relaves de hierro. La investigación se enmarca en la búsqueda de alternativas sostenibles al cemento Portland ordinario, considerando que su producción es responsable de una fracción significativa de las emisiones globales de CO₂ y del consumo intensivo de recursos naturales. En este contexto, el uso combinado de residuos industriales ampliamente disponibles, como la ceniza volante y los relaves de hierro, surge como una estrategia viable para reducir el impacto ambiental de los materiales cementicios, siempre que se logre mejorar su baja reactividad natural.

El trabajo parte de la premisa de que tanto la ceniza volante como los relaves de hierro presentan una actividad puzolánica limitada debido a su elevada cristalinidad y tamaño de partícula relativamente grueso, lo que restringe su participación en

reacciones secundarias con el hidróxido de calcio. Para superar esta limitación, se propone la activación mecánica como un mecanismo capaz de inducir cambios físicos y fisicoquímicos, tales como la reducción del tamaño de partícula, el aumento de la superficie específica y la generación de defectos estructurales, favoreciendo así la liberación de fases silicoaluminosas reactivas.

La metodología experimental se desarrolla mediante la preparación de un material cementante suplementario binario con una proporción en peso de ceniza volante y relaves de hierro de 2:1. Se analizan dos procedimientos distintos de activación mecánica: la activación separada, en la cual cada material es molido individualmente antes de su mezcla, y la activación conjunta, donde ambos residuos se muelen simultáneamente en un molino planetario. Posteriormente, los materiales activados se utilizan para reemplazar un 30% en peso del cemento Portland en morteros, junto con una muestra de referencia sin sustitución. Las mezclas se ensayan mediante pruebas de tiempo de fraguado, calor de hidratación, resistencia a la compresión a 7 y 28 días, difracción de rayos X (XRD), análisis termogravimétrico (TG-DTG) y microscopía electrónica de barrido (SEM), con el fin de evaluar el efecto de la activación mecánica sobre las propiedades físicas, químicas y microestructurales del sistema.

Los resultados obtenidos evidencian que ambos métodos de activación mecánica logran una reducción significativa del tamaño de partícula de los materiales binarios, siendo la activación conjunta la más eficiente. Este procedimiento genera una distribución granulométrica más fina, con una mayor fracción de partículas submicrométricas, lo que se traduce en un incremento sustancial de la superficie reactiva. Asimismo, se observa que la activación mecánica no modifica la naturaleza de los productos de hidratación, los cuales continúan estando dominados por geles C-(A)-S-H y portlandita, pero sí influye notablemente en su cantidad. En particular, los sistemas activados de forma conjunta presentan un mayor consumo de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, lo que confirma una intensificación de las reacciones puzolánicas secundarias.

Desde el punto de vista mecánico, los morteros con materiales activados muestran una mejora progresiva de la resistencia a la compresión con la edad de curado. A los 28 días, el mortero con activación conjunta alcanza valores de resistencia muy cercanos al de la muestra de control, reduciendo significativamente la pérdida asociada al reemplazo parcial de cemento. El análisis microestructural revela una matriz más compacta y una mejor integración entre los productos de hidratación y las partículas residuales, especialmente en las mezclas con activación conjunta, donde se observa una red más densa de geles C-S-H que contribuye a una mayor estabilidad estructural.

Las conclusiones del estudio indican que la activación mecánica es una herramienta eficaz para potenciar la reactividad puzolánica de materiales cementantes suplementarios binarios basados en ceniza volante y relaves de hierro. En particular, la activación conjunta previa a la molienda demuestra ser más eficiente que la activación separada, ya que favorece una mayor reducción del tamaño de partícula, un incremento del grado de hidratación y un mejor desempeño mecánico. En consecuencia, los autores concluyen que este tipo de materiales activados representa una alternativa técnica, económica y ambientalmente viable para la sustitución parcial del cemento Portland, contribuyendo a la reducción del impacto ambiental de los materiales de construcción [37]

3. Materiales

A continuación, se describirán los materiales para elaborar las muestras de morteros para reemplazo.

3.1. Relave proveniente de yacimientos de tipo pórfido cuprífero

En este estudio se utilizarán tres relaves distintos, los cuales se muestran en la Figura 4, provenientes de yacimientos de tipo pórfido cuprífero. Previo a su utilización, los relaves fueron sometidos a un proceso de secado, con el fin de eliminar humedad. Posteriormente, el material fue clasificado en 2 fracciones de tamaño por medio de un tamizado, empleando la malla N°140, que corresponde a 106 μm y por la malla N°100, que corresponde a 150 μm , donde el material que pasa bajo dichas mallas pasó a un proceso de calcinación, mientras que el material de mayor tamaño retenido sobre las mallas fue sometido a un proceso de molienda.

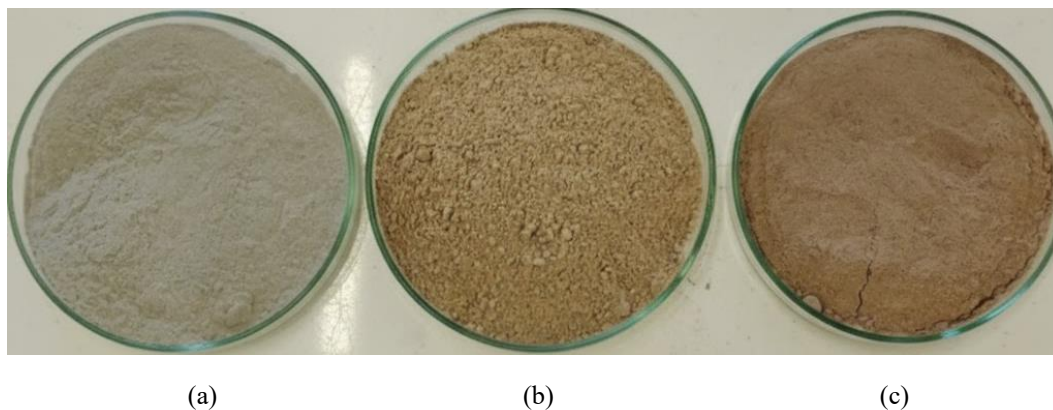


Figura 4. (a) Muestra Relave Bambas, (b) Muestra Relave 1 y (c) Muestra Relave 2

3.2. Cemento

El tipo de cemento utilizado en el estudio corresponde a cemento puzolánico de la empresa Cementos Bio-Bio, perteneciente a la línea de cemento especial, el cual se encuentra regido bajo la norma NCh148 [14]. Este tipo de cemento se caracteriza por la incorporación de materiales puzolánicos en su composición, los cuales reaccionan con el hidróxido de calcio liberado durante la hidratación del clinker, contribuyendo a las propiedades mecánicas. El cemento fue utilizado en su estado original, sin adicionar otros componentes, y corresponde al material mostrado en la Figura 5.



Figura 5. Cemento Bio-Bio especial

3.3. Árido fino

El árido fino utilizado en esta investigación corresponde a una arena fina de origen natural que podemos encontrar en la Figura 6, cuya fracción pasa completamente a través del tamiz de 4,75 mm, cumpliendo la norma NCh163 [13]. Presenta una granulometría continua, sin evidencia de materia orgánica o arcilla adherida, cuenta con una textura superficial lisa. El árido fue utilizado en condición seca al incorporarlo en la mezcla.



Figura 6. Arena fina

3.4. Agua

El tipo de agua que se utilizó es potable proveniente de la red pública de la ciudad de Concepción que cumple con requisitos microbiológicos de turbiedad, químicos,

radiactivos, organolépticos y de desinfección descritos en NCh409/1 [17]. Esta agua se calienta a una temperatura promedio de 23°C para su aplicación.

4. Metodología experimental

En este capítulo se encuentra la metodología utilizada para desarrollar el estudio dividida en 4 grandes etapas que corresponden a la preparación del relave a usar, la caracterización de este, su dosificación y trabajabilidad para finalizar con la fabricación de las probetas para luego ensayarlas mecánicamente.

4.1. Preparación y tratamiento de los relaves

4.1.1. Preparación de muestras

Las muestras de relaves utilizadas se obtienen de 3 procedencias distintas y llevan por nombre Bambas, Relave 1 y Relave 2, cada muestra es secada, homogenizada y separada para someterla a tamizaje. Se tamiza para dividir cada relave en dos granulometrías distintas, 106 μm y 150 μm , que corresponden a los tamices N° 140 y N°100 respectivamente. Esto se explica en la Figura 7.

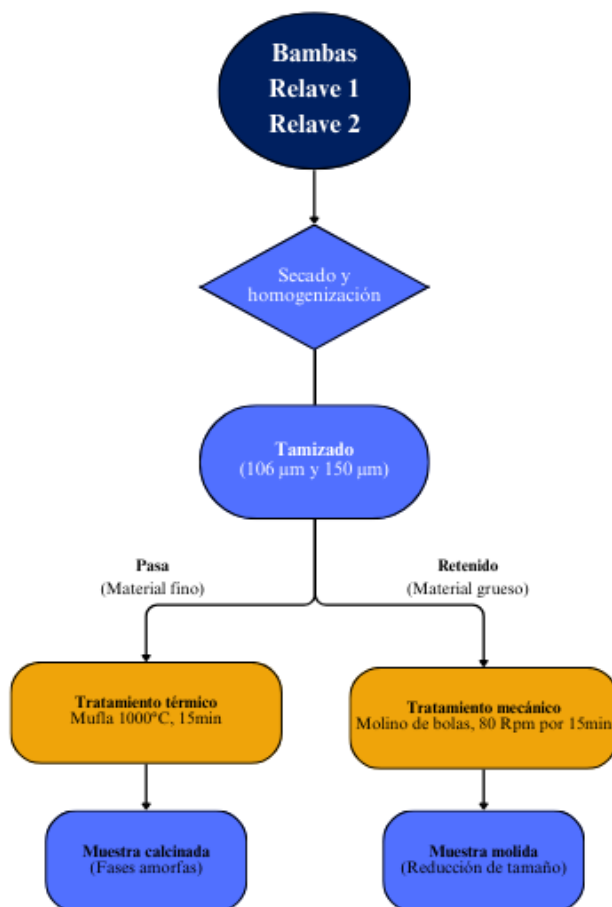


Figura 7. Diagrama de flujo de tratamiento de relaves

4.1.2. Tratamiento térmico

Se cataloga como material fino al relave que pasa a través de las mallas de 106 μm y 150 μm . Para cada uno de los relaves estudiados, ambas fracciones granulométricas fueron tratadas térmicamente de manera independiente, obteniéndose una muestra calcinada por fracción y por relave. El tratamiento térmico consistió en una calcinación controlada de la muestra en mufla a 1000°C, durante un periodo de 15 minutos. Este proceso tuvo como objetivo inducir la actividad puzolánica en los relaves mediante una desestructuración de la estructura cristalina, la deshidroxilación de los minerales y la formación de fases amorfas reactivas ([Anexo 10.1.1](#)).

4.1.3. Tratamiento mecánico

El material grueso corresponde al relave que no logra pasar a través de las mallas N°140 que corresponde a 106 μm y N°100 que corresponde a 150 μm , quedando retenido sobre éstas. Para cada uno de los relaves estudiados, el material grueso fue sometido a un proceso de molienda de manera independiente, obteniéndose una muestra molida por relave. La reducción de tamaño se realizó mediante un molino de bolas, operado a 80 revoluciones por minuto durante 15 minutos. Este tratamiento tuvo como finalidad reducir el tamaño de partícula, alterar parcialmente la estructura cristalina y aumentar la superficie específica del material, favoreciendo la generación de mayores puntos de contacto para reacciones posteriores. ([Anexo 10.1.2](#)).

4.2. Caracterización física y química de relaves

4.2.1. Análisis de granulometría por difracción láser

Se analizaron muestras correspondientes a tres relaves distintos, considerando diferentes condiciones de preparación. En partículas, se evaluaron: relave sin tratamiento de 200 μm , relave calcinado y molido correspondiente a la fracción de 106 μm , y relave calcinado y molido de la fracción de 150 μm .

El análisis granulométrico se realizó mediante la técnica de difracción láser, cuyo objetivo es determinar la distribución de tamaño de partículas en términos de porcentaje volumétrico. Esta metodología se basa en la difracción de un haz láser que interactúa con partículas dispersas, donde el patrón de esta dispersión permite calcular

el tamaño equivalente de las partículas en función del volumen. Es una medición indirecta basada en principios ópticos y no un método de tamizado.

Las curvas obtenidas permiten analizar el efecto de los tratamientos térmico y mecánico sobre la distribución de tamaño de partícula. Los resultados se presentan en las Figuras 8 a 10. ([Anexo 10.2.1](#)).

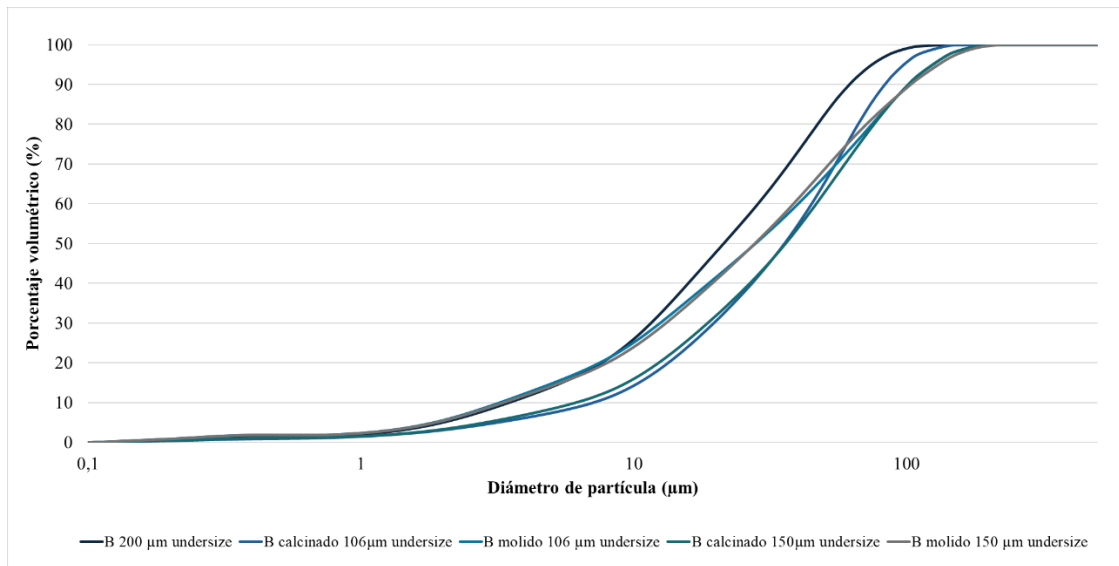


Figura 8. Curva granulométrica Relave Bambas

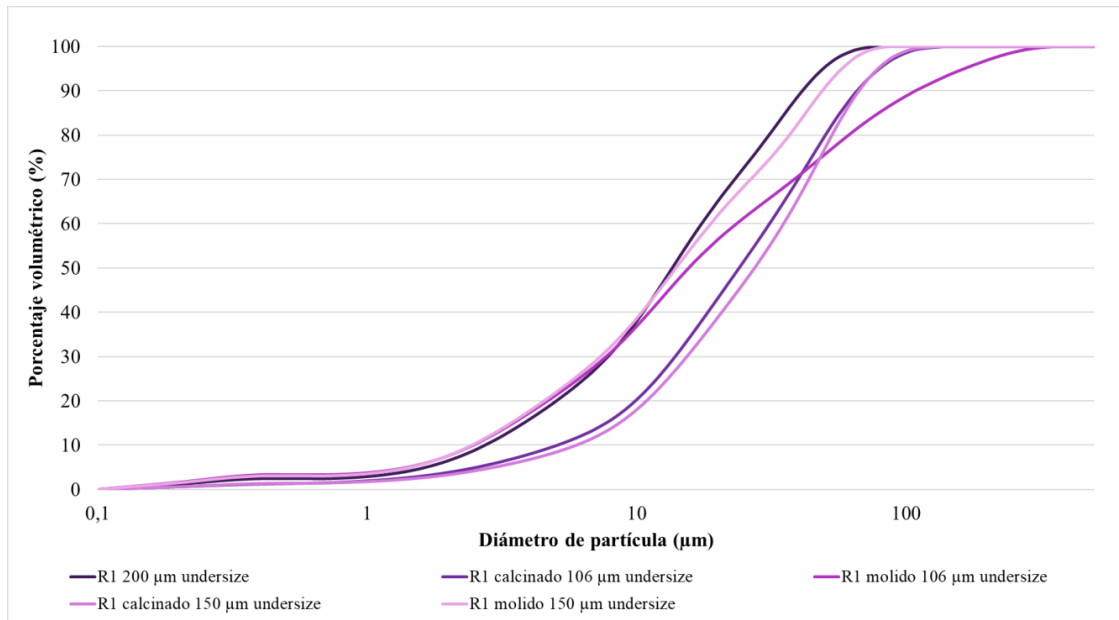


Figura 9. Curva granulométrica Relave 1

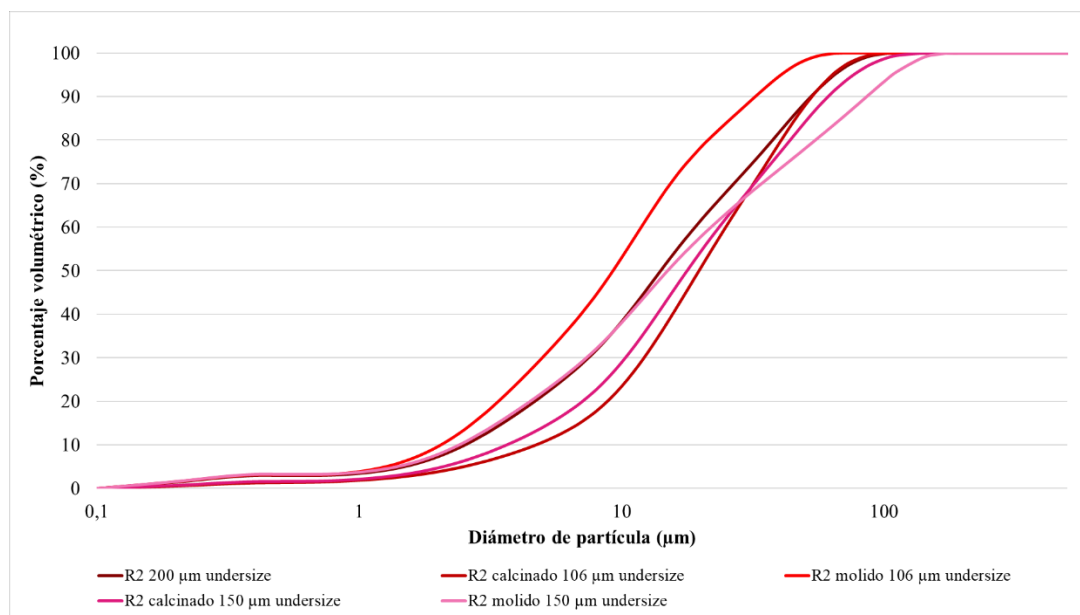


Figura 10. Curva granulométrica Relave 2

Según lo observado en las Figuras 8, 9 y 10, las muestras sin tratar presentaron curvas relativamente concentradas y con pendientes pronunciadas, lo que se refleja en valores moderados de coeficiente de uniformidad (C_u), calculado a partir de los percentiles volumétricos D10 y D60 obtenidos mediante difracción láser. Los valores de C_u para estas muestras se presentan en la Tabla 6 donde se observa que los relaves Bambas y Relave 1 presentan distribuciones de tamaño más homogéneas en comparación con el Relave 2, el cual muestra una mayor dispersión granulométrica. Una distribución relativamente homogénea permite una base adecuada para la aplicación de tratamientos posteriores.

En las muestras calcinadas correspondientes a las fracciones de 106 μm y 150 μm se evidencia que la calcinación tendió a homogeneizar la distribución granulométrica en los tres relaves, observándose una reducción relativa de la fracción fina y un desplazamiento de las curvas hacia diámetros de partícula menores. Este comportamiento se ve reflejado en una disminución general de los valores de C_u , indicando una distribución granulométrica más controlada tras el tratamiento térmico. En el Relave Bambas este efecto fue más evidente, observándose un aumento significativo del diámetro característico D60, asociado a un mayor predominio de partículas gruesas cercanas al rango de 200 μm . Si bien la calcinación contribuye a

mejorar la estabilidad del material, este aumento de tamaño de partícula puede conllevar una disminución de la superficie reactiva disponible.

En las muestras molidas se observó un comportamiento diferenciado según el relave. En el Relave 2, la fracción molida de 106 μm presentó una curva más concentrada, asociada a valores de C_u más bajos, lo que indica una molienda más eficiente y una distribución granulométrica relativamente uniforme. En cambio, en el Relave 1 y en Bambas, las fracciones molidas de 150 μm presentaron valores de C_u más elevados, evidenciando una mayor dispersión granulométrica. Esta dispersión sugiere la coexistencia de partículas finas y gruesas, lo que podría afectar la reactividad del material y su comportamiento posterior.

Tabla 6. Parámetros granulométricos característicos (D10, D60 y C_u) obtenidos por difracción láser

	D10 (μm)	D60 (μm)	C_u
B 200 μm	3,476	27,830	8,005
B calcinado 106 μm	7,078	44,077	6,227
B molido 106 μm	3,215	38,592	12,002
B calcinado 150 μm	6,101	46,668	7,649
B molido 150 μm	3,317	38,598	11,635
R1 200 μm	2,733	17,889	6,545
R1 calcinado 106 μm	5,078	30,805	6,066
R1 molido 106 μm	2,471	25,342	10,254
R1 calcinado 150 μm	5,974	34,157	5,718
R1 molido 150 μm	2,446	19,115	7,814
R2 200 μm	2,522	19,552	7,752
R2 calcinado 106 μm	4,703	25,227	5,364
R2 molido 106 μm	2,041	12,640	6,194
R2 calcinado 150 μm	3,637	24,139	6,637
R2 molido 150 μm	2,398	23,110	9,638

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (3)$$

4.2.2. Microscopía electrónica de barrido (SEM)

Se aplicó microscopía electrónica de barrido (SEM) en muestras de los tres relaves a utilizar, la arena fina y el cemento, con la finalidad de identificar la rugosidad, microrelieves, forma y tamaño de partículas ([Anexo 10.2.2](#)).

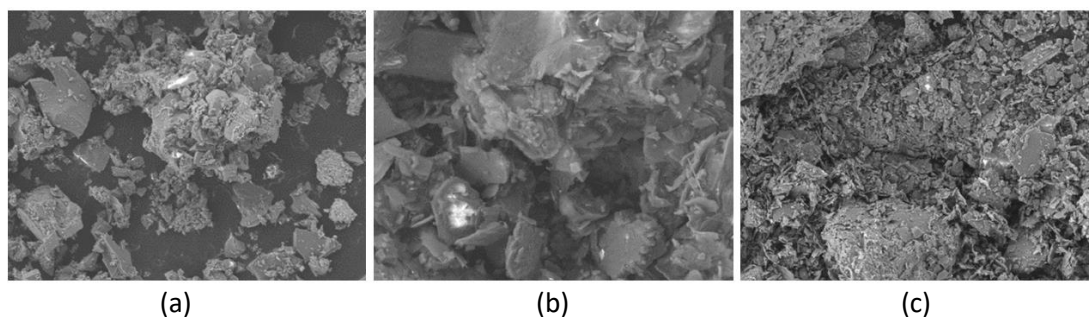


Figura 11. (a) SEM Relave Bambas, (b) SEM Relave 1, (c) SEM Relave 2

De acuerdo con lo apreciado en la Figura 11, la muestra del Relave Bambas tiene una morfología de tipo angular, se evidencian partículas irregulares, poliédricas y de superficie rugosa, lo que implica que las partículas tienen alta fricción y volumen. En Relave 2 se evidencian partículas laminares, delgadas, escamosas, aplanadas y se superponen o apilan. Por último, en Relave 1 se visualizó una morfología más heterogénea, ya que cuenta con partículas laminares en conjunto con otras masivas, la superficie es menos uniforme y se evidencia formación de partículas finas agrupadas.

4.2.3. Difracción de rayos X (DRX)

Se utilizó difracción de rayos X (DRX) con la finalidad de identificar las fases cristalinas presentes en cada uno de los relaves y detectar su composición mineralógica. Donde lo obtenido se resume en la Tabla 7:

Tabla 7. Mineralogía por DRX

%	Relave 1	Relave 2	Bambas
Actinolita	1,77	3,29	4,3
Bornita	1,04	1,52	1,89
Clorita	1,55	2,14	2,08
Calcita	0,83	0,61	0,86
Calcopirita	0,19	0,33	0,47
Cuprita	0,16	0,03	0,42
Diopsido	3,89	3,77	1,9
Yeso	0,4	0,99	1,59
Kaolinita	5,5	2,5	4,18
Muscovita	50	33,9	10,32
Piroxeno	1,21	2,79	3,33
Labradorita	14,8	10,19	37,41
Oligoclase	9,16	24,9	7,21
Albita	1,91	1,15	1,43

Pirita	0,24	0,5	0,71
Cuarzo	3,81	6,22	12,94
Titanita	3,09	3,4	5,87
Vermiculita	0,2	1,81	3,09
Micas	-	-	-
Alofanita	-	-	-

La mineralogía del Relave 1 se encuentra fuertemente concentrada en moscovita, ya que un 50% de su composición se basa en este mineral que forma parte de los filosilicatos, además se observa un 14,8% de labradorita y un 9,26% de oligoclasa, que forman parte de los feldespatos. Se evidencian pequeñas cantidades de caolinita y cuarzo, siendo un 5,5% y 3,81% respectivamente, de esto se concluye que la composición de relave 1 es mayoritariamente micácea y es lo que explica su morfología laminar y escamosa.

En cambio, la mineralogía del Relave 2 está compuesta mayormente por moscovita con un 33,9%, un 24,9% de oligoclasa que es un feldespato y se encuentra mezclado estructuralmente, debido a que cuenta con micas que aportan alta superficie específica al ser laminares y feldespatos como oligoclasa o labradorita y cuarzo que aportan con lo masivo.

La mineralogía del Relave Bambas concentra una mayor proporción de labradorita con un 33,41% que es un feldespato de estructura cristalina estable y contiene un 12,94% de cuarzo, este porcentaje alto de silicatos duros explica su morfología angular y masiva e implica que tengan una mayor resistencia a la conminución. Además, contiene filosilicatos como un 10,32% de moscovita y un 4,18% de caolinita, esto significa que Bambas depende del efecto relleno y de activación de molienda. ([Anexo 10.2.3](#)).

4.2.4. Fluorescencia de rayos X (FRX)

Se utilizó fluorescencia de rayos X (FRX) con la finalidad de determinar la composición química de los relaves, utilizando el analizador portátil S1 TITAN 800/CTX 800/ TRACER 5g (BRUKER, 2020) con la calibración de sulfuro ([Anexo 10.2.4](#)).

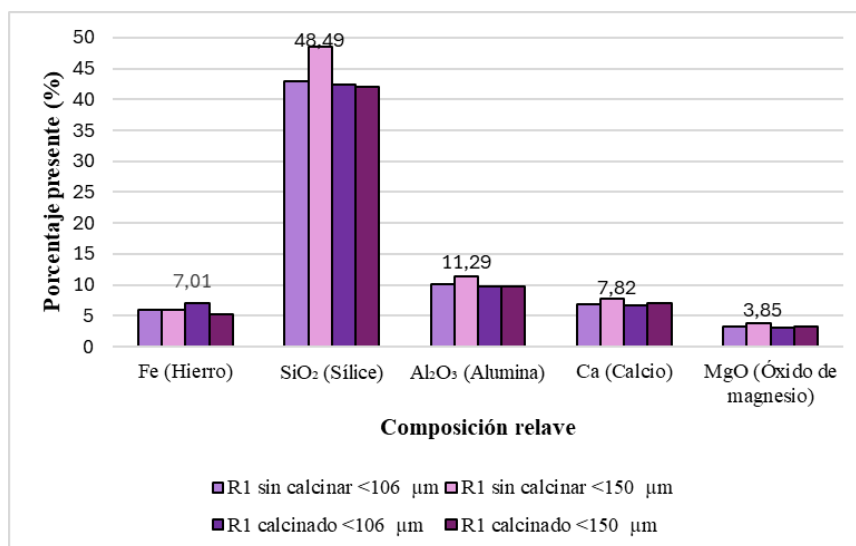


Figura 12. Composición química mayoritaria de relave 1

Según la Figura 12, el perfil obtenido del Relave 1 se destaca por tener un alto contenido de dióxido de silicio (SiO_2) y de óxido de potasio (K_2O), lo que está relacionado con la presencia de la moscovita. Tras la calcinación se puede evidenciar una disminución alúmina (Al_2O_3) y calcio (Ca), junto con una leve concentración de hierro (Fe), lo que significa que se oxidan fases ferrosas y se tiene una pérdida de volátiles. La fracción granulométrica de 106 µm muestra un mayor contenido de hierro (Fe) y menor de sílice mientras que la fracción de 150 µm evidencia una distribución más pareja ([Anexo 10.2.4](#)).

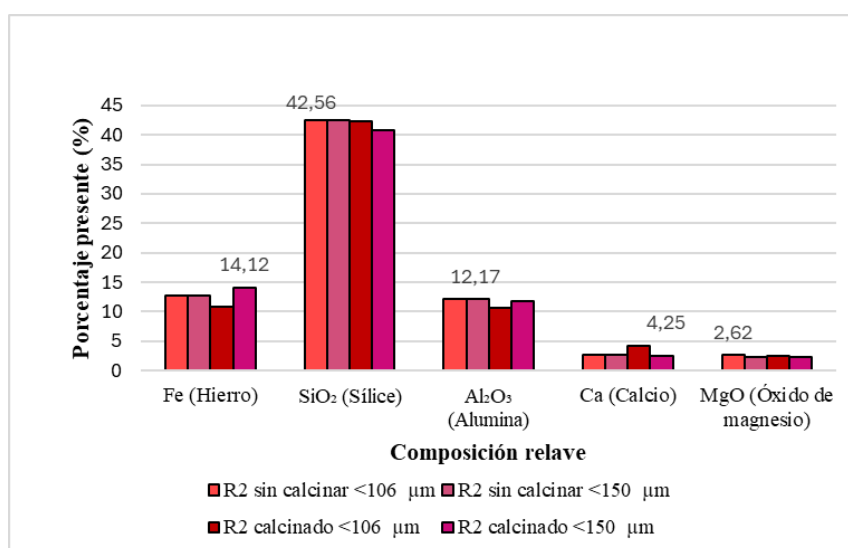


Figura 13. Composición mayoritaria de relave 2

Los resultados observados en la Figura 13 del Relave 2 indican una menor concentración de hierro (Fe) y mayor contenido de sílice, lo que sugiere una estructura de silicato. La calcinación genera una ligera disminución de calcio (Ca) y magnesio (Mg), por lo cual se refleja una descomposición de carbonato y deshidratación de arcilla, en cambio, el material sin calcinar conserva calcio (Ca) y alúmina (Al_2O_3) lo que favorece la reacción puzolánica. La fracción de 106 μm presenta una composición más pareja y concentrada en hierro (Fe), mientras que la de 150 μm es más variable, lo que implica una menor liberación de mineral ([Anexo 10.2.4](#)).

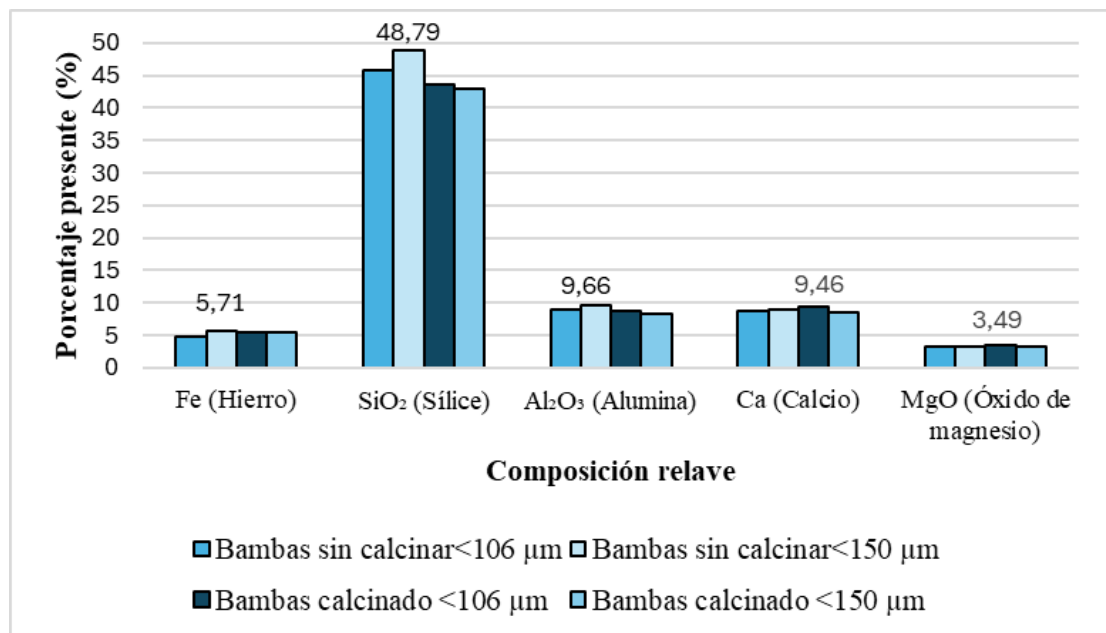


Figura 14. Composición mayoritaria de relave bambas

En los resultados del Relave Bambas presentados en la Figura 14, se tiene una composición mayoritaria de hierro (Fe) y sílice (SiO₂), con menores proporciones de alúmina (Al₂O₃) y calcio (Ca). El material calcinado no altera significativamente el contenido de hierro (Fe), pero reduce el contenido de calcio (Ca) y alúmina (Al₂O₃). En cuanto a la granulometría, la fracción de 106 μm muestra un mayor contenido de hierro (Fe) en comparación a 150 μm , lo que refleja una mayor liberación de mineral en partículas finas ([Anexo 10.2.4](#)).

4.3. Dosificación y ensayo de Cono de Abrams

4.3.1. Definición de dosificación y rótulo

La dosificación establece las proporciones exactas que se usaron de cemento, agua y relave, determinando la relación agua cemento a utilizar. En lo que respecta al mortero de control, se utilizó una relación agua/cemento de 0,55, mientras que para las mezclas se decidió una sustitución parcial de cemento utilizando un 10%, 15% y 20% de reemplazo. El reemplazo se hace mezclando relave calcinado y molido en distintos porcentajes, de modo que el 10% de reemplazo contiene un 5% de relave calcinado junto a un 5% de relave molido, el 15% contiene un 5% de relave calcinado y un 10% de relave molido, y el 20% contiene un 10% de relave calcinado y un 10% de relave molido, esto se puede apreciar visualmente en la Tabla 8. Esto se repite con cada relave utilizando la fracción de 106 μm y la de 150 μm .

Tabla 8. Dosificación por cada relave

%Total reemplazo	% reemplazo calcinado	% reemplazo molido	cemento(g)	Áridos finos (g)	agua(g)
10	5	5	450	1000	275
15	5	10	425	1000	275
20	10	10	400	1000	275

El rótulo para identificar la muestras se resume en la Tabla 9 y consiste en: La primera letra del nombre del relave junto al número que lleve, como es el caso de Relave 1 y 2, al lado la fracción 106 μm o 150 μm según corresponda, el porcentaje de reemplazo calcinado junto a RC1000 que corresponde a los grados que se calcinó el material, una barra diagonal y el porcentaje de reemplazo molido junto a RC15 que es la cantidad de minutos que se molió la muestra, a modo de ejemplo se tiene el 10% de los Relaves Bambas, Relave 1 y Relave 2 a 106 μm .

Tabla 9. Ejemplo de cómo esta rotulado cada relave

B106_5RC1000/5RC15m
R1_106_5RC1000/5RC15m
R2_106_5RC1000/5RC15m

4.3.2. Ensayo de cono de Abrams

La elaboración de las mezclas para probetas de mortero se inició con el pesaje en una balanza digital de cada uno de los materiales a utilizar para garantizar que se cumpla exactamente con las dosificaciones, posteriormente se mezcló en una batidora eléctrica de eje vertical siguiendo el procedimiento y tiempos estipulados en la norma NCh158 [14].

Inmediatamente después del mezclado se procedió a evaluar la trabajabilidad de cada una de las dosificaciones mediante el ensayo de cono de Abrams, siguiendo la normativa de NCh1019 [15] para evaluar la consistencia del mortero fresco. El procedimiento se puede visualizar en la Figura 15 y consistió en rellenar el molde cónico en 3 capas hasta llenarlo por completo de mezcla, compactando cada una con un pisón para garantizar que la mezcla se distribuya uniformemente y evitar que exista aire, posteriormente se retira el molde provocando la expansión de la mezcla, se utilizan dos reglas, una se ubica sobre el molde y la mezcla en horizontal, la otra se ubica en el centro de la mezcla para interceptar la otra regla para medir exactamente cuánto cae respecto a la altura del molde ([Anexo 10.3.1](#)).

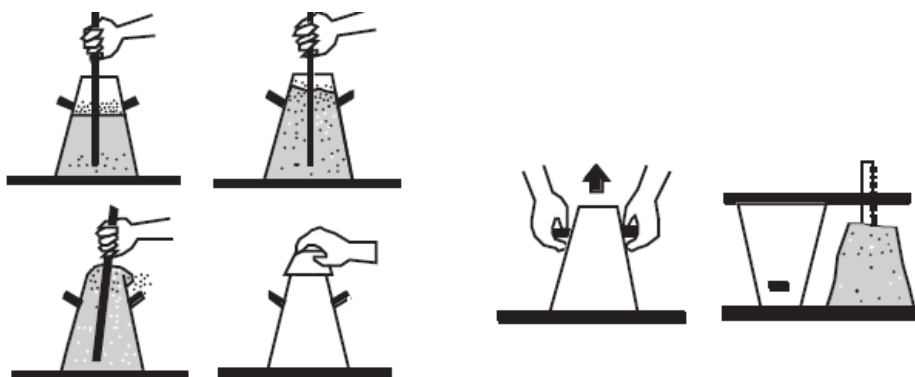


Figura 15. Procedimiento ensayo de cono de Abrams [31]

4.4. Elaboración y ensayos mecánicos a morteros

4.4.1. Fabricación de probetas

La fabricación de las probetas prismáticas se realizó utilizando el mortero fresco que se obtuvo para realizar el ensayo de cono de Abrams con la finalidad de asegurar sus propiedades como el asentamiento. El mortero se vació directamente en moldes

prismáticos de acero de medidas 40 x 40 x 160 mm previamente aceitados con una breve capa, llenando de a tres capas con una espátula con movimientos de ida y vuelta, para posteriormente depositar el molde en una mesa vibratoria unos 10 segundos para que se distribuya bien la mezcla y no queden burbujas de aire. Finalmente, se enrasa el mortero con una regla metálica para quitar residuos de mezcla y se lleva a una mesa para ser cubierto con una lámina plástica para el fraguado inicial de 24 horas ([Anexo 10.4.1](#)).

4.4.2. Fraguado y desmolde

El desmolde de las probetas se realizó a las 24 horas posteriores al vaciado en los moldes, las probetas permanecieron en una zona a temperatura y humedad ambiente para asegurar el fraguado, se retiró cuidadosamente las paredes del molde sin aplicar fuerza extrema con la finalidad de que no se generaran fisuras. Posterior al desmolde, se identificó cada probeta con su rótulo correspondiente.

4.4.3. Curado

Posteriormente, se lleva cada una de las probetas a curado por inmersión a una piscina con agua a 23°C aproximadamente y saturada con cal, por distintos periodos de tiempo: 28, 56 y 84 días. Este procedimiento se puede observar en la Figura 16:

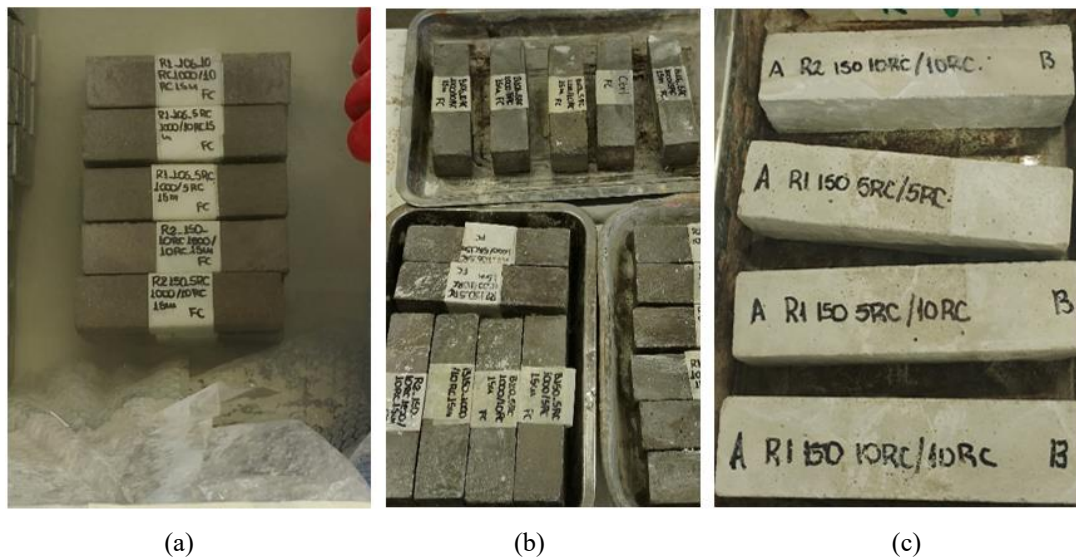


Figura 16. a) Probetas en piscina de curado. (b) Probetas retiradas de piscina de curado. (c) Probetas secadas posterior a curado

Luego del curado, se retiraron las probetas y se depositaron en bandejas metálicas para introducirlas a un horno a 110°C para el proceso de secado ([Anexo 10.4.2](#)).

4.4.4. Densidad

La densidad de las probetas se determinó tras la etapa de curado y secado de las muestras, primero se realizó la medición de ocho mediciones por probeta con un pie de metro, dos largos (a), dos anchos (b) y cuatro alturas (h) respectivas para calcular su volumen con los promedios de cada una. Posteriormente se pesó cada probeta en una balanza de precisión para así poder calcular la densidad ([Anexo 10.4.2](#)), como:

$$V = a \cdot b \cdot h \quad (4)$$

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (5)$$

Donde se tiene que:

- m: masa de la probeta en gramos.
- V: volumen de la probeta en metro cúbico.

4.4.5. Ensayo de flexión

Una vez calculada la densidad de las probetas se procedió a evaluar la resistencia a la flexión siguiendo las especificaciones del método de carga en tres puntos que se tiene en la norma ASTM C78/C78M y NCh158 [14]. El ensayo se realiza utilizando la prensa MULTISPEED 34-V0107 que se puede apreciar en la Figura 17, donde la probeta se deposita en el equipo y se aplica una carga constante en el centro hasta alcanzar la rotura, donde se cuantifica la capacidad del mortero para resistir esfuerzos de tracción directa.



(a)



(b)

Figura 17. (a) Probeta quebrada durante ensayo de flexión. (b) Probetas posteriores al ensayo de flexión.

4.4.6. Ensayo de compresión

Luego de realizar el ensayo de flexión, se toman las dos mitades identificadas como A y B resultantes de la ruptura para usarlas en el ensayo de compresión, cumpliendo con lo estipulado en la norma NCh158 [14] y utilizando el equipo MATEST C088-11N. Las secciones quebradas se posicionaron entre las placas de carga de la prensa asegurando que las superficies de rotura quedaran orientadas hacia las placas de carga para garantizar una distribución uniforme, se selecciona un gradiente de 1,5 MPa/seg y un área de 2000 mm², el procedimiento es visible en la Figura 18.



(a)



(b)

Figura 18. (a) Probeta quebrada en ensayo de resistencia a compresión. (b) Probeta resultante posterior a ensayo.

5. Resultados

En el presente capítulo se detallan los resultados obtenidos del ensayo de cono de Abrams, el cálculo de densidad y los ensayos de resistencia mecánica de los morteros con reemplazo parcial, particularmente, mezclas con un 10%, 15% y 20% de reemplazo evaluadas a 28, 56 y 84 días de curado.

5.1. Ensayo de cono de Abrams

Se evaluó la trabajabilidad de cada una de las dosificaciones mediante el ensayo de cono de Abrams siguiendo la normativa de NCh1019 [15] para evaluar la consistencia del mortero fresco, obteniendo los siguientes resultados.

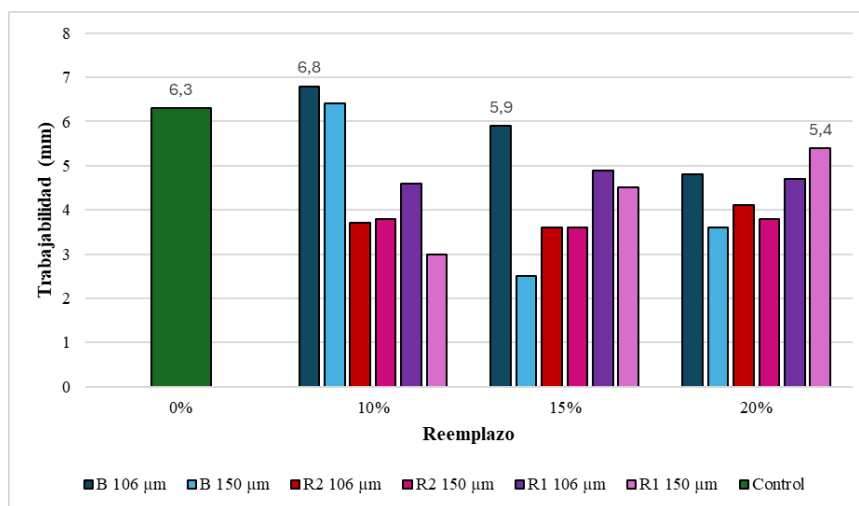


Figura 19. Variación de trabajabilidad según porcentaje de reemplazo

De acuerdo con la Figura 19, el comportamiento de la trabajabilidad no siguió una tendencia decreciente uniforme, sino que varió significativamente según el material y su granulometría. El Relave Bambas registró los niveles de fluidez más altos con un 10% de reemplazo superando al control que alcanzó los 6,3 mm, no obstante, la fracción de 150 µm experimentó una caída abrupta al incrementar la sustitución al 15%. Por otro lado, el Relave 1 mostró una marcada sensibilidad granulométrica al 10% de reemplazo, donde la fracción de 150 µm obtuvo una trabajabilidad considerablemente menor en comparación con la de 106 µm. En contraste, el Relave 2 obtuvo los valores de trabajabilidad más bajos en todos los porcentajes evaluados. Estos hallazgos demostraron que el desempeño de las mezclas dependió de la interacción entre el origen del relave, su distribución de tamaño de partícula y el porcentaje de reemplazo.

5.2. Densidad

Se realizó el cálculo de densidad con las dimensiones de las probetas y su masa, obteniendo los siguientes resultados a 28, 56 y 84 días respectivamente:

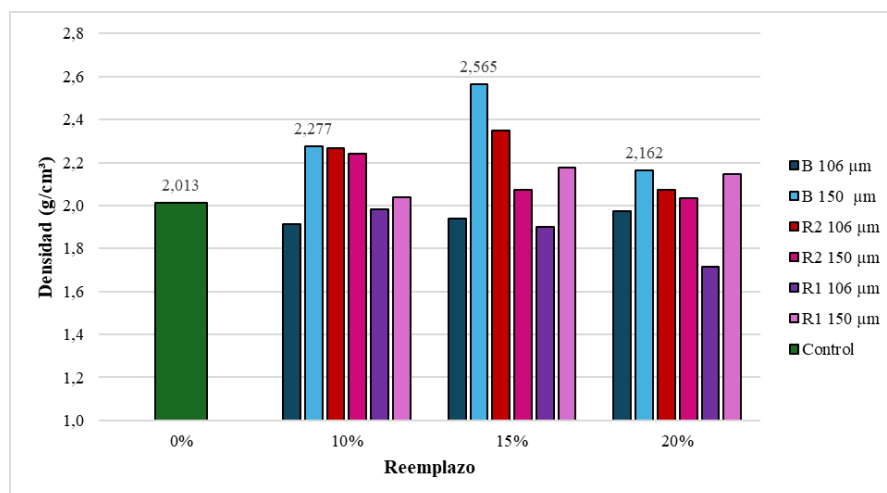


Figura 20. Variación de densidad a 28 días de curado

En la Figura 20 se presenta el gráfico de variación de la densidad a 28 días de curado, donde se observa que la mayoría de las mezclas incrementa su densidad respecto al control, el cual alcanza un valor de 2,013 g/cm³. En general, las densidades aumentan hasta un 15% de reemplazo, destacándose el Relave Bambas de 150 µm, que alcanza el valor máximo de 2,565 g/cm³. Este comportamiento se asocia a una mejor compactación del material y a una disminución de la porosidad, producto del efecto de relleno generado por las partículas finas del relave.

No obstante, el gráfico también evidencia comportamientos no lineales o erráticos entre algunas mezclas, particularmente al comparar distintos tipos de relave y granulometrías para un mismo porcentaje de reemplazo. Estas variaciones se atribuyen a la interacción simultánea de múltiples factores, tales como la distribución granulométrica, la forma de las partículas, la heterogeneidad del material de reemplazo y la eficiencia del empaquetamiento en la matriz cementicia. A partir del 20% de reemplazo, se observa en varias mezclas una leve disminución de la densidad, lo que sugiere que un contenido excesivo de relave puede afectar negativamente la compactación y favorecer la retención de aire.

En términos generales, a los 28 días de curado el Relave Bambas presenta el mejor desempeño en densidad, seguido del Relave 2 y, finalmente, del Relave 1. Este comportamiento y las fluctuaciones observadas serán analizados en conjunto con los resultados obtenidos a 56 y 84 días de curado, con el fin de evaluar la influencia de la edad de curado en la estabilización y evolución de la densidad del material.

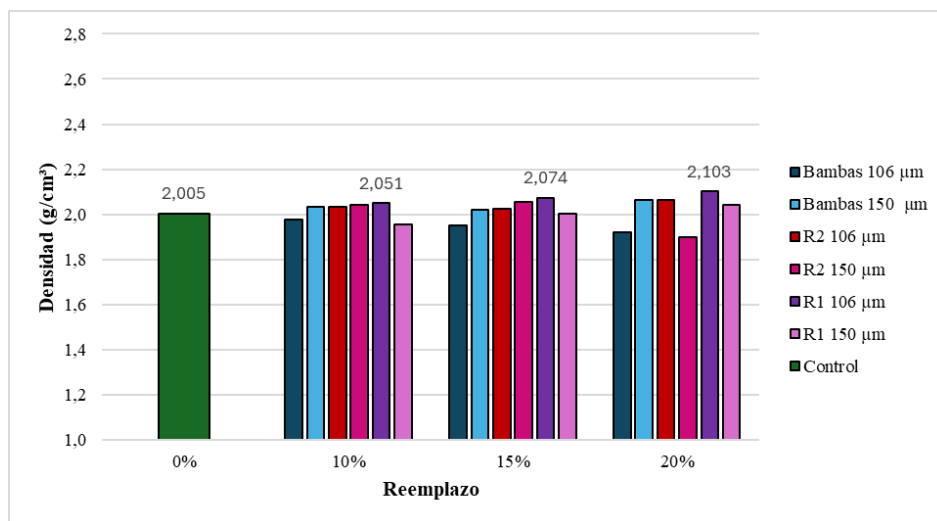


Figura 21. Variación de densidad a 56 días de curado

En la Figura 21, el gráfico de variación de densidad posterior a 56 días de curado muestra que se mantiene el aumento de las mezclas respecto al control que en este caso alcanza los 2,005 g/cm³, alcanzando su valor máximo el relave 1 106 μm al 20% de reemplazo con 2,103 g/cm³. Este incremento sostenido indica una mayor compactación y menor porosidad al avanzar el curado, lo que se atribuye al efecto relleno de partículas finas y a reacciones puzolánicas tardías que densifican la matriz. A diferencia de los 28 días de curado donde la densidad se estabilizaba luego del 15% de reemplazo, a los 56 días se evidencia una mejor consolidación. En general, el Relave 1 presentó los valores de densidad más altos, seguido de Bambas y el Relave 2.

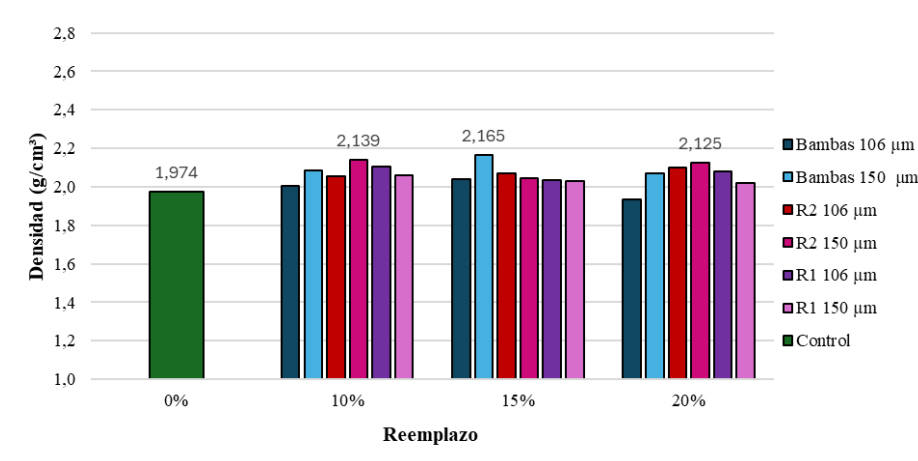


Figura 22. Variación de densidad a 84 días de curado

En la Figura 22, el gráfico de variación de densidad posterior a 84 días de curado muestra que la densidad de las mezclas sigue aumentando respecto al control que alcanza los 1,974 g/cm³, el mejor desempeño lo alcanza el Relave Bambas 150 µm al 15% con 2,165 g/cm³, lo que refleja una mayor compactación y reducción de porosidad. A partir del 20% de reemplazo la densidad se mantiene estable, lo que sugiere que se alcanza un equilibrio estructural sin efectos de exceso de relave. El aumento general respecto a los 56 días de curado indica una mayor densificación con el tiempo de curado, generado por la evolución de las reacciones puzolánicas. Nuevamente, el Relave Bambas presenta el mejor desempeño, seguido por el Relave 2 y el Relave 1.

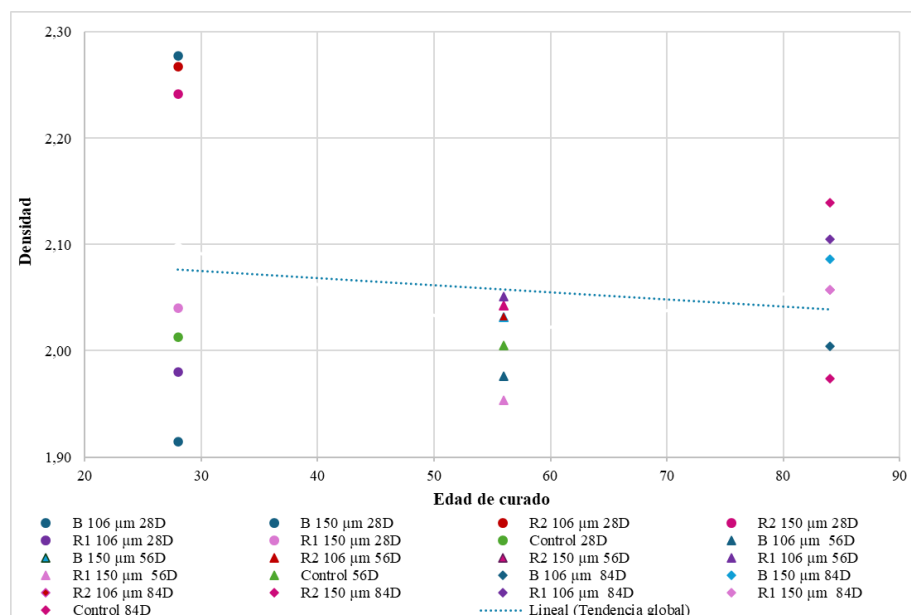


Figura 23. Evolución de la densidad en función de la edad de curado para las distintas mezclas

La Figura 23 presenta la evolución de la densidad de las distintas mezclas a 28, 56 y 84 días de curado mediante un gráfico de dispersión con puntos y línea de tendencia global promedio. En la representación, los círculos corresponden a 28 días, los triángulos a 56 días y rombos a 84 días, lo que permite distinguir el comportamiento de las mezclas. Los resultados evidencian que la densidad tiende a incrementarse con la edad de curado, en concordancia con los gráficos de barras anteriores, lo que se asocia a una progresiva densificación de la matriz por el efecto de una mejor compactación y del desarrollo de reacciones puzolánicas tardías. La dispersión observada refleja la influencia del tipo de relave, la granulometría y porcentaje de reemplazo, destacando con mejores desempeños los rangos intermedios de sustitución.

5.3. Ensayo de flexión

Las probetas se sometieron al ensayo de flexión para determinar su resistencia para obtener los siguientes resultados a 28, 56 y 84 días.

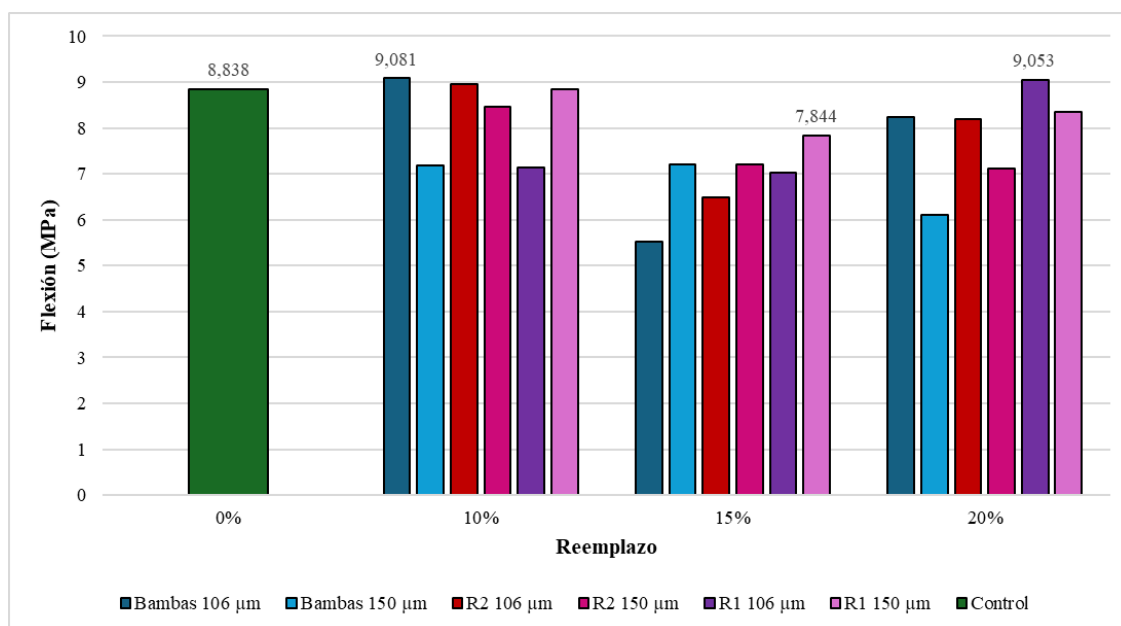


Figura 24. Resistencia a flexión a 28 días de curado

Según lo apreciado en la Figura 24, el gráfico de resistencia a flexión de probetas posterior a 28 días de curado muestra que el control alcanza una resistencia de 8,838 MPa, mientras que al 10% de reemplazo se observó un incremento de resistencia, destacando las muestras Bambas 106 μm , Relave 2 106 μm y Relave 1 150 μm con los

valores 9,081 MPa, 8,965MPa y 8,838 respectivamente, lo que sugiere que una adición moderada y pareja de material calcinado y molido puede mejorar la cohesión y densificación de la matriz cementante. Al aumentar el porcentaje de reemplazo a 15% se evidenció una disminución general de la resistencia, obteniendo un valor máximo de 7,844 MPa alcanzado por el Relave 1 a 150 μm . Finalmente, con un 20% de reemplazo se observó una recuperación de la resistencia, destacando el Relave 1 a 106 μm con 9,053 MPa que son superiores a los 8,838MPa del control.

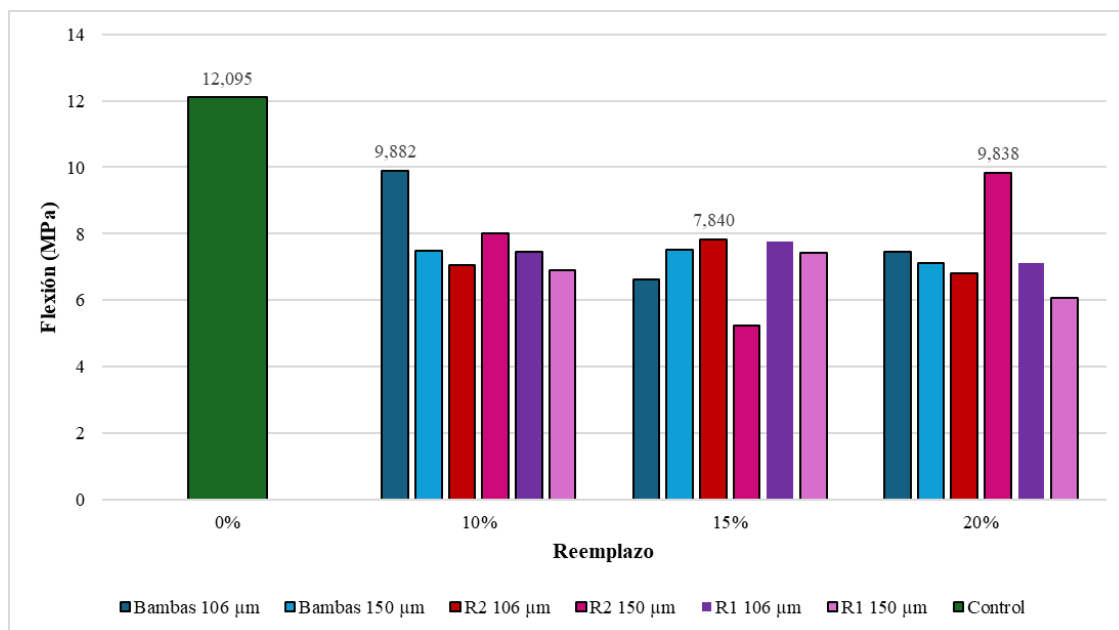


Figura 25. Resistencia a flexión a 56 días de curado

La Figura 25 presenta el gráfico de resistencia a flexión de probetas con 56 días de curado, donde se visualiza una disminución respecto al control que alcanzó los 12,095 MPa. En el reemplazo de 10% las resistencias varían de los 7 a los 9,9 MPa, donde destaca nuevamente el Relave Bambas a 106 μm con 9,882 MPa lo que indica que una finura adecuada del material contribuye a una mejor compactación. Sin embargo, al incrementar el reemplazo a 15% se observó una caída generalizada en la resistencia de los 5 a 7,9 MPa, donde el Relave 2 a 106 μm obtuvo el mejor desempeño con 7,840 MPa. Finalmente, con un 20% de reemplazo se evidencia una recuperación parcial en la resistencia, destacando el Relave 1 a 150 μm con 9,838 MPa que se aproxima a los

valores obtenidos a 10%, lo que sugiere que los efectos de una dosificación pareja de material tratado térmica y mecánicamente pueden mejorar la resistencia de las probetas.

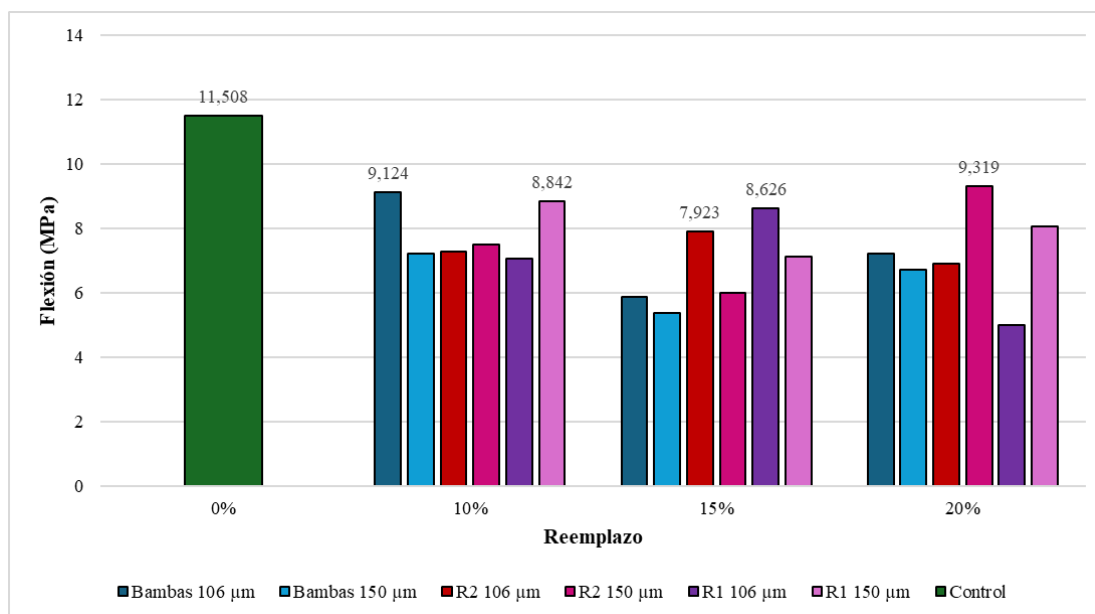


Figura 26. Resistencia a flexión a 84 días de curado

La Figura 26 muestra el gráfico de resistencia a flexión de probetas con 84 días de curado, donde se aprecia una tendencia estable en comparación a los anteriores, el control alcanzó los 11,508 MPa. Con un 10% de reemplazo, las resistencias se mantuvieron entre los 7 y los 9,1 MPa, donde el Relave Bambas a 106 µm y el Relave 1 a 150 µm tienen los mejores desempeños con 9,124 MPa y 8,842 MPa respectivamente. En un 15% de reemplazo se observa una recuperación respecto a los valores obtenidos a 56 días de curado, alcanzando los 8,626 MPa con el Relave 1 a 106 µm y los 7,923 MPa con el Relave 2 a 106 µm, lo que indicaría que a mayores edades se desarrollan reacciones secundarias que favorecerían la estructura interna y por consecuencia la resistencia. Finalmente, con un 20% de reemplazo nuevamente se alcanzan valores de resistencia que superan los obtenidos a 56 días de curado, con un máximo de 9,319 MPa del Relave 1 a 150 µm. [\(Anexo 10.5.1\)](#)

5.4. Ensayo de compresión

Con el fin de evaluar el comportamiento mecánico de las mezclas con distintos tipos de relave, granulometrías y porcentajes de reemplazo, se realizaron ensayos de resistencia a

compresión en probetas curadas a 28, 56 y 84 días. A continuación se presentan los resultados obtenidos para cada edad de curado.

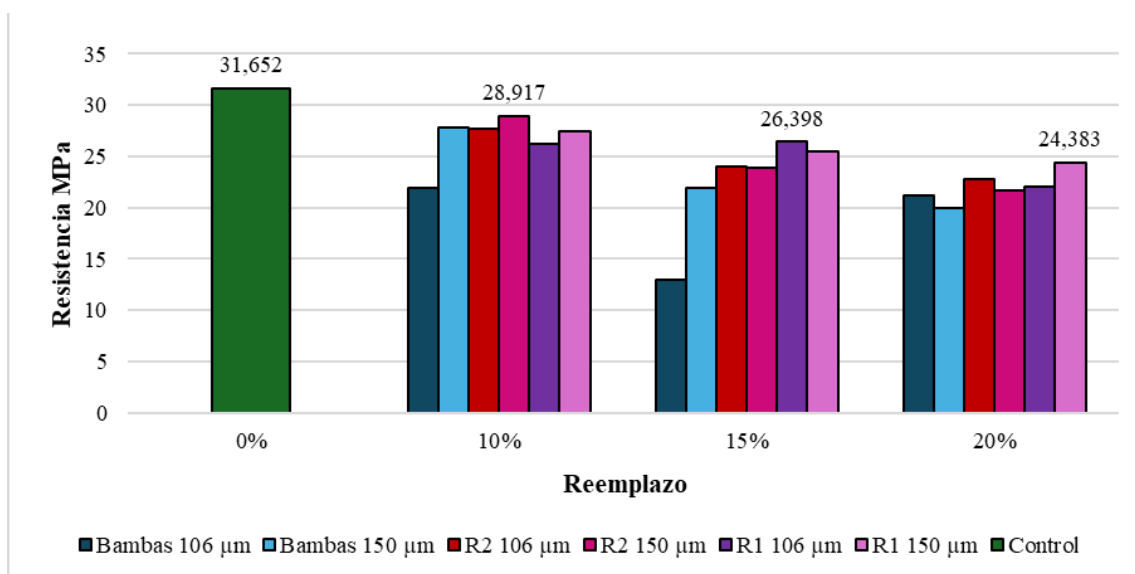


Figura 27. Resistencia a compresión a 28 días de curado

La Figura 27 evidenció una caída progresiva en la resistencia a la compresión conforme aumenta el porcentaje de reemplazo con relaves respecto al control que obtiene una resistencia de 31,652 MPa. A un 10% de reemplazo, las muestras mantienen resistencias altas como el Relave 2 a 150 μm con 28,917 MPa y el Relave Bambas a 150 μm con 27,819 MPa, lo que indica una cohesión adecuada que concuerda con el aumento de densidad de las probetas de estos relaves. Sin embargo, a un 15% y 20% de reemplazo las resistencias disminuyen de forma significativa a 24-26 MPa, lo que se asocia con una mayor porosidad o menor cantidad de geles C-S-H formado. Se destaca que el 10% de reemplazo constituye un punto óptimo donde densidad, trabajabilidad y resistencia se equilibran ([Anexo 10.5.2](#)).

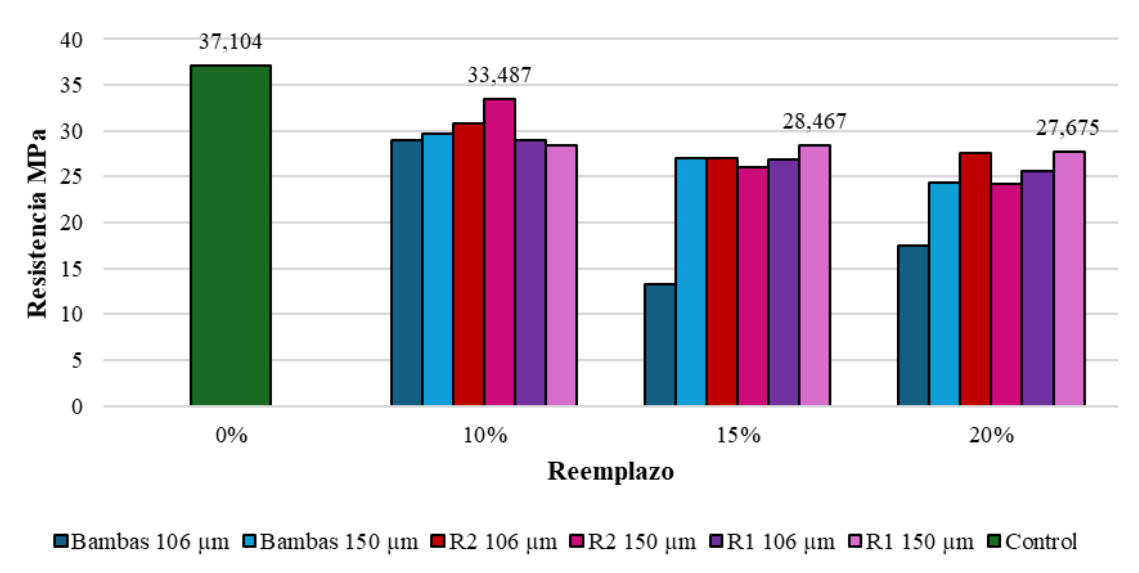


Figura 28. Resistencia a compresión a 56 días de curado

La Figura 28 contiene el gráfico de resistencia a compresión a 56 días de curado, el cual mostró una tendencia similar a la observada a 28 días, pero con un aumento en las resistencias, lo que denota la evolución de la hidratación y las reacciones puzolánicas tardías. El control mantuvo la mayor resistencia con 37,104 MPa mientras que las mezclas con reemplazo alcanzan valores entre los 27 y los 33 MPa. Con un 10% de reemplazo, se destaca el Relave 2 a 150 μm con 33,487 MPa y a 106 μm con 30,860 MPa. A medida que el porcentaje de reemplazo aumenta a un 15% y 20% la resistencia tiende a disminuir, pero menos drásticamente que lo obtenido a 28 días de curado, lo que sugiere una recuperación parcial del desempeño mecánico con un mayor tiempo de curado. Esto puede explicarse por una actividad puzolánica tardía que compensa la pérdida inicial de geles C-S-H. Se mantiene que el 10% de reemplazo es el óptimo ([Anexo 10.5.2](#)).

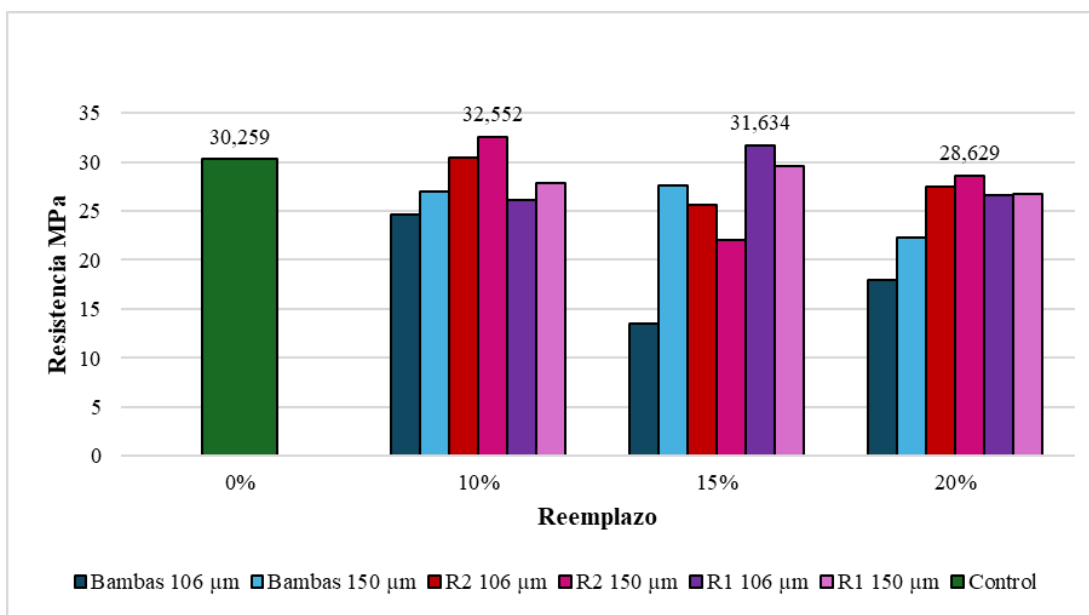


Figura 29. Resistencia a compresión a 84 días de curado

En la Figura 29, el gráfico de 84 días de curado mostró un comportamiento significativo, ya que varias mezclas superaron o igualaron el control que alcanza los 30,259 MPa, lo que indica una reactivación puzolánica marcada en edades avanzadas. El caso más destacado corresponde a un 10% de reemplazo con el Relave 2 a 150 µm que alcanza los 32,552 MPa siendo el mayor de todas las mezclas y porcentajes de reemplazo. Se observaron resultados cercanos al control en mezclas con 15% de reemplazo, particularmente con el Relave 1 a 106 µm con 31,634 MPa y a 150 µm con 29,618 MPa. Sin embargo, con un 20% de reemplazo la resistencia es menor que el valor obtenido por el control con 28,659 MPa de parte del Relave 2 a 150 µm, pero sigue siendo mayor a 28 MPa lo que es una pérdida de resistencia menos significativa que la obtenida a 28 o 56 días de curado ([Anexo 10.5.2](#)).

En general, al comparar los resultados de resistencia a compresión a 28, 56 y 84 días de curado se observa que existe una tendencia a incrementar progresivamente los resultados mecánicos de las muestras con el aumento de tiempo de curado, lo que permite confirmar que los relaves presentan una actividad puzolánica retardada ([Anexo 10.5.2](#)).

5.5. Influencia de la densidad del mortero en el desarrollo de resistencia mecánica

La relación entre la densidad y la resistencia a compresión se evaluó mediante gráficos de dispersión para las edades de 28, 56 y 84 días, en las Figuras 29, 30 y 31 respectivamente, incorporando todas las mezclas correspondientes al mortero de control y a los con reemplazo de relave provenientes de Bambas , Relave 1 y Relave 2, en granulometrías de 106 μm y 150 μm . En los tres periodos analizados se observó una tendencia positiva consistente, lo que indica que los morteros que presentan mayores valores de densidad desarrollan resistencias a compresión más altas. Esta relación se mantiene y fortalece conforme aumenta la edad de curado, lo que está asociado a la progresión del proceso de hidratación del cemento y a la consolidación de la matriz cementicia.

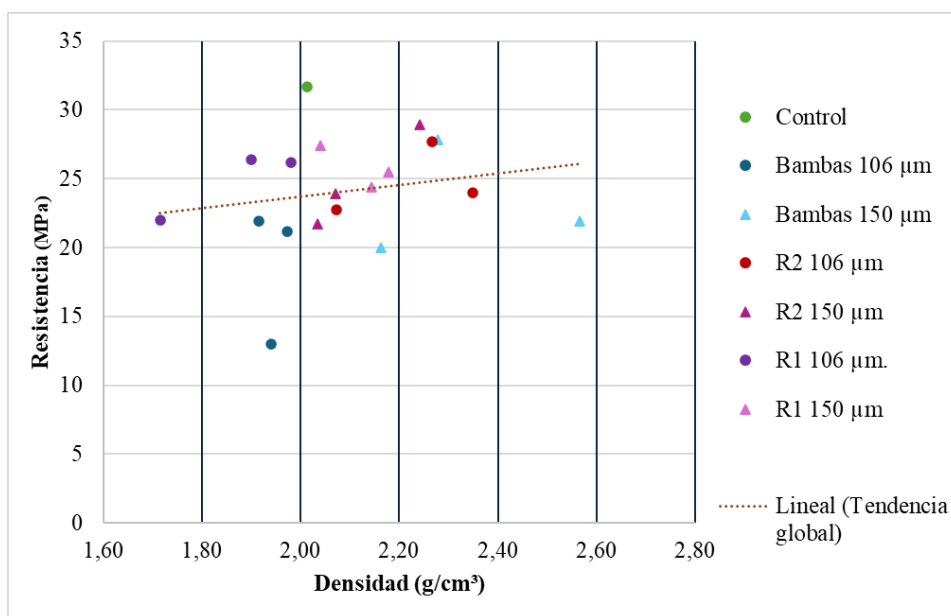


Figura 30. Correlación entre densidad y la resistencia a compresión a 28 días

Según la Figura 30, a los 28 días los resultados mostraron la mayor dispersión del conjunto de datos densidades entre aproximadamente 1,72 y 2,56 g/cm³ y resistencias que fluctuaron entre 13 y 32 MPa. El mortero control se posicionó en la zona superior del gráfico, con la mayor densidad y resistencia, sirviendo como referencia. Las mezclas elaboradas con el Relave Bambas en 106 μm presentaron los valores más bajos tanto en densidad como de resistencia, evidenciando un empaquetamiento menos eficiente y una mayor porosidad en la matriz. Por el contrario, los Relaves 1 y 2, en ambas

granulometrías, se agruparon en torno a la tendencia global, mostrando un comportamiento más estable y coherente con el incremento de resistencia observado en morteros con densidades superiores a 2,00 g/cm³.

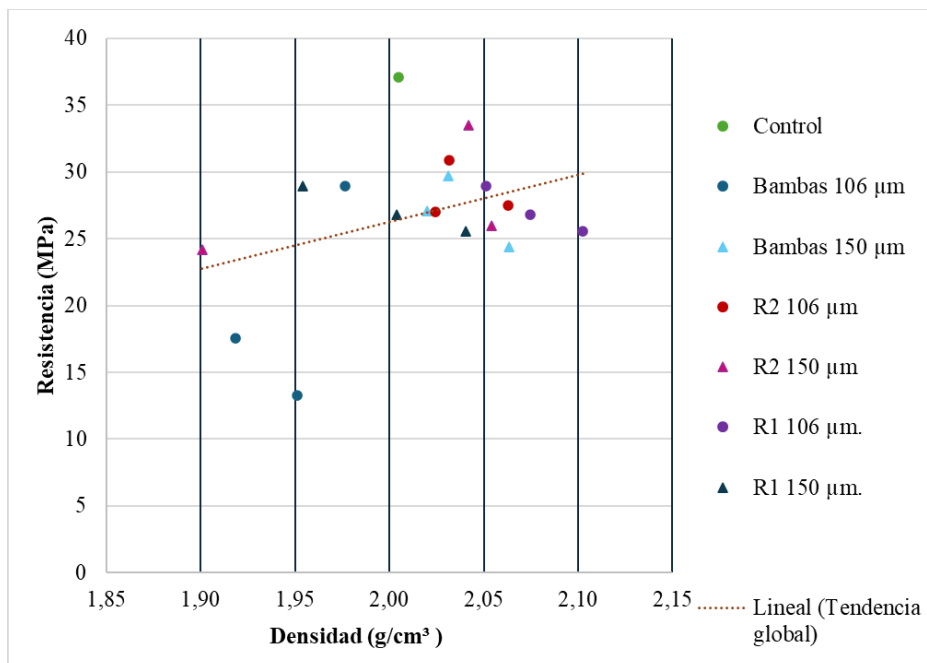


Figura 31. Correlación entre densidad y la resistencia a compresión a 56 días

Según la Figura 31, a los 56 días la nube de puntos se volvió más compacta y la tendencia positiva fue más evidente. El aumento generalizado de las resistencias sugiere un avance del proceso de hidratación y una reducción de las diferencias iniciales entre las mezclas. En este periodo, los morteros elaborados con el Relave 2, tanto en 106 μm como en 150 μm, se ubicaron entre los de mayor resistencia, superando en varios casos los 30 MPa. Las mezclas con Relave Bambas continuaron mostrando dispersión y valores inferiores, especialmente en la fracción 106 μm, lo que indica una menor contribución al empaquetamiento y densificación del material.

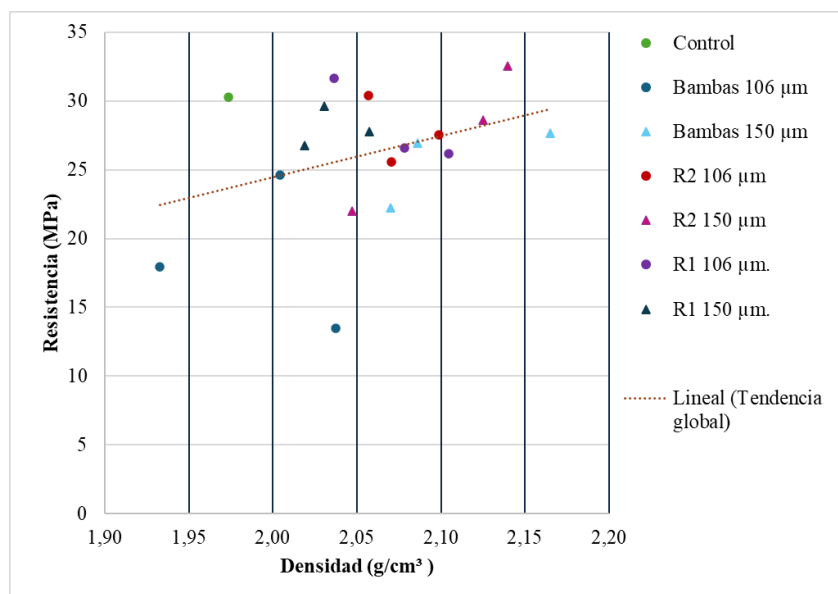


Figura 32. Correlación entre densidad y la resistencia a compresión a 84 días

Según la Figura 32, a los 84 días se observó una estabilización del comportamiento y una correlación positiva más definida entre densidad y resistencia. La mayoría de las mezclas concentraron densidades entre los 1,93 y 2,17 g/cm³ junto a resistencias superiores a 25 MPa. En esta etapa, las mezclas de Relave 1 y 2 mantuvieron altos resultados, ubicándose en la parte superior del gráfico y confirmando su capacidad para generar matrices más compactas y resistentes a medida que aumenta la edad de curado. El Relave Bambas en 106 µm continuó siendo el material con menor densificación y menor desempeño mecánico, mientras que su fracción 150 µm mostró valores intermedios comparables a los del Relave 1.

En términos generales, los resultados indican que la densidad del mortero está relacionada con su resistencia a compresión y esta relación se robustece con el tiempo. Los Relaves 1 y 2 mostraron un comportamiento más favorable, caracterizado por una mejor capacidad de relleno fino y mayor contribución al empaquetamiento granular, lo que se tradujo en resistencias más altas y menor dispersión en las edades de curado estudiadas. Por el contrario, el Relave Bambas, especialmente en la fracción 106 µm, presentó un desempeño inferior debido a su menor eficacia para compactar la matriz del mortero. Todo esto indica que el proceso de hidratación y la estructura interna del mortero están influenciadas fuertemente por la densidad y esta se correlaciona directamente con el desarrollo mecánico. Bambas mostró un buen desempeño en densidad en la fracción 150 µm, mientras que su fracción 106 µm mantuvo valores más bajos.

6. Discusión

El análisis de los resultados obtenidos a lo largo del estudio permite establecer que la aplicación de tratamientos térmicos y mecánicos sobre relaves provenientes de yacimientos de tipo pórfido cuprífero ricos en hierro modifica su estructura mineralógica y potencia su comportamiento dentro de los morteros. Estos hallazgos son coherentes con lo reportado en la literatura especializada. En particular, se ha demostrado que tanto el tratamiento térmico como la molienda inducen procesos de deshidroxilación, colapso parcial de la estructura cristalina y formación de fases amorfas más reactivas, lo que incrementa significativamente la actividad del material activado [9]. Este efecto es consistente con la reactividad observada en los relaves tratados en este estudio, donde se evidenció una mayor participación en las reacciones de hidratación y en la formación de productos secundarios, tales como el gel C-S-H, generado a partir de la reacción entre silicatos amorfos del relave y la portlandita liberada durante la hidratación del cemento. Asimismo, se observó la formación de fases C-A-H y C-A-S-H derivadas de la reacción de aluminatos amorfos con Ca(OH)_2 . En presencia de sulfatos y carbonatos, se generó una menor cantidad de etringita y carbonato-aluminatos, lo que contribuye a la densificación de la microestructura, a la reducción de la porosidad y a la mejora del desempeño mecánico del mortero.

El tratamiento térmico aplicado a 1000 °C durante 15 minutos generó la deshidroxilación de los minerales presentes en los relaves, provocando un desorden estructural que dio origen a fases amorfas más reactivas. Este comportamiento coincide con los mecanismos descritos previamente, donde se indica que la pérdida de hidroxilos y la ruptura de enlaces estructurales facilitan la reactividad frente a la portlandita y aumentan la capacidad de formar geles C-S-H secundarios [9]. De forma paralela, la molienda mecánica durante 15 minutos permitió incrementar la superficie específica de las partículas del relave, favoreciendo su interacción con el cemento y mejorando la cohesión interna del mortero. Este fenómeno concuerda con lo reportado en estudios donde la activación mecánica incrementa drásticamente el área superficial de los relaves y mejora su capacidad de reaccionar con Ca(OH)_2 [36]. De esta manera, los relaves actuaron como materiales puzolánicos capaces de reaccionar con la portlandita liberada durante la hidratación del cemento y contribuir a la formación de gel C-S-H, tal como se ha descrito para sistemas sometidos a molienda intensiva, donde la ruptura

de las estructuras de silicatos fomenta la generación de sitios reactivos responsables de la actividad puzolánica [37].

El análisis mineralógico confirmó que los relaves estaban compuestos principalmente por moscovita, feldespatos y cuarzo, minerales ricos en sílice y alúmina que, una vez activados, pueden reaccionar químicamente dentro de la matriz del mortero. Este comportamiento es consistente con investigaciones que indican que relaves ricos en sílice cristalina pueden volverse parcialmente reactivos tras procesos de activación mecánica [36]. Asimismo, se ha demostrado que incluso minerales tradicionalmente considerados inertes pueden adquirir actividad puzolánica luego de ser sometidos a activación mecánica [9]. Las diferencias observadas entre los tres relaves evaluados fueron evidentes: el Relave Bambas destacó por su mayor densidad y estabilidad, mientras que los Relaves 1 y 2 presentaron un comportamiento más variable, lo que coincide con estudios donde la heterogeneidad composicional genera diferencias significativas en el desempeño de las mezclas [21].

En cuanto a la trabajabilidad, los resultados del ensayo de cono de Abrams mostraron que, a mayor porcentaje de reemplazo, la mezcla presentó una menor fluidez. Este comportamiento concuerda con lo reportado para relaves activados, los cuales reducen la fluidez inicial debido a su mayor absorción de agua y área superficial específica [36]. No obstante, en porcentajes bajos de reemplazo, como el 10 %, la mezcla evidenció una fluidez superior a la del mortero de control, resultado similar al observado en estudios donde reemplazos reducidos de relave mejoran la cohesión y estabilidad sin afectar negativamente la trabajabilidad [21].

La evolución de la densidad fue significativa, ya que las mezclas con reemplazo de relave presentaron valores superiores al control, especialmente a edades avanzadas de curado, lo que indica una menor porosidad y una mayor compactación microestructural. Este comportamiento es consistente con lo reportado en la literatura, donde se demuestra que los relaves activados promueven la densificación de la microestructura mediante el efecto micro-relleno y la formación de C-S-H secundario [36]. De igual manera, se ha señalado que las partículas finas derivadas de una molienda intensiva contribuyen a mejorar la densidad de materiales cementicios [37], lo que respalda los resultados más favorables obtenidos con el Relave Bambas a 150 μm y con el Relave 1 a 106 μm , donde el equilibrio granulométrico resultó determinante.

Respecto a la resistencia mecánica, tanto a flexión como a compresión, se observó una tendencia clara: los morteros con un reemplazo del 10 % alcanzaron resistencias comparables o incluso superiores al control a los 28 días. Este comportamiento concuerda con estudios que reportan mejoras en la resistencia para reemplazos del 10 % con relaves activados, atribuibles al efecto micro-relleno activo y a la reacción puzolánica progresiva [36]. La disminución inicial de la resistencia observada en reemplazos del 15 % y 20 %, seguida de una recuperación a edades de 56 y 84 días, es coherente con el comportamiento puzolánico retardado descrito en la literatura [9, 37]. En contraste, existen estudios donde no se observaron incrementos tardíos de resistencia debido a la ausencia de actividad puzolánica en relaves de cobre, lo que refuerza la conclusión de que los relaves ricos en hierro utilizados en este estudio participaron químicamente en la hidratación, generando productos adicionales que fortalecen la matriz cementicia [21].

De manera particular, el Relave 2 con una granulometría de 150 μm alcanzó una resistencia a la compresión de 33,49 MPa a los 56 días y de 32,55 MPa a los 84 días, superando al mortero de control para esas edades de curado. Este resultado evidencia que, con el tiempo, los relaves activados logran integrarse eficazmente a la matriz cementicia, generando productos de hidratación adicionales y reduciendo la porosidad interna. Un comportamiento similar se observó en la resistencia a flexión, donde las mezclas con un 10 % de reemplazo mantuvieron un desempeño sobresaliente. Estos resultados son coherentes con lo reportado en estudios asociados a la formación progresiva de fases C-S-H y C-A-S-H secundarias [37], y refuerzan lo descrito respecto al fortalecimiento de la interfaz pasta-árido [36].

Finalmente, los resultados permiten afirmar que el rango de reemplazo más favorable se encuentra entre el 10 % y el 15 %, ya que en este intervalo las mezclas mantienen una adecuada trabajabilidad, elevada densidad y resistencias mecánicas comparables o superiores al mortero de control. Reemplazos del 20 % afectan las resistencias iniciales, pero no comprometen de forma significativa su estabilidad a edades posteriores, comportamiento consistente con lo reportado en sistemas de alto desempeño que incorporan relaves activados [36]. En conjunto, el estudio demuestra la viabilidad técnica de reutilizar relaves como materiales cementicios suplementarios, alineándose con principios de economía circular y sustentabilidad ampliamente abordados en la literatura.

7. Conclusiones

En el presente trabajo de investigación se evaluó la factibilidad técnica de utilizar relaves ricos en hierro como reemplazo parcial de cemento en morteros. Para ello, se seleccionaron los relaves Bambas, Relave 1 y Relave 2, los cuales se sometieron a activación térmica mediante calcinación a 1000°C y a activación mecánica mediante molienda por 15 minutos, con el fin de aumentar su reactividad y generar fases amorfas reactivas. Posteriormente, se elaboraron mezclas de morteros con reemplazos del 10%, 15% y 20% combinando relave calcinado y molido según cada uno de los porcentajes y con fracciones de 106 μm y 150 μm respectivamente. En total, se fabricaron 57 probetas que fueron ensayadas en términos de trabajabilidad, densidad, resistencia a flexión y compresión a 28, 56 y 84 días de curado.

Los resultados mostraron que la activación incrementó la finura, superficie específica y el potencial puzolánico de los relaves, especialmente en Bambas y Relave 2. La trabajabilidad disminuyó levemente con mayores porcentajes de reemplazo, mientras que la densidad aumentó en todas las mezclas debido a un efecto relleno más eficiente. En cuanto al desempeño mecánico, las resistencias iniciales fueron inferiores al control, pero a los 84 días los reemplazos del 10% y 15% igualaron o superaron al mortero sin sustitución, evidenciando una actividad puzolánica retardada.

Las conclusiones principales obtenidas en este estudio son:

- El uso de relaves ricos en hierro activados térmica y mecánicamente es técnicamente viable como reemplazo parcial de cemento en morteros.
- La calcinación a 1000°C y la molienda incrementan la reactividad de los relaves al generar fases amorfas y aumentar la superficie específica, lo que favorece la formación de C-S-H y una mayor densificación de la infraestructura.
- La composición mineralógica rica en sílice, hierro y feldespatos otorga a los relaves un potencial puzolánico moderado, que aumenta tras su activación.
- Las diferencias en composición y granulometría explican la variabilidad entre relaves, siendo Bambas y Relave 2 los de mejor desempeño general.
- La trabajabilidad disminuye levemente con mayores porcentajes de reemplazo, asociado a la finura y angularidad de las partículas, aunque el 10% mantiene buena consistencia.

- Todas las mezclas con relaves activados mostraron mayores densidades que el control, lo que permite confirmar un efecto relleno eficiente y progresivo con el tiempo.
- Las resistencias a compresión y flexión aumentan con la edad de curado, destacando los reemplazos del 10% y 15%, debido a que igualan o superan el control a los 84 días, lo que evidenciaría una actividad puzolánica retardada.
- Desde un punto de vista técnico, el uso de relaves contribuye a disminuir pasivos ambientales y potencialmente reducir el consumo de cemento y emisiones de CO₂, promoviendo la economía circular.

8. Recomendaciones

Se recomienda ampliar el estudio hacia porcentajes de reemplazo mayores con el fin de evaluar hasta qué punto es posible incorporar relaves sin comprometer el desempeño mecánico del mortero. Esto permitiría establecer con mayor precisión los límites de sustitución y determinar un umbral a partir del cual las propiedades del relave se ven comprometidas.

Asimismo, resulta pertinente comparar directamente los efectos de activación térmica y mecánica cuando se aplican por separado, además de analizar su efecto combinado. Esto permite que tratamiento es más eficiente según el relave utilizado.

Otro aspecto relevante es la necesidad de realizar estudios a un plazo mayor que 84 días de curado y evaluar su comportamiento frente a condiciones ambientales adversas como humedad, carbonatación o ataques ácidos, que permitan determinar estabilidad y desempeño del material.

De igual modo, se recomienda ejecutar ensayos de lixiviación con el objetivo de asegurar la estabilidad ambiental de los componentes presentes en los relaves y verificar que no exista liberación de metales potencialmente nocivos.

Por último, sería beneficioso visualizar con mayor detalle el comportamiento de los morteros frente a aditivos químicos, su cohesión y fluidez. Lo que permite optimizar su aplicación en obra.

9. Bibliografía

- [1] Alcayaga A, Gutierrez (30 de 4 de 2024). *Research Gate*. Obtenido de Towards Sustainable Shotcrete in Mining A Literature Review on the Utilization of Tailings as a Partial Replacement for Fine Aggregate: https://www.researchgate.net/publication/380194755_Towards_Sustainable_Shotcrete_in_Mining_A_Literature_Review_on_the_Utilization_of_Tailings_as_a_Partial_Replacement_for_Fine_Aggregate
- [2] Alcayaga A, S. A. (4 de 2024). *Research Gate*. Obtenido de Tailings as a Sustainable Resource in 3D Printed Concrete for the Mining Industry: https://www.researchgate.net/publication/380199897_Tailings_as_a_Sustainable_Resource_in_3D_Printed_Concrete_for_the_Mining_Industry_A_Literature_Review
- [3] Alastair M, (19 de 8 de 2024). *Research Gate*. Obtenido de Mineralogical characteristics influence the structure and pozzolanic reactivity of thermally and mechano-chemically activated meta-kaolinites: https://www.researchgate.net/publication/383251827_Mineralogical_characteristics_influence_the_structure_and_pozzolanic_reactivity_of_thermally_and_mechano-chemically_activated_meta-kaolinites
- [4] Lindhorst C, M. P. (28 de 8 de 2025). *Consejo Minero*. Obtenido de Minería en Números: <https://consejominero.cl/mineria-en-chile/mineria-en-numeros/>
- [5] Consejo Minero. (13 de Enero de 2019). *Consejo Minero*. Obtenido de Consejo Minero: Minería en Chile: <https://consejominero.cl/chile-pais-minero/aprende-de-mineria/mineria-en-chile/>
- [6] Consejo Minero. (Abril de 2023). *Consejo Minero*. Obtenido de Consejo Minero: Relaves en más de 280 caracteres : <https://www.consejominero.cl/wp-content/uploads/2023/04/Capitulo-Relaves-Mineria-en-mas-de-280-caracteres.pdf>
- [7] ENNOMOTIVE. (2024). *ENNOMOTIVE* . Obtenido de Producción de cemento: Cómo reducir las emisiones de CO2: <https://www.ennomotive.com/es/produccion-de-cemento/>
- [8] ENNOMOTIVE SL. (2024). *ENNOMOTIVE SL*. Obtenido de Producción de cemento: Cómo reducir las emisiones de CO2: <https://www.ennomotive.com/es/produccion-de-cemento/>
- [9] Geng Y, H. Z. (3 de 1 de 2019). *Springer Nature Link*. Obtenido de Effect of Mechanical Activation on the pozzolanic Activity of Muscovite: <https://link.springer.com/article/10.1007/s42860-019-00019-y>
- [10] Geng Y, Z. W. (1 de 5 de 2021). *Science Direct*. Obtenido de Pozzolanic activity and hydration properties of feldspar after mechanical activation: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0032591021000589>

- [11] Global Cement and Concrete Association. (2025). *Global Cement and Concrete Association*. Obtenido de Natural pozzolans: <https://gccassociation.org/cement-and-concrete-innovation/clinker-substitutes/natural-pozzolans/>
- [12] Gallego H, E. T. (7 de 4 de 2020). *State of the Art: Process of Pozzolan Formation from Ash and its Applications* . Obtenido de State of the Art: Process of Pozzolan Formation from Ash and its Applications : https://www.scielo.cl/pdf/ric/v35n2/en_0718-5073-ric-35-02-119.pdf
- [13] INN Instituto Nacional de Normalización . (22 de 7 de 2013). *NCh 163*. Obtenido de NCh 163: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2020/2/CI5503/1/material_docente/bajar?id=3332212
- [14] INN Instituto Nacional de Normalización. (21 de 8 de 1968). *NCh 158*. Obtenido de NCh 158: <https://tecnohorm.weebly.com/uploads/9/6/2/7/9627075/nch0158-1967.pdf>
- [15] INN Instituto Nacional de Normalización. (26 de 8 de 1974). *NCh 1019*. Obtenido de NCh 1019: <https://tecnohorm.weebly.com/uploads/9/6/2/7/9627075/nch1019-1974.pdf>
- [16] INN Instituto Nacional de Normalización. (1977). *NCh 1038*. Obtenido de NCh 1038: <https://tecnohorm.weebly.com/uploads/9/6/2/7/9627075/nch1038-1977.pdf>
- [17] INN Instituto Nacional de Normalización. (2005). *NCh 409/1*. Obtenido de NCh 409/1: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://ciperchile.cl/pdfs/11-2013/norovirus/NCh409.pdf>
- [18] Instituto Nacional de Normalización (INN),. (1968). *NCh148*. Obtenido de NCh148 “Cemento – Terminología, clasificación y especificaciones generales”: https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2009/2/CI52C/1/material_docente/bajar?id_material=249010
- [19] JOUAV. (31 de Mayo de 2024). *JOUAV*. Obtenido de Mine Tailings: Management, Treatment & Environmental Impact: <https://www.jouav.com/blog/mine-tailings.html>
- [20] L. Little, A. N. (1 de 9 de 2017). *Science Direct*. Obtenido de Fine grinding: How mill type affects particle shape characteristics and mineral liberation: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0892687517301450>
- [21] Gutiérrez M, Gómez R. (17 de 9 de 2024). *Research Gate*. Obtenido de Potential of copper tailings as fine aggregates in cement mortar: https://www.researchgate.net/publication/384803810_POTENTIAL_OF_COPPER_TAILINGS_AS_FINE_AGGREGATES_IN_CEMENT_MORTAR
- [22] Melón Hormigones S.A . (4 de 2020). *Melón Hormigones S.A* . Obtenido de ¿Cómo se debe llevar a cabo el cuidado de probetas en obra?:

https://asesoria.melon.cl/preguntas/download/15/6_COMO_SE_DEBE_LLEVAR_A_CABO_EL_CUIDADO_DE_PROBETAS_EN_OBRA.pdf

- [23] Minería, M. d. (11 de 4 de 2007). *SERNAGEOMIN*. Obtenido de Decreto Supremo N°248: https://www.sernageomin.cl/wp-content/uploads/2023/07/DS248_Reglamento_DepositosRelave.pdf
- [24] Mora, C. A. (10 de 2024). *Repositorio UdeC*. Obtenido de ANÁLISIS DE ESTABILIDAD QUÍMICA Y FÍSICA DE MORTEROS CON SUSTITUCIÓN DE ARENA POR MATERIAL: <https://repositorio.udec.cl/bitstreams/a631aa9b-4ece-4155-8f57-28f4ba18cb54/download>
- [25] N.A, R. M. (31 de 12 de 2007). *SERNAGEOMIN*. Obtenido de Guía técnica de operación y control de depósitos de relaves: <https://www.sernageomin.cl/wp-content/uploads/2018/12/GuiaTecOperacionDepRelaves.pdf>
- [26] Normalización, I. I. (15 de 8 de 1975). *NCh 1017*. Obtenido de NCh 1017: <https://tecnohorm.weebly.com/uploads/9/6/2/7/9627075/nch1017-1975.pdf>
- [27] Normalización, I. I. (7 de 1 de 1977). *NCh 1037*. Obtenido de NCh 1037: <https://tecnohorm.weebly.com/uploads/9/6/2/7/9627075/nch1037-1977.pdf>
- [28] Parlamento Europeo. (24 de Mayo de 2023). *Parlamento Europeo*. Obtenido de Economía circular: definición, importancia y beneficios: <https://www.europarl.europa.eu/topics/es/article/20151201STO05603/economia-circular-definicion-importancia-y-beneficios>
- [29] Pizzoleo, J. (18 de Julio de 2023). *Reporte Minero*. Obtenido de Revalorización de relaves: ¿Cuáles son las alternativas?: <https://www.reporteminero.cl/noticia/noticias/2023/07/revalorizacion-relaves-alternativas-alba-gomez>
- [30] Polpaico. (2021). *Manual del Constructor: Polpaico*. Obtenido de Morteros y albañilerías: <https://manualdelconstructor.polpaico.cl/6-morteros-y-albanilerias/6-1-morteros/>
- [31] Polpaico, G. (s.f.). *Polpaico*. Obtenido de Control de calidad del hormigón : http://www.polpaicoconexion.cl/manual/pdf/cap_0310.pdf
- [32] Sernageomin. (2025). *Sernageomin*. Obtenido de Depósito de Relaves: Preguntas Frecuentes sobre Relaves: <https://www.sernageomin.cl/preguntas-frecuentes-sobre-relaves/>
- [33] Sernageomin. (10 de 2025). *Sernageomin*. Obtenido de Datos Públicos Depósito de Relaves: <https://www.sernageomin.cl/datos-publicos-deposito-de-relaves/>
- [34] S.Avudaiappan, R. G. (29 de 9 de 2024). *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*. Obtenido de Experimental investigations on sustainable mortar

containing mining tailing as partial replacement of fine aggregate:
<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/17480930.2024.2406684>

- [35] Baki V, Xinyuan K, A. H.-H. (26 de 12 de 2023). *Springer Nature Link*. Obtenido de Improving the pozzolanic reactivity of clay, marl and obsidian through mechanochemical or thermal activation:
<https://link.springer.com/article/10.1617/s11527-023-02280-z>
- [36] Gu X, W. Z. (1 de 1 de 2022). *Journal of Building Engineering*. Obtenido de Hydration characteristics investigation of iron tailings blended ultra high performance concrete: The effects of mechanical activation and iron tailings content.
- [37] Xu X, F. X. (27 de 10 de 2022). *MDPI*. Obtenido de Mechanism of Different Mechanically Activated Procedures on the Pozzolan Reactivity of Binary Supplementary Cementitious Materials: <https://www.mdpi.com/2075-163X/12/11/1365>

10. Anexos

10.1. Preparación y tratamiento de los relaves

10.1.1. Tratamiento térmico

En este anexo se tiene el proceso de tratamiento térmico del relave 2 particularmente, el cual fue depositado de manera uniforme en una bandeja resistente al calor para su procesamiento en una mufla industrial , se calcina a una temperatura de 1000°C por un periodo de 15 minutos.



Figura A-33. Mufla Thermolyne F6000



Figura A-34. Relave 2 Calcinado

10.1.2. Tratamiento mecánico

El tratamiento mecánico consistió en la molienda de la muestra utilizando un molino de bola de rodillos EDEMET, que tiene como objetivo la reducción de tamaño de las partículas. Se trabajó con una velocidad de rotación de 80 rpm y un tiempo de procesamiento de 15 minutos.



Figura A-35. Rodillo para molino de bolas



Figura A-36. Molino de bolas

10.2. Caracterización física y química de relaves

10.2.1. Análisis de granulometría por difracción láser

➤ Bambas

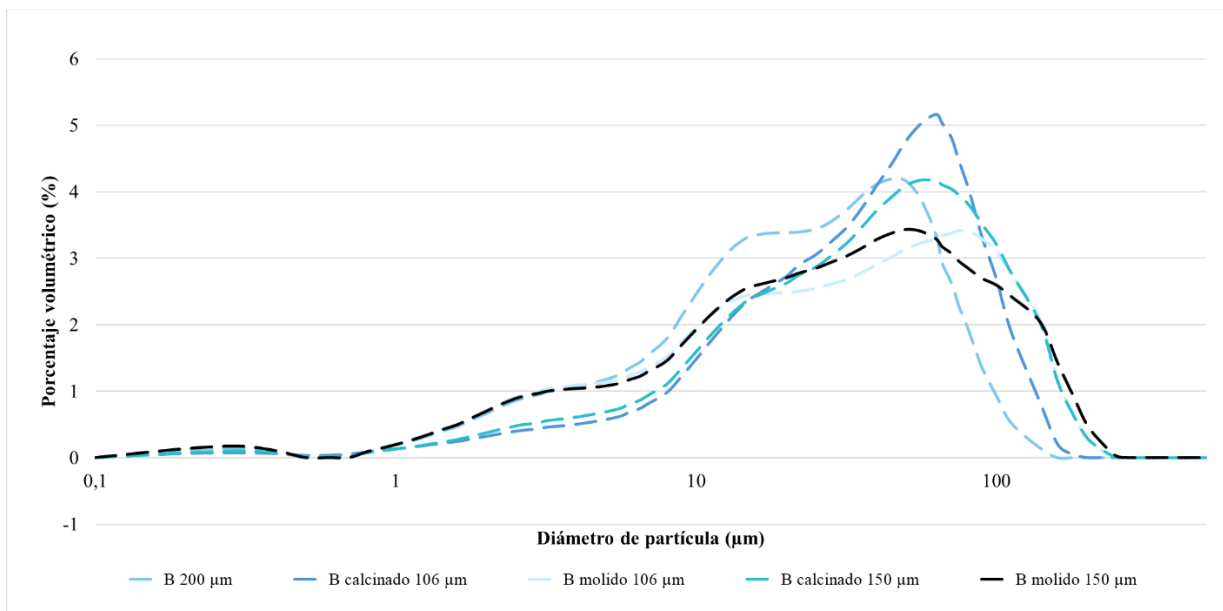


Figura A-37. Curva granulométrica bambas sobre tamaño

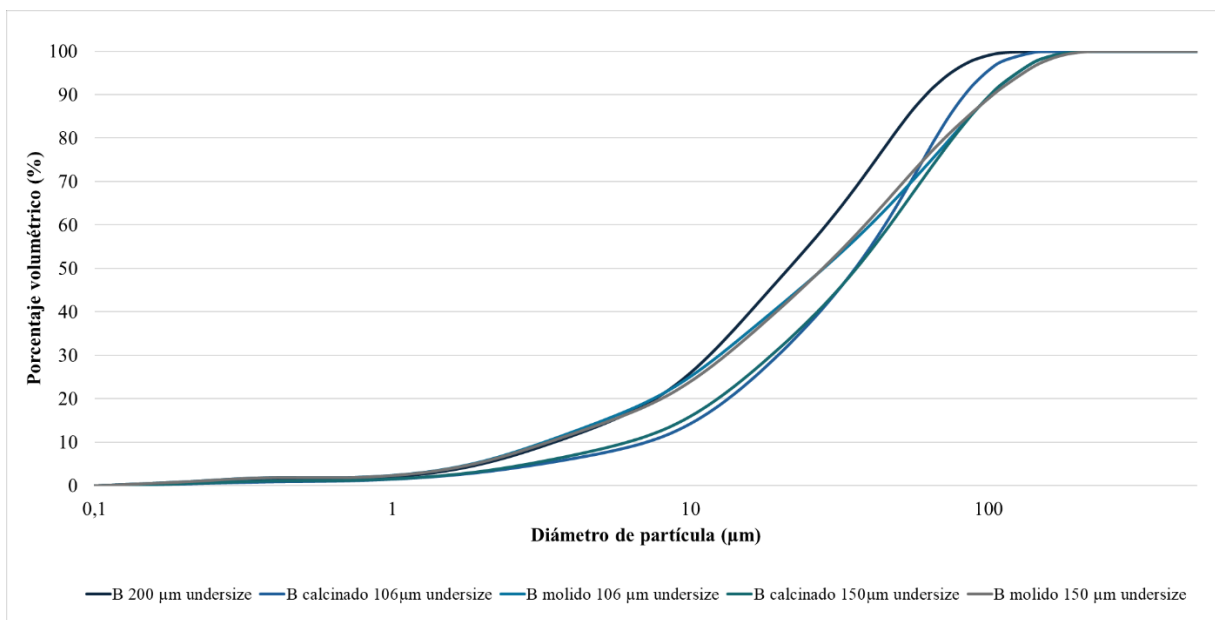


Figura A-38. Curva granulométrica bambas bajo tamaño

➤ **Relave 1**

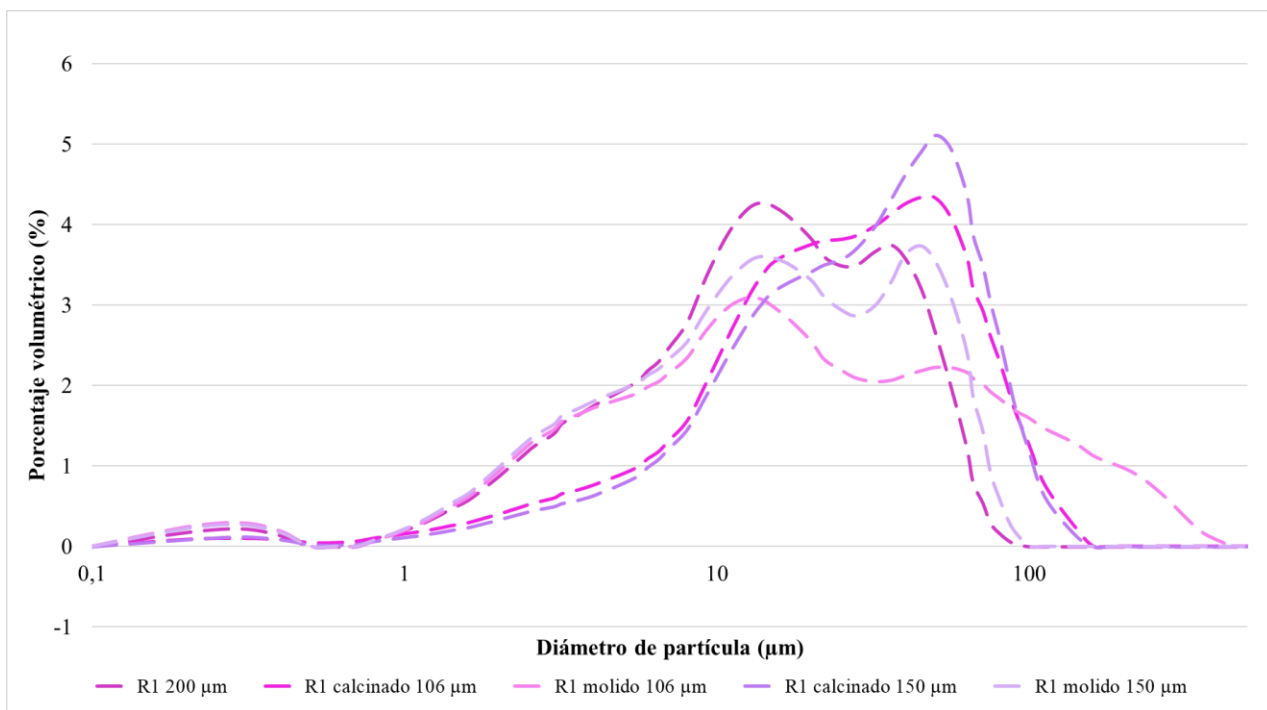


Figura A-39. Curva granulométrica relave 1 sobre tamaño

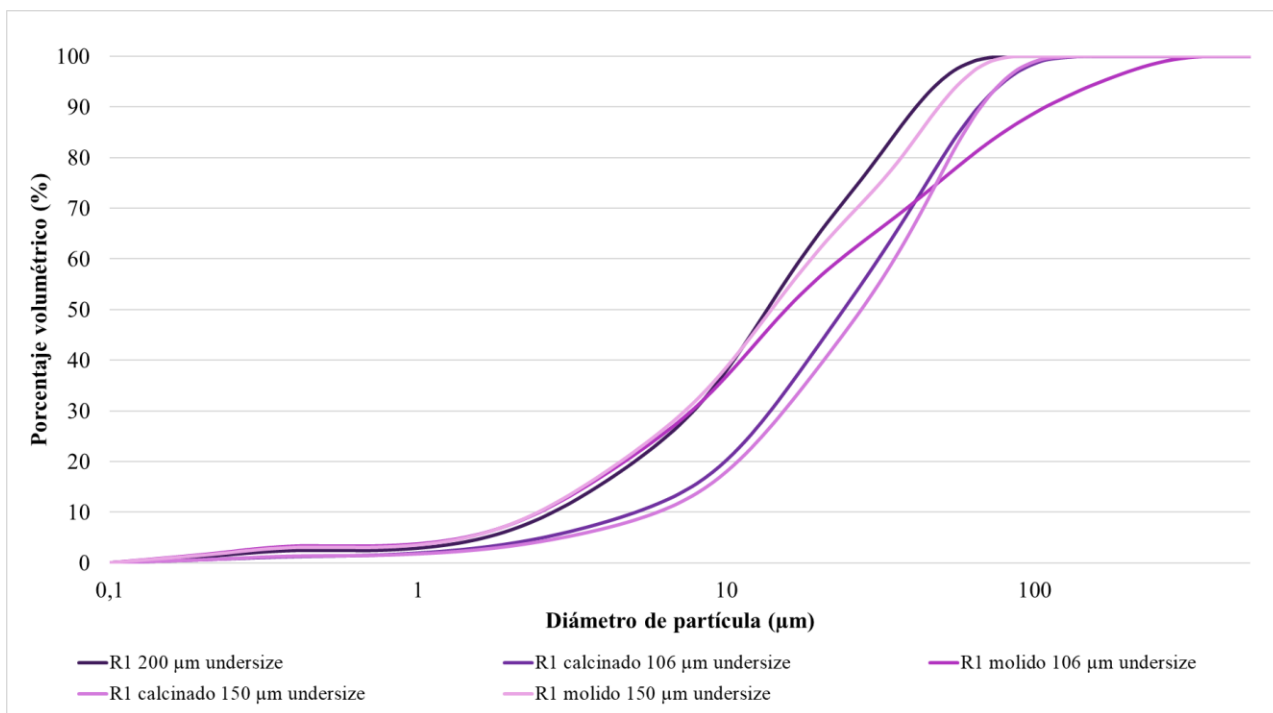
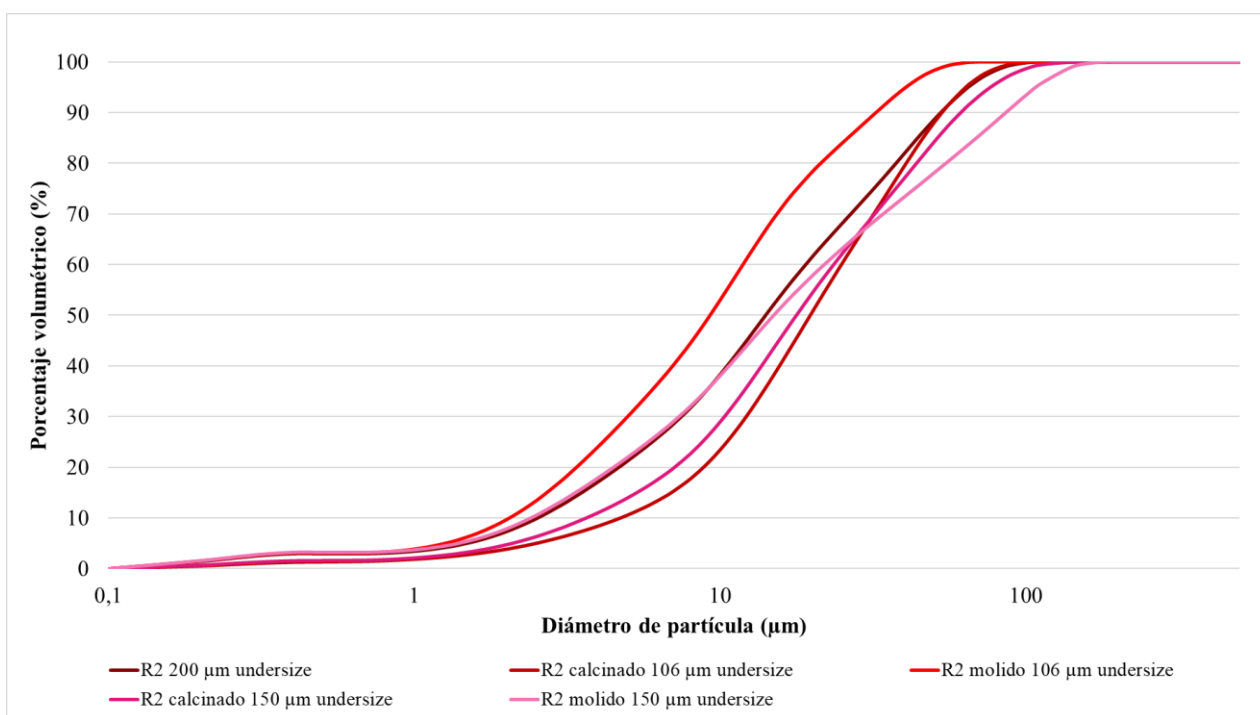
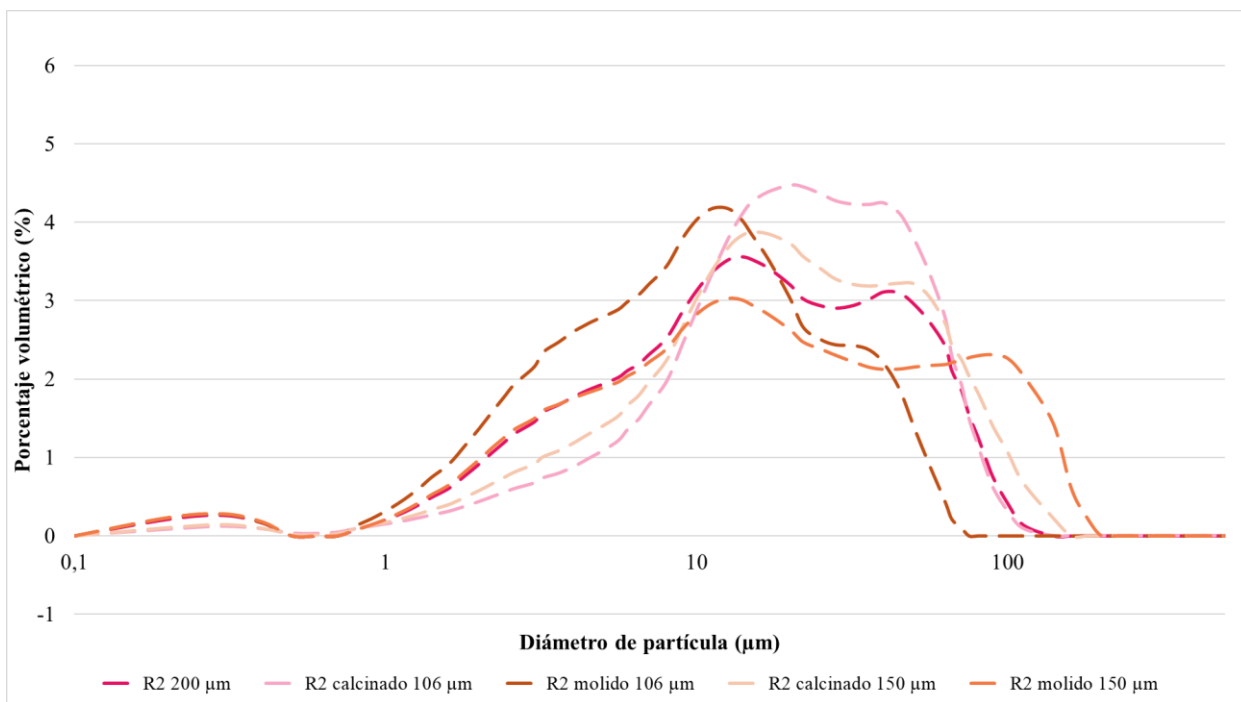


Figura A-40. Curva granulométrica relave 1 bajo tamaño

➤ **Relave 2**



10.2.2. Microscopía electrónica de barrido (SEM)

Las micrografías en este anexo permiten observar la textura superficial y morfología de las partículas previo a tratamiento.

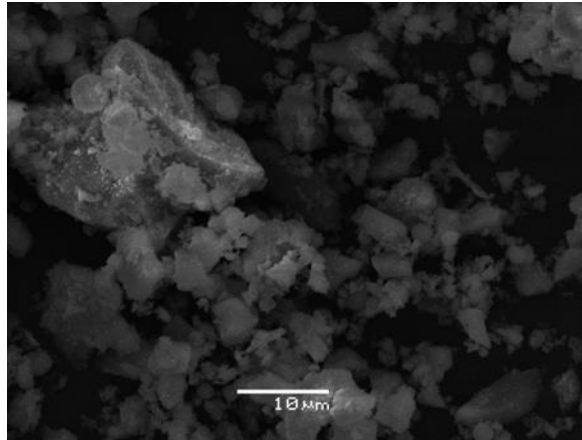


Figura A-43. SEM obtenida de cemento Bío-Bío

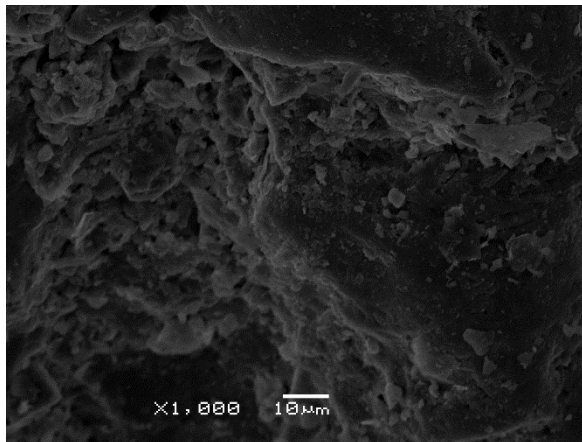


Figura A-44. SEM obtenida de arena fina

10.2.3. Difracción de rayos X (DRX)

En esta sección de anexos se tienen los difractogramas obtenidos mediante análisis de difracción de rayos X para cada relave.

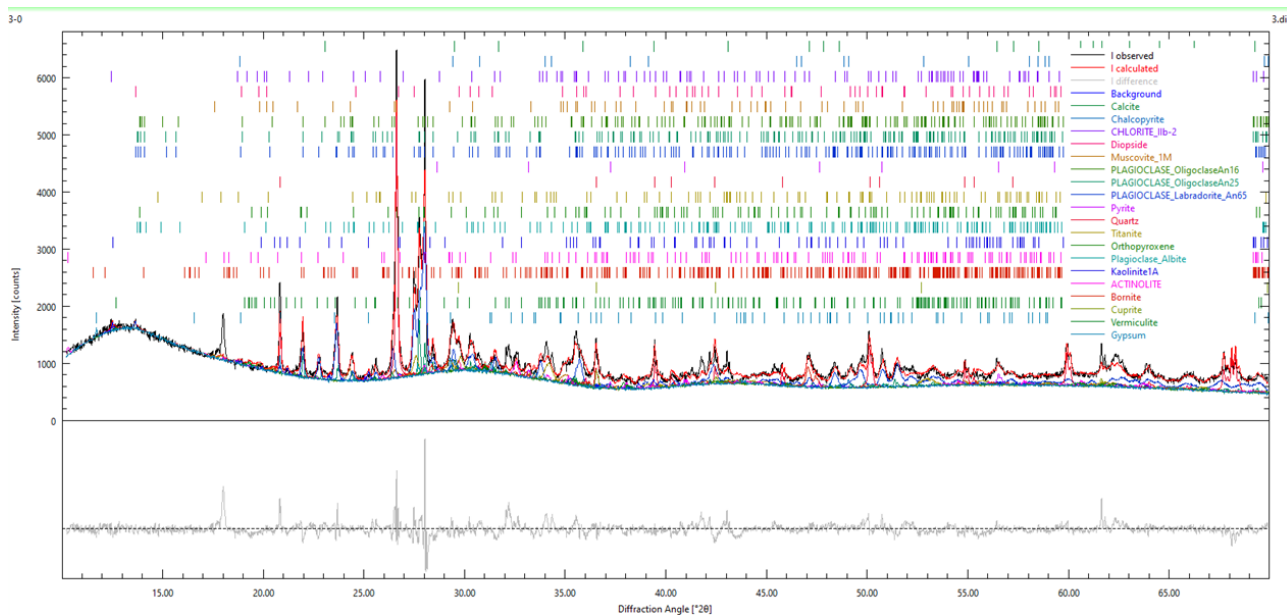


Figura A-45. Difractograma DRX relave bambas

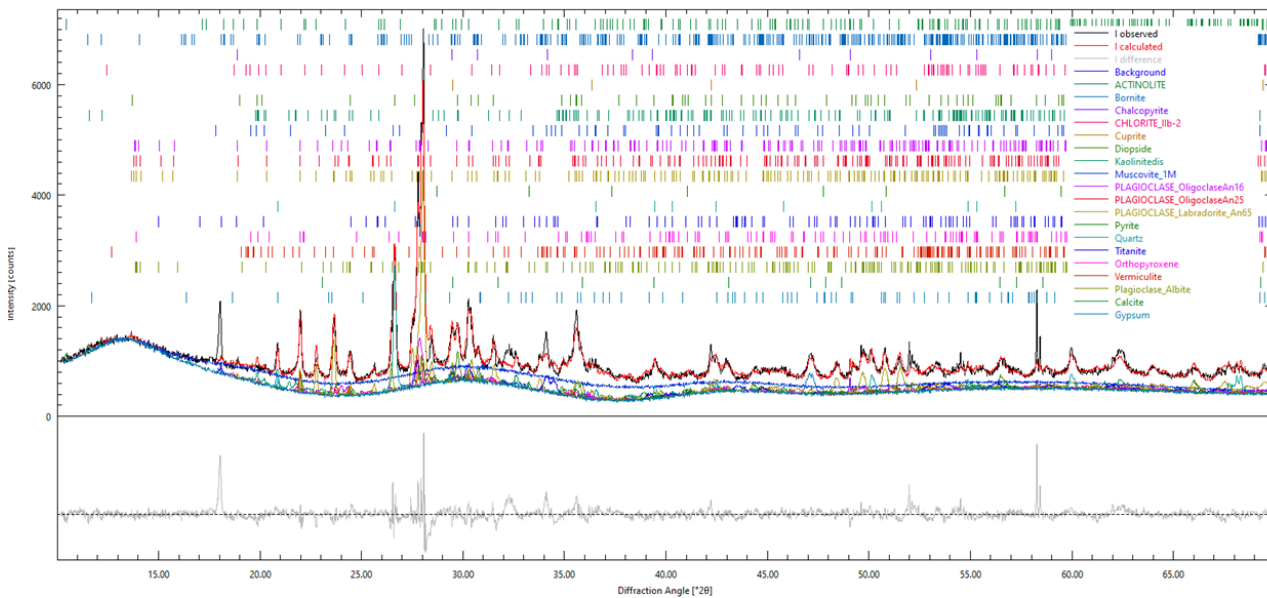


Figura A-46. Difractograma DRX relave 1

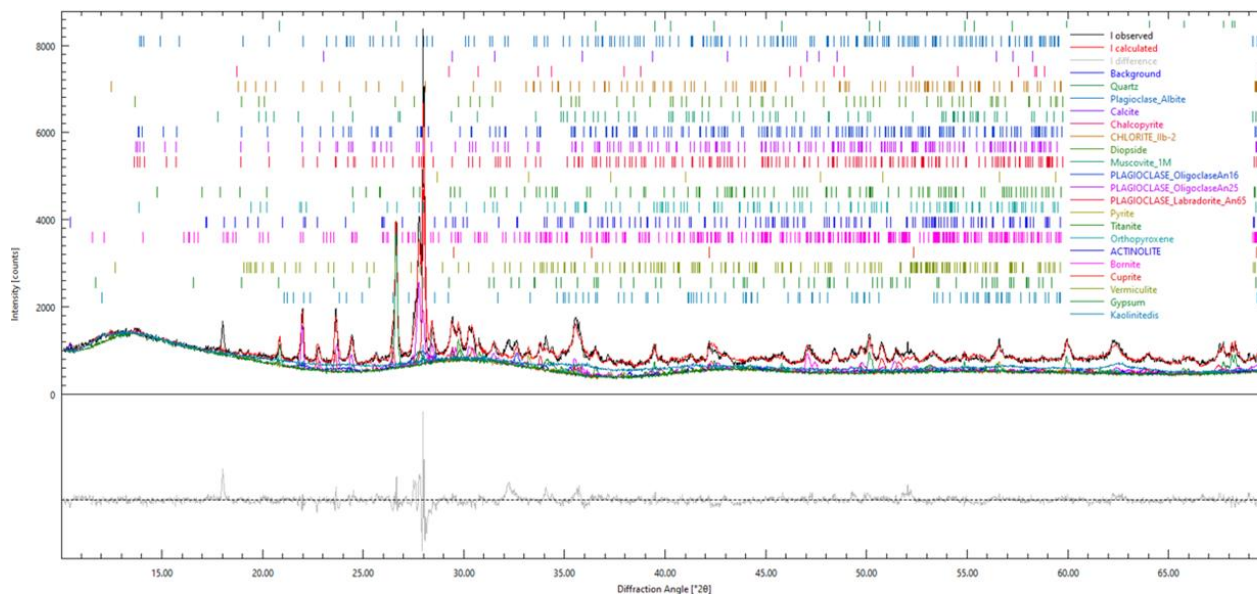


Figura A-47. Difractograma DRX relave 2

10.2.4. Fluorescencia de rayos X (FRX)

En este anexo se tiene los gráficos obtenidos de los resultados de fluorescencia de rayos X, que permite identificar y cuantificar los elementos químicos presentes en los relaves, cabe destacar que los gráficos fueron realizados con los elementos con concentraciones significativas.



Figura A-48. Analizador portátil S1 TITAN 800/CTX 800/ TRACER

➤ **Bambas**

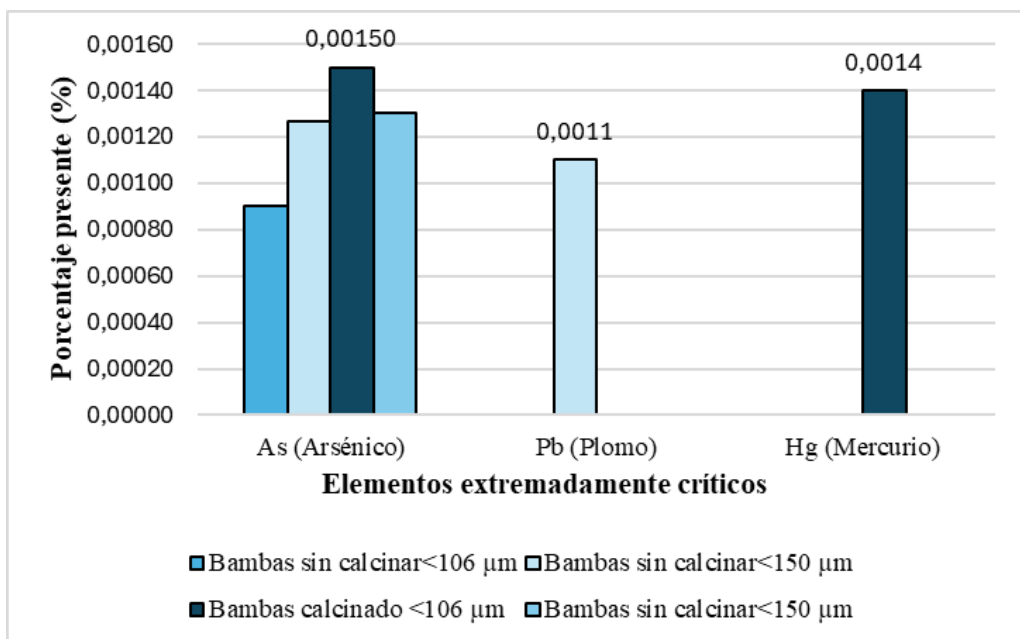


Figura A-49. Elementos extremadamente críticos presentes en Bambas

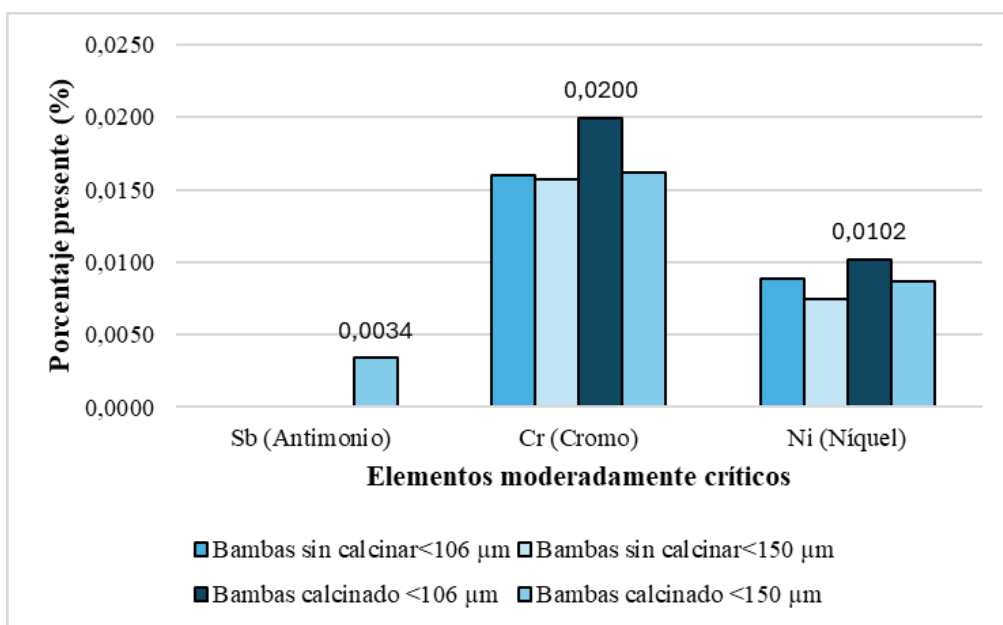


Figura A-50. Elementos moderadamente críticos presentes en Bambas

➤ **Relave 1**

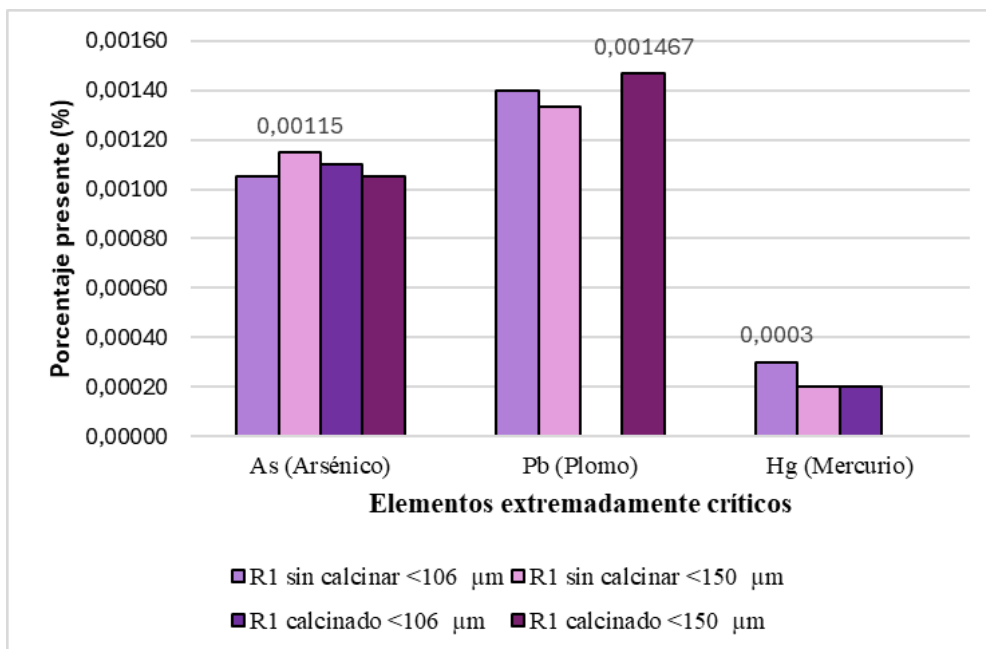


Figura A-51. Elementos extremadamente críticos presentes en R1

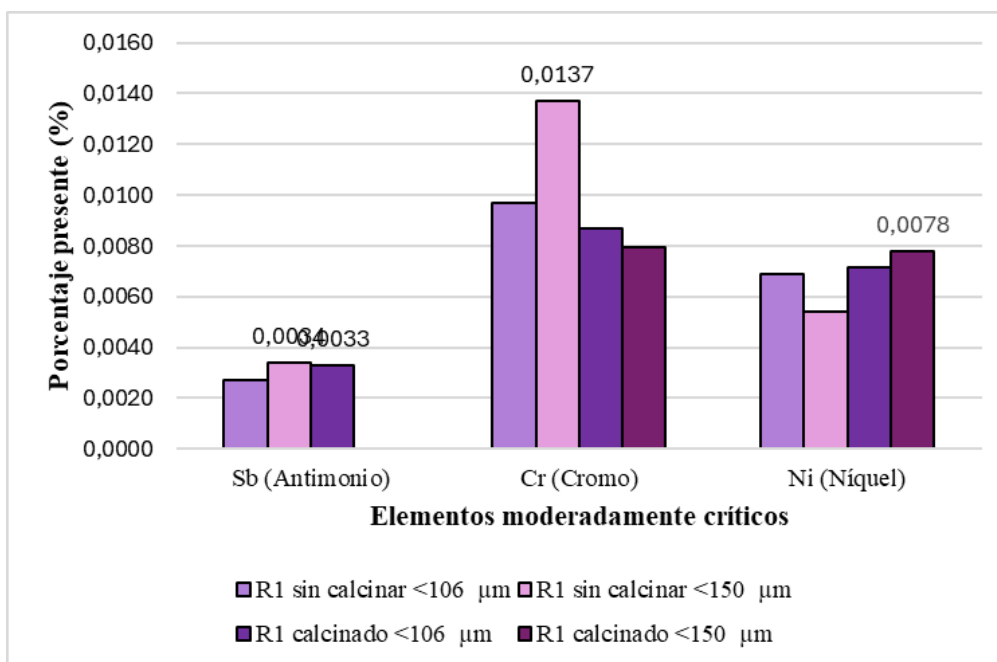


Figura A-52. Elementos moderadamente críticos en R1

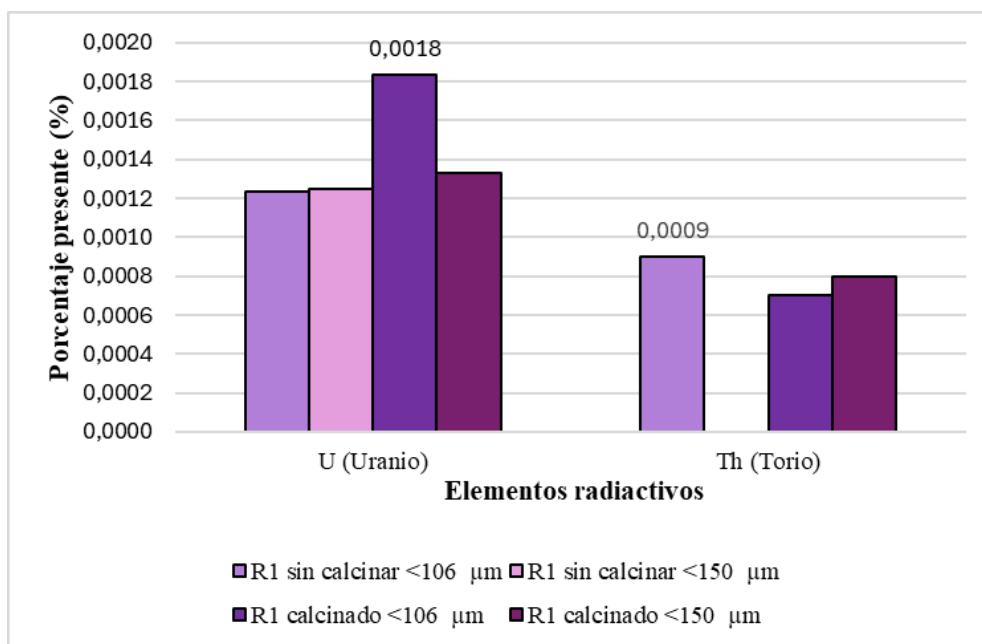


Figura A-53. Elementos radiactivos presentes en R1

➤ Relave 2

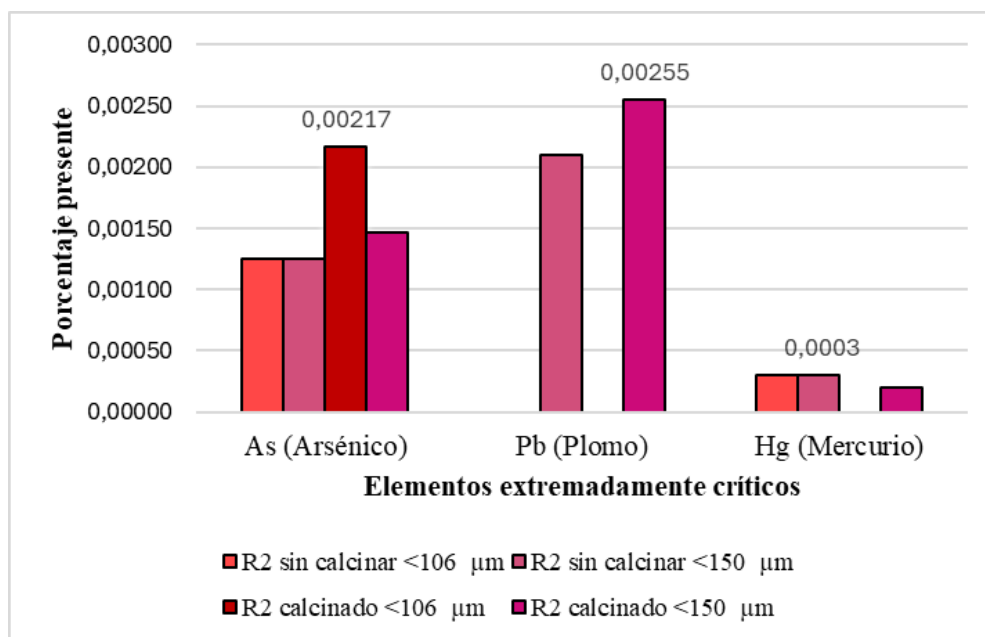


Figura A-54. Elementos extremadamente críticos presentes en R2

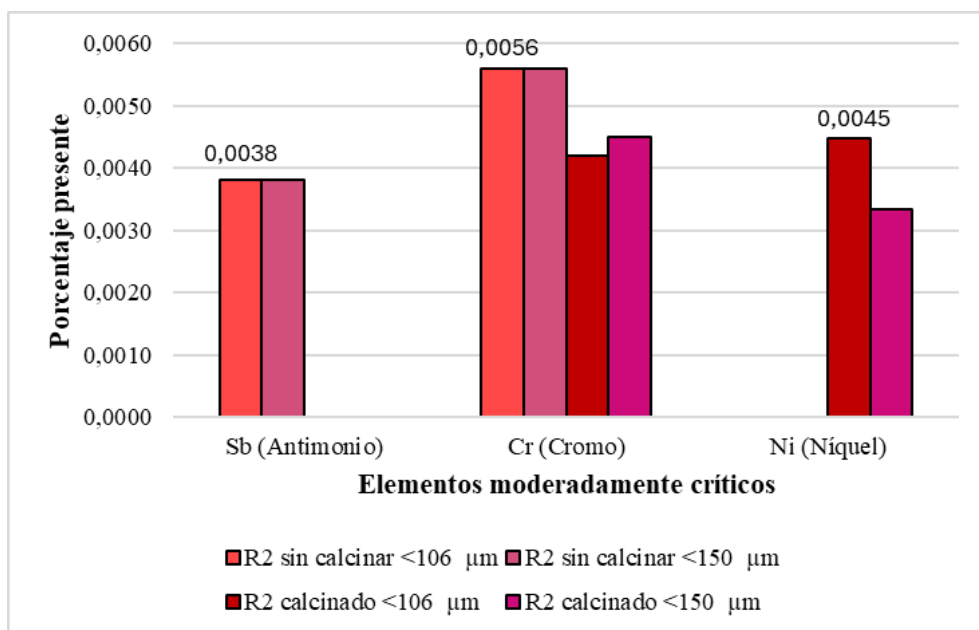


Figura A-55. Elementos moderadamente críticos presentes en R2

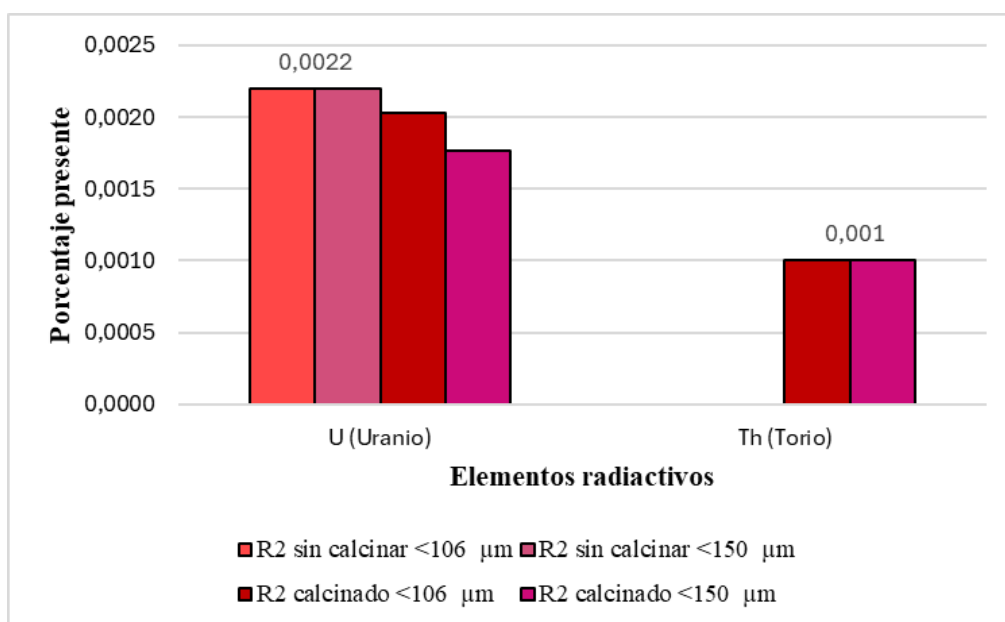


Figura A-56. Elementos radiactivos presentes en R2

10.3. Dosificación y trabajabilidad

10.3.1. Ensayo de Cono de Abrams



Figura A-57. Elementos usados para realizar ensayo cono de Abrams



Figura A-58. Ensayo de cono de Abrams

10.4. Elaboración y ensayos mecánicos a morteros

10.4.1. Fabricación



Figura A-59. Batidora de eje vertical utilizada para la elaboración de las mezclas



Figura A-60. Máquina vibratoria utilizada para depositar mezcla en moldes



Figura A-61. Probetas en proceso de fraguado de 24hrs

10.4.2. Curado



Figura A-62. Probetas en piscina de curado posterior a su fraguado



Figura A-63. Probetas luego de curado



Figura A-64. Horno de secado Labtech Hebro



Figura A-65. Probetas secadas posterior a curado.



Figura A-66. Probeta seca siendo pesada

10.5. Resultados

10.5.1. Ensayo de flexión

- **28-56-84 días de curado:** Se tiene que en la comparación de los resultados de resistencia a flexión se grafica 28 días de curado con un color sin diseño en particular, los resultados de 56 días de curado del mismo color que el de 28 días pero con líneas horizontales y los de 84 días es cuadrículado.

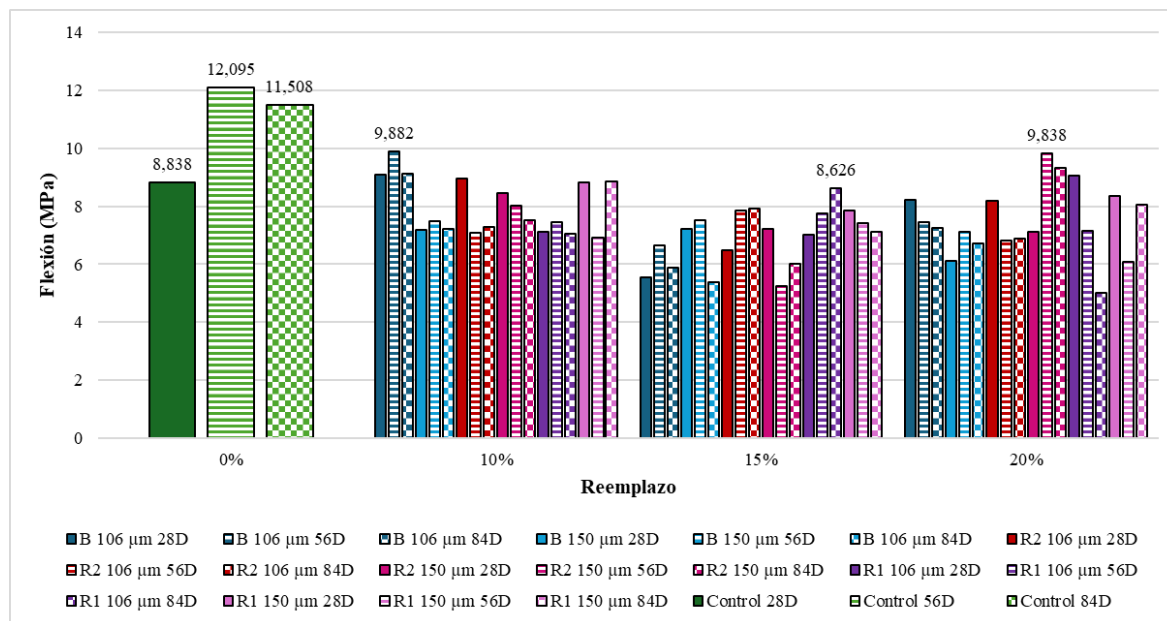


Figura A-67. Comparación de resistencia a flexión con 28-56 y 84 días de curado

10.5.2. Ensayo de compresión

- **28 días de curado**

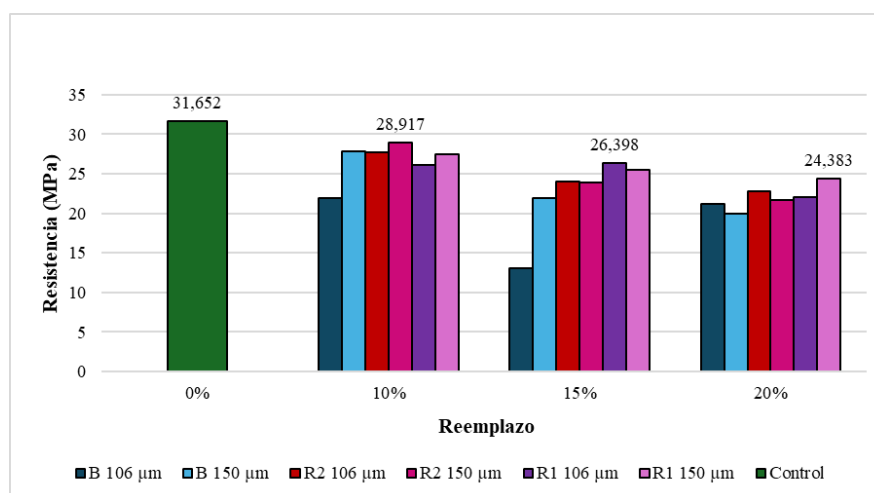


Figura A-68. Resistencia a compresión con 28 días de curado

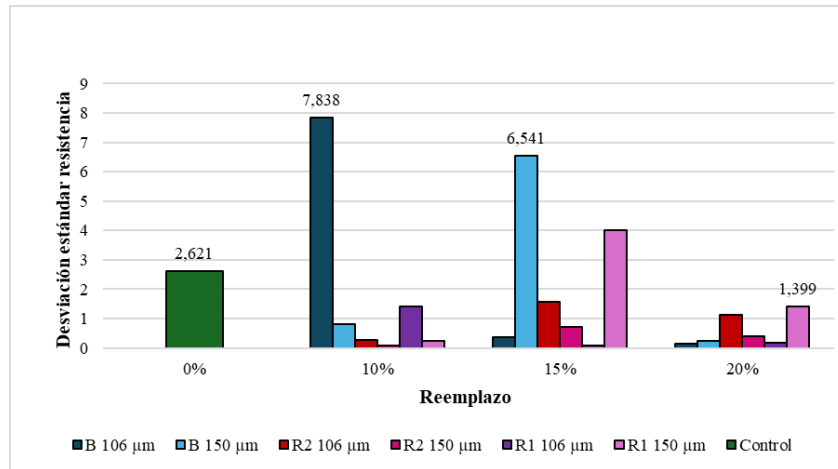


Figura A-69.Desviación estándar obtenida de la resistencia a compresión

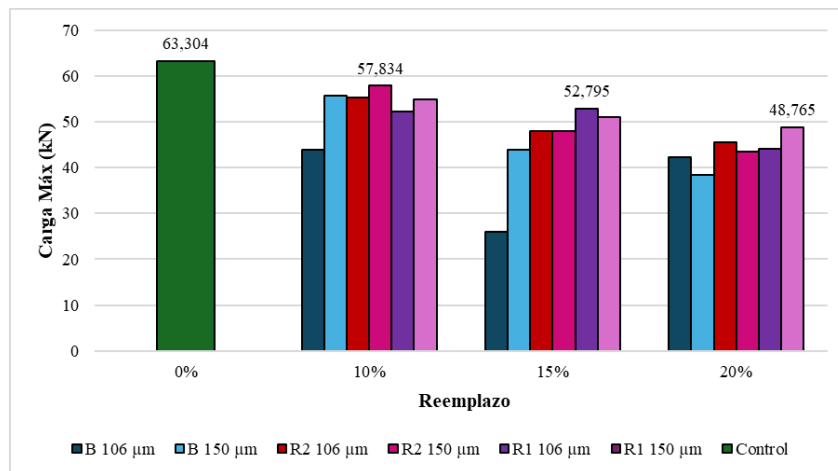


Figura A-70.Carga máxima soportada con 28 días de curado

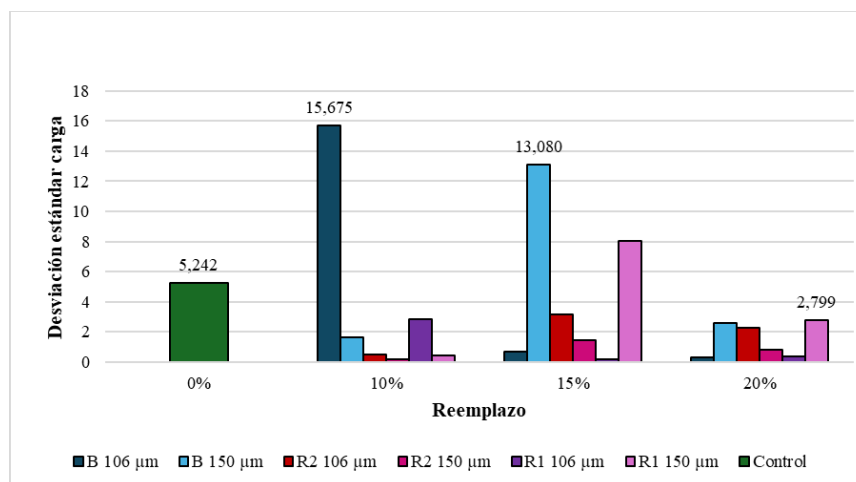


Figura A-71.Desviación estándar obtenida de la carga máxima con 28 días de curado

➤ 56 días de curado

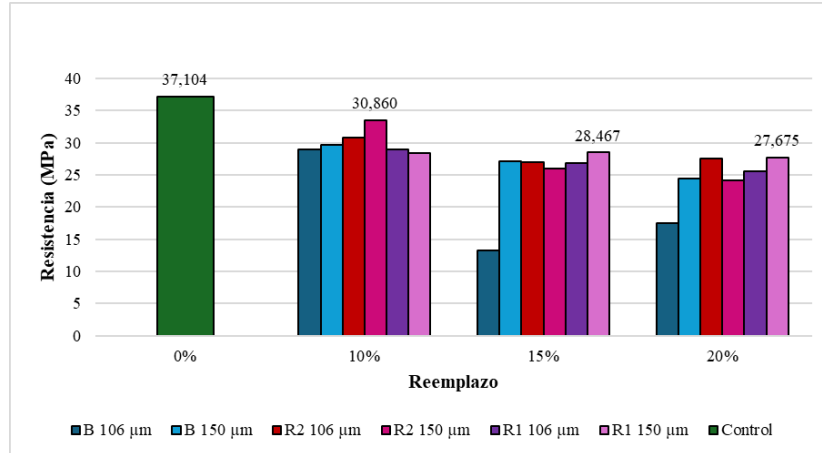


Figura A-72. Resistencia a compresión con 56 días de curado

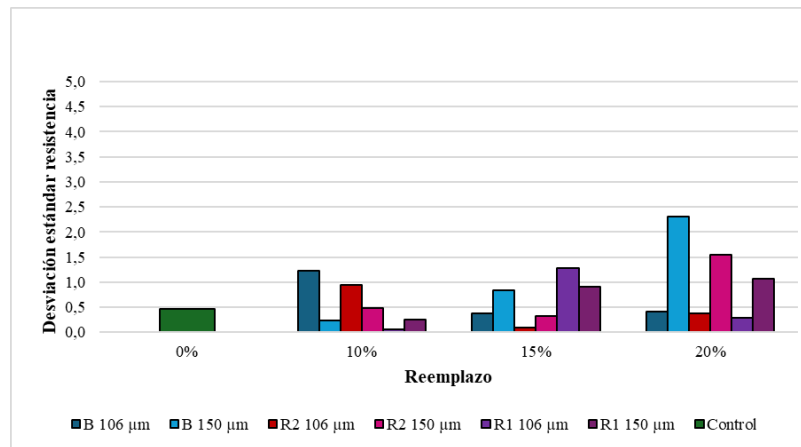


Figura A-73. Desviación estándar obtenida de la resistencia a compresión

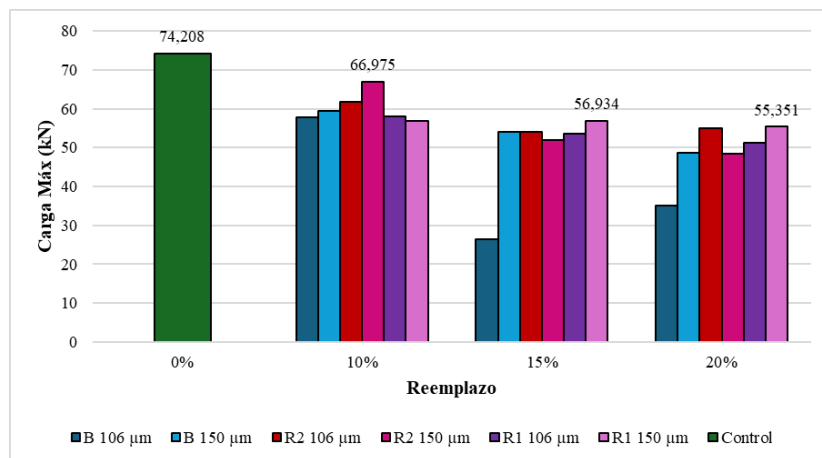


Figura A-74. Carga máxima soportada con 56 días de curado

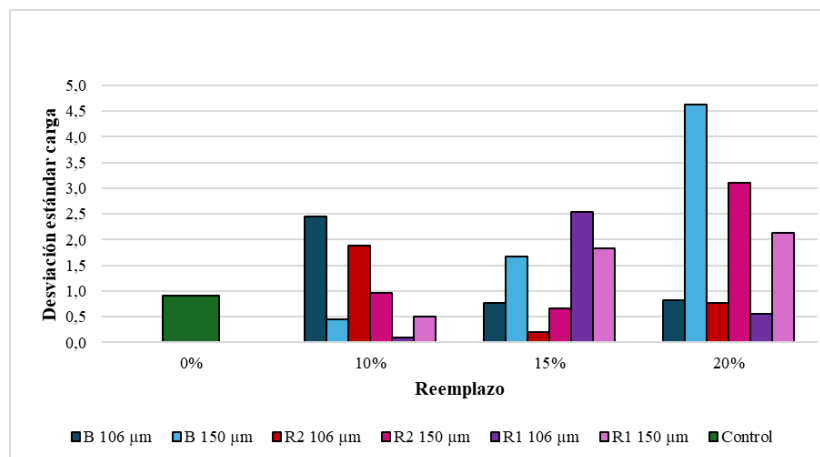


Figura A-75.Desviación estándar obtenida de la carga máxima con 56 días de curado

➤ 84 días de curado

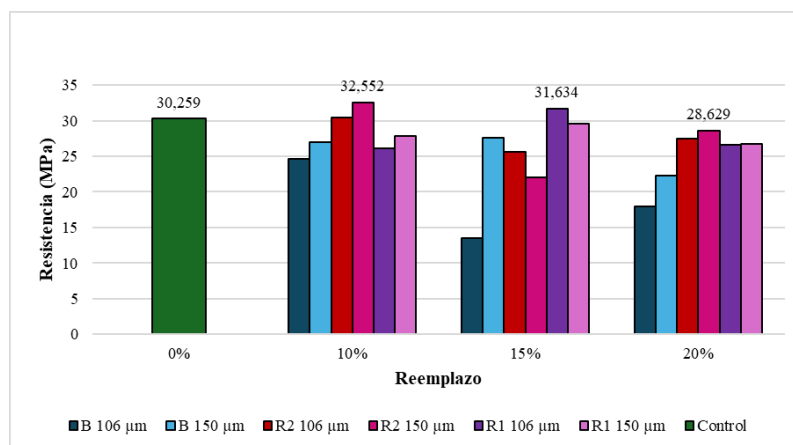


Figura A-76.Resistencia a compresión con 84 días de curado

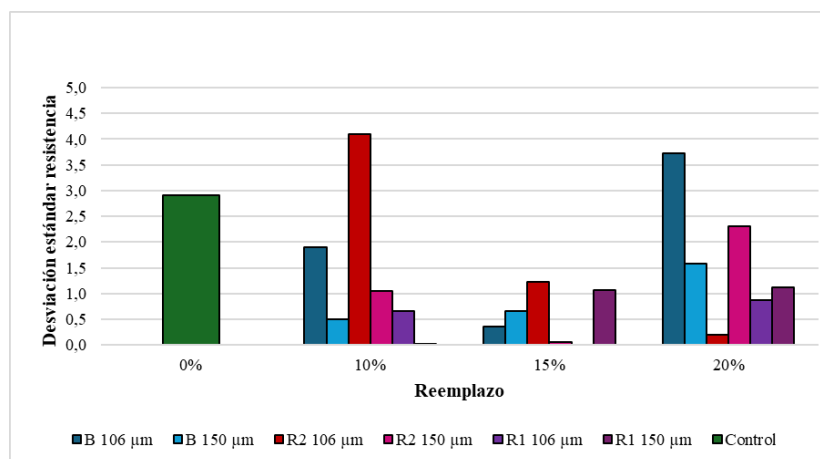


Figura A-77.Desviación estándar obtenida de la resistencia a compresión

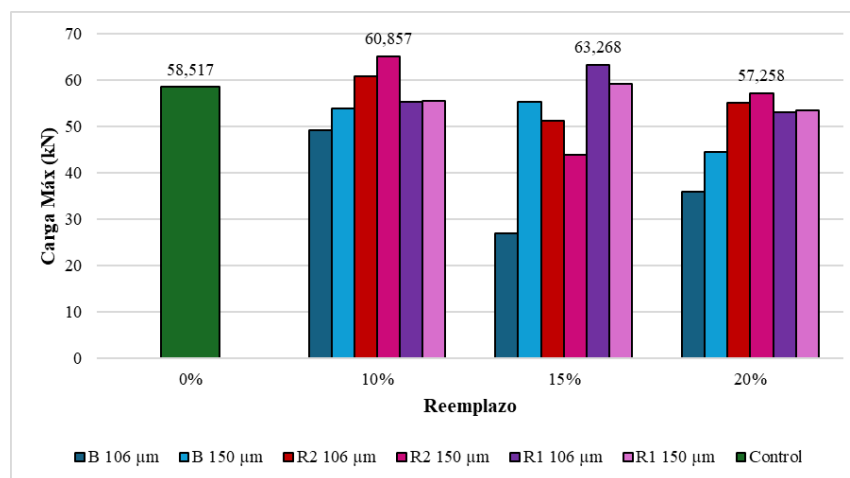


Figura A-78.Carga máxima soportada con 84 días de curado

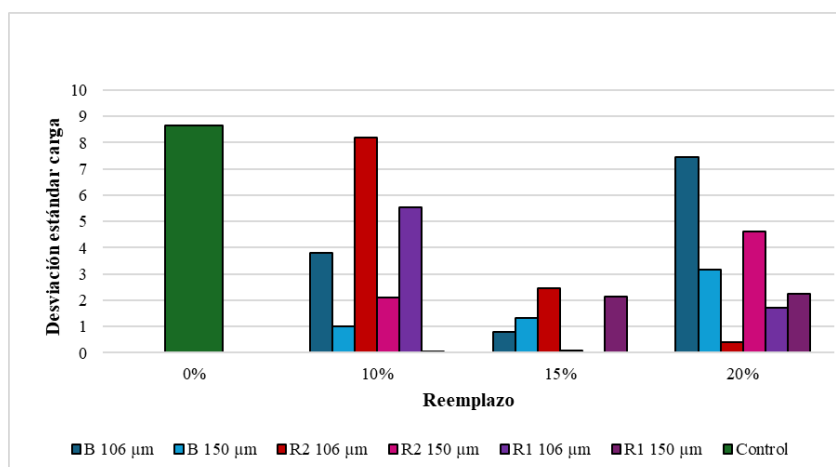


Figura A-79.Desviación estándar obtenida de la carga máxima con 84 días de curado

- **28-56-84 días de curado:** Se tiene que en la comparación de los resultados de resistencia a flexión se grafica 28 días de curado con un color sin diseño en particular, los resultados de 56 días de curado del mismo color que el de 28 días pero con líneas horizontales y los de 84 días es cuadriculado.

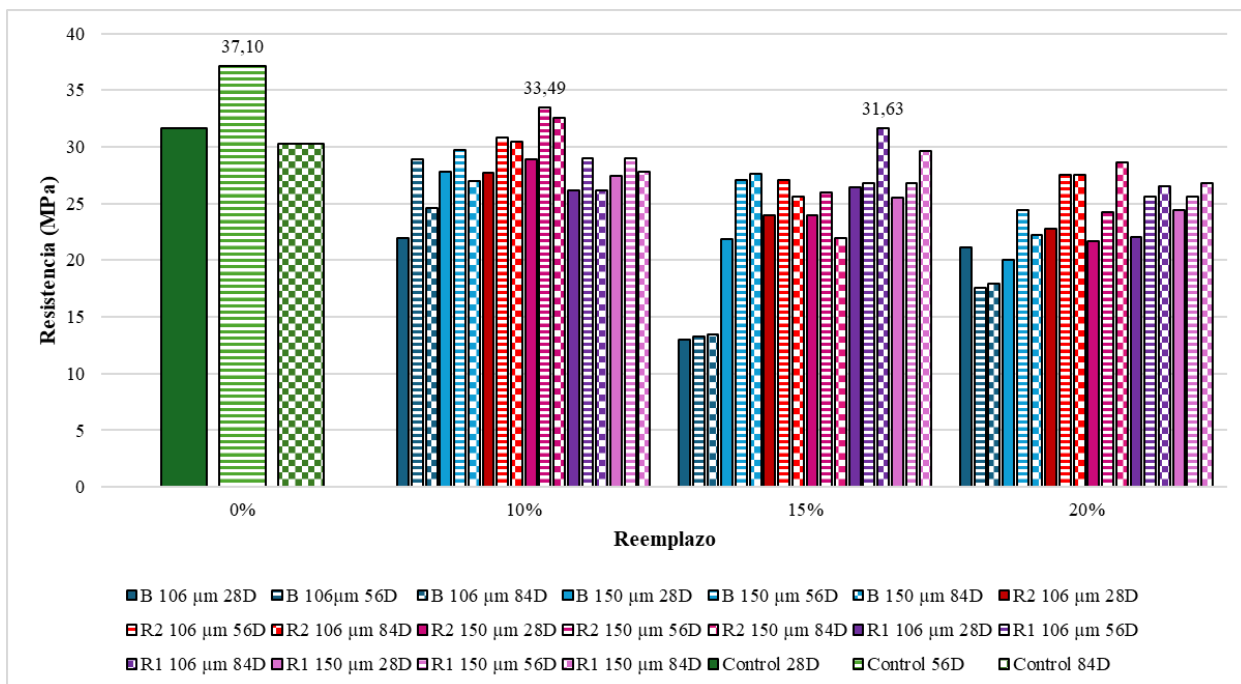


Figura A-80. Comparación de resistencia a compresión con 28-56 y 84 días de curado

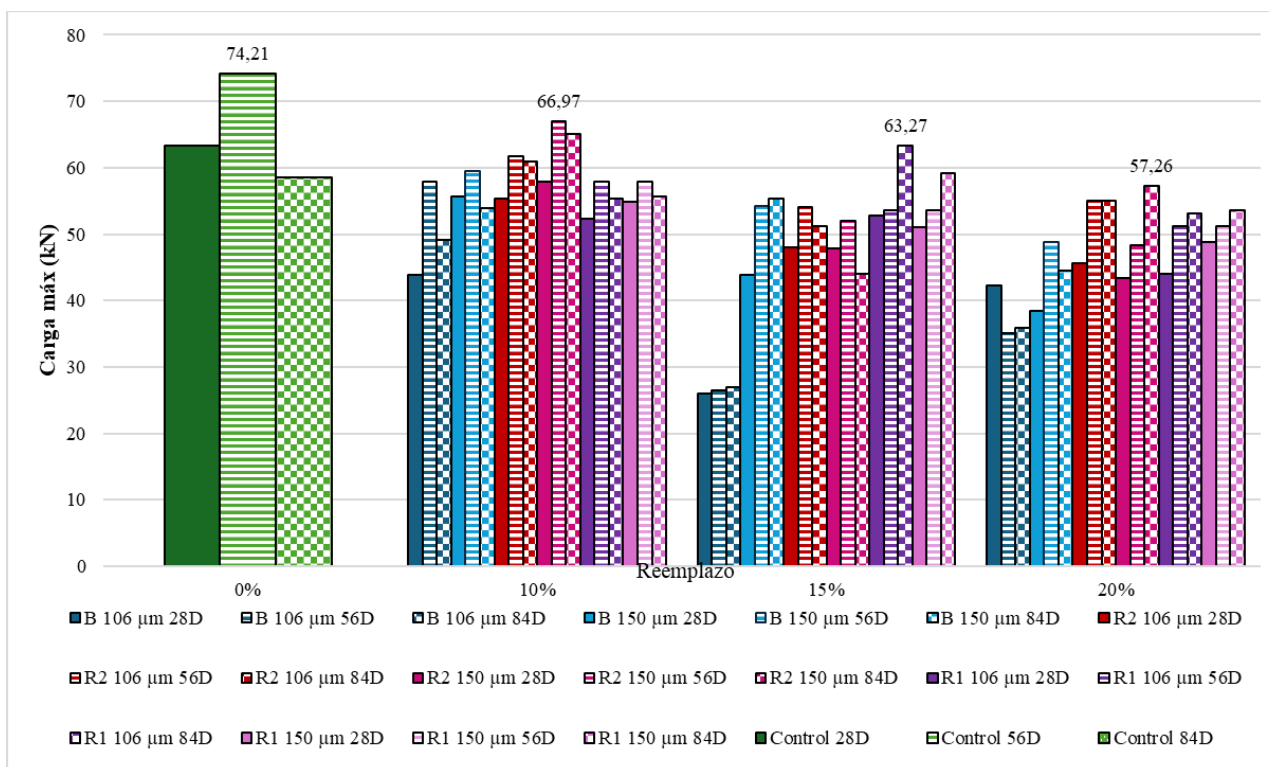


Figura A-81. Comparación de máxima carga soportada con 28-56 y 84 días de curado

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

Título: Evaluación de relaves ricos en Fe tratados térmica y mecánicamente para su uso en morteros		
Nombre Memorista:		
Modalidad	PROYECTO	Profesor (es) Patrocinante (s)
Concepto	EXCELENTE	 Prof. Roberto Gómez Espina
Calificación	6.8	
Fecha	09/01/2026	
 Prof. Ramón Díaz N.		Ingeniero Supervisor:
		Institución:
Comisión (Nombre y Firma)		
 Prof. René Gómez Puigpinos		
Resumen		
El presente estudio aborda la necesidad de gestionar y darle valor a los Pasivos Ambientales Mineros (PAM), concentrado en el análisis de los relaves ricos en hierro generados por la industria minera chilena, cuya acumulación representa un desafío logístico, ambiental y económico. Bajo el término de economía circular y simbiosis industrial, esta investigación tuvo como propósito demostrar la factibilidad técnica de transformar estos residuos mediante procesos de activación, en un material puzolánico suplementario (MPS) para la sustitución parcial del Clinker de cemento Portland. Esto ofrece una solución doble, mitigar el volumen de relaves y a la vez reducir la huella de carbono asociada a la producción de cemento con sus emisiones de CO₂. La metodología experimental se basó en la activación mecánica y térmica de 3 relaves ricos en hierro provenientes de yacimientos de tipo pórfido cuprífero identificados como bambas, relave 1 y relave 2, buscando mejorar su reactividad. Dicha activación se ejecutó mediante un tratamiento térmico de calcinación a 1000°C para inducir desorden y desestructuración de las fases cristalinas del relave, y la activación mecánica mediante molienda, orientado a reducir el tamaño de partícula y aumentar su superficie específica. Se fabricaron mezclas de mortero con sustituciones de cemento al 10%, 15% y 20% para visualizar un rango óptimo de reemplazo que no comprometa las propiedades mecánicas del material. La caracterización de estos relaves incluyó el análisis por DRX y FRX para confirmar su composición.		

Los resultados confirmaron la viabilidad técnica de la utilización de relaves ricos en hierro provenientes de yacimientos de tipo pórfido cuprífero como reemplazo en morteros. La adición de relaves activados resultó en un incremento constante de densidad en las probetas evidenciando el efecto de relleno que contribuye a su matriz. En términos de desempeño mecánico, se observó una actividad puzolánica retardada, donde las resistencias iniciales correspondientes a 28 días de curado tendieron a ser menores a los resultados obtenidos por la muestra control. No obstante, en etapas de curado mayores como 56 o 84 días, la activación fue más efectiva, pues mezclas con 10% o 15% de reemplazo no solo igualaron, sino que superaron la resistencia a compresión del control. Esto valida la propuesta, estableciendo un rango de sustitución del 10% al 15% como el más prometedor ofreciendo una opción viable para la mitigación de pasivos ambientales y la optimización de recursos mineros.