



Trabajo Fin de Grado

# **Evaluación del comportamiento mecánico de morteros con reemplazo de cemento con relave activado química y mecánicamente**

*Evaluation of the Mechanical Behavior of Mortars with Cement  
Replacement by Chemically and Mechanically Activated Tailings*

Para acceder al título de:

**Grado en Ingeniería de los Recursos Mineros**

**Autor:** Daniela Ruiz Ruiz

**Director:** Luis Vejo Fernández

**Convocatoria:** Septiembre 2025



# **Evaluación del comportamiento mecánico de morteros con reemplazo de cemento con relave activado química y mecánicamente**

El presente trabajo aborda la necesidad de generar alternativas sostenibles para la gestión de relaves mineros, uno de los principales residuos derivados de la minería. Estos residuos, habitualmente almacenados en grandes tranques, representan un gran riesgo tanto para el medio ambiente como para las comunidades cercanas. Una opción de mitigación consiste en su reutilización, mediante su incorporación en materiales de construcción, reduciendo así la demanda de recursos naturales convencionales y contribuyendo a la economía circular en el sector.

Con este propósito, se llevó a cabo un estudio experimental en el que se evaluó la viabilidad técnica de emplear relave minero como sustituto parcial del cemento en la fabricación de morteros. Para ello, se emplearon diferentes porcentajes de reemplazo (10 %, 20 % y 30 %) y se trabajó con diversas granulometrías del relave, previamente sometido a procesos de activación química y mecánica.

La investigación incluyó la caracterización del material, la preparación de mezclas normalizadas y la realización de ensayos tanto en estado fresco como en estado endurecido. Se analizaron parámetros como la trabajabilidad, la evolución del pH durante la activación y el comportamiento mecánico bajo ensayos de flexión y compresión.

El objetivo principal fue examinar cómo influyen la granulometría, el nivel de reemplazo y la activación del relave en la resistencia mecánica de los morteros, con el fin de determinar su potencial como adición cementante suplementaria y valorar su potencial contribución a la disminución del impacto ambiental en la actividad minera.



# Evaluation of the Mechanical Behavior of Mortars with Cement Replacement by Chemically and Mechanically Activated Tailings

This paper addresses the need to generate sustainable alternatives for the management of mining tailings, one of the main types of waste derived from mining. These wastes, usually stored in large dams, pose a major risk to both the environment and nearby communities. One mitigation option is to reuse it by incorporating it into construction materials, thereby reducing the demand for conventional natural resources and contributing to the circular economy in the sector.

To this end, an experimental study was carried out to assess the technical feasibility of using mining tailings as a partial substitute for cement in the manufacture of mortars. To this end, different replacement percentages (10 %, 20 % and 30 %) were used and various particle sizes of tailings were worked with, previously subjected to chemical and mechanical activation processes.

The research included the characterisation of the material, the preparation of standardised mixtures and the performance of tests in both fresh and hardened states. Parameters such as workability, pH evolution during activation and mechanical behaviour under flexural and compressive tests were analysed.

The main objective was to examine how particle size, replacement level and tailings activation influence the mechanical strength of mortars, in order to determine their potential as a supplementary cementitious addition and assess their potential contribution to reducing the environmental impact of mining activity.



## **Agradecimientos**

*Quiero dar las gracias de todo corazón a quienes me acompañaron y me brindaron su apoyo en esta etapa tan especial:*

### ***A mi familia,***

*En primer lugar, quería agradecer a mis padres, Bárbara y Roberto, gracias por vuestro esfuerzo, por apoyarme y siempre animarme a conseguir mis objetivos. A mis hermanas, Lucía y Paula, por estar siempre a mi lado y hacerme reír incluso en los días más complicados. Os quiero.*

### ***A Gabriel,***

*mi novio y mejor amigo, gracias por ayudarme y confiar en mí siempre. Gracias por acompañarme en este camino y ser un pilar fundamental en mi vida.*

### ***A mis abuelos,***

*Puri y Fermín, gracias por vuestro cariño y por hacer de vuestra casa un hogar para mí durante estos 4 años.*

### ***A la Universidad de Cantabria y a la Escuela de Minas,***

*por haberme dado la oportunidad de aprender y conocer gente nueva. Gracias a todos los profesores que me enseñaron algo nuevo durante mi etapa en esta escuela. Agradecer también a mis compañeros de clase y amigos, especialmente a Juan, Ale, Pedro, Hugo y Emilio, por hacer de la escuela un sitio especial, por tantos momentos juntos que me llevo para siempre.*

### ***A mi tutor en Chile, Roberto Gómez, y a las personas del proyecto FONDEF,***

*por darme la oportunidad y confiar en mí para trabajar con ellos, por ayudarme desde el primer día. En especial, a Adolfo, por su paciencia y por ser un gran mentor dentro del laboratorio. También agradecer a Ramón, nuestro jefe de carrera, por habernos animado a empezar este proyecto con ellos, por su ayuda durante toda nuestra estancia y por hacernos sentir como en casa.*

### ***A mi tutor, Luis Vejo Fernández,***

*por su paciencia, su apoyo constante y por orientarme en cada paso de este trabajo.*

### ***Y por último, dar las gracias a nuestro director, Julio Manuel de Luis,***

*porque gracias a su compromiso y dedicación hacia nuestra escuela, esta podrá seguir creciendo. En lo personal, me brindó la oportunidad de vivir una experiencia única en Chile, que recordaré con mucho cariño y que dejó una huella significativa tanto en mi formación académica como en mi desarrollo personal.*

## Índice general

<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>9</b>
1.1. Contexto . . . . .	9
1.2. Objetivos . . . . .	11
1.2.1. Objetivo General . . . . .	11
1.2.2. Objetivos Específicos . . . . .	11
<b>2. ESTADO DEL ARTE</b>	<b>12</b>
2.1. Conceptos previos: El relave . . . . .	12
2.2. Cemento, mortero y hormigón . . . . .	15
2.2.1. Cemento . . . . .	15
2.2.2. Mortero . . . . .	20
2.2.3. Hormigón . . . . .	20
2.3. Normativa y legislación . . . . .	23
2.3.1. Normas ASTM relevantes . . . . .	23
2.3.2. Normas UNE aplicables . . . . .	24
2.3.3. Regulación minera y ambiental . . . . .	26
2.4. Literatura y actualidad . . . . .	27
2.4.1. Actualidad de la incorporación de relaves en morteros y hormigones . . . . .	27
2.4.2. Investigaciones recientes . . . . .	28
<b>3. METODOLOGÍA E INSTRUMENTACIÓN</b>	<b>29</b>
3.1. Materiales y preparación de muestras . . . . .	29
3.2. Parametros de estudio . . . . .	33
3.3. Preparación del relave . . . . .	34
3.4. Fabricación de morteros y ensayos en estado fresco . . . . .	36
3.5. Proceso de curado y ensayos mecánicos en estado endurecido . . . . .	38
3.5.1. Equipos . . . . .	40

<b>4. RESULTADOS EXPERIMENTALES</b>	<b>42</b>
4.1. Caracterización del relave . . . . .	42
4.2. Trabajabilidad de las mezclas de mortero y pH pasta de relave . . . . .	45
4.2.1. Trabajabilidad . . . . .	45
4.2.2. pH de las pastas de relave . . . . .	47
4.3. Densidad de las probetas curadas . . . . .	51
4.4. Resistencia a flexión y compresión a 28 días . . . . .	53
<b>5. ANÁLISIS DE RESULTADOS</b>	<b>55</b>
5.1. Influencia de la granulometría del relave y su activación en la resistencia mecánica	55
5.1.1. Resistencia a la compresión . . . . .	55
5.1.2. Resistencia a la flexión . . . . .	57
5.1.3. Resistencias de Morteros con Relave Activado a 7 Días . . . . .	58
5.2. Trabajabilidad . . . . .	61
5.3. Influencia de las condiciones de Temperatura y Humedad en la resistencia del mortero . . . . .	63
5.4. Análisis de la Reactividad de Relaves Mineros Activados . . . . .	65
5.5. Análisis de la composición mineralógica del relave . . . . .	69
<b>6. CONCLUSIONES Y LINEAS FUTURAS</b>	<b>73</b>
6.1. Conclusiones . . . . .	73
6.2. Lineas futuras . . . . .	74
<b>7. BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>75</b>
<b>8. ANEXOS</b>	<b>78</b>
8.1. Probetas post-ensayos . . . . .	78
8.1.1. Muestras con reemplazo 10 % . . . . .	78
8.1.2. Muestras con reemplazo 20 % . . . . .	84
8.1.3. Muestras con reemplazo 30 % . . . . .	85
8.2. Curvas de los ensayos de compresión . . . . .	88
8.2.1. Probetas 10% de reemplazo . . . . .	88
8.2.2. Probetas 20% de reemplazo . . . . .	90
8.2.3. Probetas 30% de reemplazo . . . . .	91

## Índice de figuras

1.1. Producción de cobre en Chile y el resto del mundo, y participación de Chile en la producción mundial. Fuente:[17]. . . . .	9
2.1. Vista aérea de un tranque de relaves. . . . .	13
2.2. Tipos de cementos según su composición. Fuente: [22]. . . . .	15
2.3. Proceso de fabricación del cemento. Fuente:[3]. . . . .	17
2.4. Fases dentro del horno rotatorio. Fuente:[12]. . . . .	18
2.5. Esquema del patrón de formación de la hidratación del cemento. Fuente:[1]. . .	19
3.1. Granulometría relave. Fuente:[21]. . . . .	29
3.2. Fotografía tomada en el laboratorio de ensayos de distintos tipos de áridos. Fuente: Elaboración propia. . . . .	30
3.3. Granulometría Arena. Fuente:[21]. . . . .	31
3.4. Porcentaje de partículas menores a un cierto tamaño del cemento. Fuente:[21]. .	32
3.5. Frecuencia relativa en función del tamaño de partícula del cemento. Fuente:[21].	32
3.6. Medidor de pH utilizado en los ensayos. . . . .	33
3.7. Fotografía del panel de mando del molino de bolas utilizado en el ensayo. Fuente: Elaboración propia. . . . .	34
3.8. Fotografía de los instrumentos utilizados en el ensayo de consistencia. Fuente: Elaboración propia. . . . .	37
3.9. Fotografía de las probetas durante el curado en agua saturada en cal. Fuente: Elaboración propia. . . . .	38
3.10. Muestras etiquetadas en estado fresco. Fuente: Elaboración propia. . . . .	39
3.11. Máquina utilizada para el ensayo de flexión. Fuente: Elaboración propia. . . . .	40
3.12. Máquina utilizada para el ensayo de compresión. Fuente: Elaboración propia. .	41
3.13. Probetas tras el ensayo de compresión. Fuente: Elaboración propia. . . . .	41
3.14. Esquemas de modos de rotura en compresión. . . . .	41
4.1. Undersize fracción fina molida. Fuente:[21]. . . . .	42
4.2. Size distribution fracción fina molida. Fuente:[21]. . . . .	43

4.3. Undersize fracción fina sin moler.Fuente:[21]. . . . .	43
4.4. Size distribution fracción fina sin moler. Fuente:[21]. . . . .	43
4.5. Undersize fracción gruesa molida. Fuente:[21]. . . . .	44
4.6. Size distribution fracción gruesa molida. Fuente:[21]. . . . .	44
4.7. Trabajabilidad de morteros con distintos porcentajes de reemplazo y granulometrías de relave. Fuente: Elaboración propia. . . . .	45
4.8. Trabajabilidad mortero con reemplazo de 10 % según granulometría y activación del relave. Fuente: Elaboración propia. . . . .	46
4.9. Trabajabilidad: comparación entre el control y el promedio de los morteros con relave bajo distintas condiciones de activación. Fuente: Elaboración propia. . .	47
4.10. Gráfica pH reemplazo 10 % relave fino molido. Fuente: [21]. . . . .	48
4.11. Gráfica pH reemplazo 10 % relave fino sin moler. Fuente: [21]. . . . .	48
4.12. Gráfica pH reemplazo 10 % grueso molido + fino sin moler. Fuente: [21]. . . .	49
4.13. Gráfica pH diferentes grupos de reemplazo granulometría fino molido. Fuente: [21]. . . . .	50
4.14. Gráfica pH diferentes grupos de reemplazo granulometría fino sin moler. Fuente: [21]. . . . .	50
4.15. Gráfica pH diferentes grupos de reemplazo granulometría grueso molido + fino sin moler. Fuente: [21]. . . . .	51
4.16. Densidades promedio por grupo de reemplazo y control. Fuente: Elaboración propia. . . . .	51
4.17. Gráfico valores promedio ensayo de resistencia a la compresión. Fuente: Elaboración propia. . . . .	53
4.18. Gráfico valores promedio ensayo de resistencia a la flexión. Fuente: Elaboración propia. . . . .	54
4.19. Máquina de ensayo utilizada para pruebas de flexión en probetas. . . . .	54
5.1. RC 10- Resistencia a la compresión. Fuente:[21]. . . . .	55
5.2. Trabajabilidad mortero RC10. Fuente: [21]. . . . .	56
5.3. RC 10- Resistencia a la flexión. Fuente:[21]. . . . .	57
5.4. 7 días de activación- Resistencia a la compresión. Fuente:[21]. . . . .	59
5.5. 7 días de activación - Resistencia a la flexión. Fuente:[21]. . . . .	59
5.6. Trabajabilidad según granulometría y porcentaje de reemplazo. Fuente: Elaboración propia. . . . .	61
5.7. Comparación de condiciones ambientales en la elaboración de morteros control. Fuente: Elaboración propia. . . . .	63
5.8. Comparación de resistencia a compresión entre probetas iniciales y finales. Fuente: Elaboración propia. . . . .	64

5.9. Comparación de resistencia a flexión entre probetas iniciales y finales. Fuente: Elaboración propia. . . . .	64
5.10. 7 días de activación - $\Delta$ pH. Fuente: Elaboración propia. . . . .	66
5.11. Imagen SEM donde se observan estructuras aciculares asociadas a productos C-S-H. Fuente:[14]. . . . .	67
5.12. $\Delta$ pH a distintos días de activación (10% de reemplazo). Fuente: Elaboración propia. . . . .	68
5.13. Muestra de relave. Fuente: Elaboración propia. . . . .	70
8.1. Probeta post-ensayo de compresión. Fuente: Elaboración propia. . . . .	78
8.2. Probetas post-ensayo de flexión. Fuente: Elaboración propia. . . . .	78
8.3. Probetas post-ensayo de flexión. Fuente: Elaboración propia. . . . .	79
8.4. Probetas post-ensayo de compresión. Fuente: Elaboración propia. . . . .	79
8.5. Probeta post-ensayo de flexión (vista en planta). Fuente: Elaboración propia. . . . .	79
8.6. Probetas post-ensayo de compresión. Fuente: Elaboración propia. . . . .	80
8.7. Probetas post-ensayo de flexión. Fuente: Elaboración propia. . . . .	80
8.8. Probetas post-ensayo de compresión. Fuente: Elaboración propia. . . . .	80
8.9. Probetas post-ensayo de flexión. Fuente: Elaboración propia. . . . .	81
8.10. Probetas post-ensayo de compresión. Fuente: Elaboración propia. . . . .	81
8.11. Probetas post-ensayo de flexión. Fuente: Elaboración propia. . . . .	81
8.12. Probetas post-ensayo de compresión. Fuente: Elaboración propia. . . . .	82
8.13. Probetas post-ensayo de flexión. Fuente: Elaboración propia. . . . .	82
8.14. Probetas post-ensayo de compresión. Fuente: Elaboración propia. . . . .	82
8.15. Probetas post-ensayo de compresión. Fuente: Elaboración propia. . . . .	83
8.16. Probetas post-ensayo de flexión. Fuente: Elaboración propia. . . . .	83
8.17. Probetas post-ensayo de compresión. Fuente: Elaboración propia. . . . .	83
8.18. Probetas post-ensayo de flexión. Fuente: Elaboración propia. . . . .	84
8.19. Probetas post-ensayo de compresión. Fuente: Elaboración propia. . . . .	84
8.20. Probetas post-ensayo de flexión. Fuente: Elaboración propia. . . . .	84
8.21. Probetas post-ensayo de compresión. Fuente: Elaboración propia. . . . .	85
8.22. Probetas post-ensayo de flexión. Fuente: Elaboración propia. . . . .	85
8.23. Probetas post-ensayo de compresión. Fuente: Elaboración propia. . . . .	85
8.24. Probetas post-ensayo de compresión. Fuente: Elaboración propia. . . . .	86
8.25. Probetas post-ensayo de flexión. Fuente: Elaboración propia. . . . .	86
8.26. Probetas post-ensayo de flexión. Fuente: Elaboración propia. . . . .	86
8.27. Probetas post-ensayo de compresión. Fuente: Elaboración propia. . . . .	87

8.28. Probetas post-ensayo de flexión. Fuente: Elaboración propia. . . . .	87
8.29. Probetas post-ensayo de compresión. Fuente: Elaboración propia. . . . .	87
8.30. Reemplazo de cemento del 10% con un día de activación . . . . .	88
8.31. Reemplazo de cemento del 10% con tres días de activación . . . . .	89
8.32. Reemplazo de cemento del 10% con siete días de activación . . . . .	89
8.33. Reemplazo de cemento del 20% con siete días de activación . . . . .	90
8.34. Reemplazo de cemento del 30% con siete días de activación . . . . .	91

## Índice de cuadros

2.1. Clasificación del hormigón según por tipo de armadura. . . . .	21
2.2. Clasificación del hormigón según por densidad. . . . .	21
2.3. Cuadro 2.3: Clasificación del hormigón según su consistencia (ensayo del cono de Abrams). . . . .	21
2.4. Clasificación del hormigón según por tipo de árido. . . . .	22
2.5. Clasificación del hormigón según por resistencia. . . . .	22
2.6. Clasificación del hormigón según por exposición . . . . .	22
2.7. Clasificación del hormigón según por método de colocación. . . . .	22
2.8. Resumen de normas ASTM relevantes para el estudio. . . . .	24
2.9. Resumen de normas UNE-EN aplicables al estudio. . . . .	25
2.10. Resumen de referencias regulatorias de SERNAGEOMIN y marco ambiental aplicable en Chile. . . . .	26
3.1. Coeficiente de curvatura (Cc) y coeficiente de uniformidad (Cu). . . . .	29
3.2. Distribución de percentiles del relave. . . . .	30
3.3. Coeficiente de curvatura (Cc) y coeficiente de uniformidad (Cu) para Arena Fina. . . . .	31
3.4. Distribución de percentiles del material Arena Fina. . . . .	31
3.5. Dosificación de mezclas. . . . .	36
4.1. Asentamiento de cono según granulometría y porcentaje de reemplazo . . . . .	45
4.2. Asentamiento de morteros según condición, activación y granulometría del relave. . . . .	46
4.3. Valores de pH inicial (PHo) y final (PHf) de las pastas de relave para distintas granulometrías, tiempos de activación y porcentajes de reemplazo. . . . .	49
4.4. Datos densidad organizados por grupo (CTRL, RC10, RC20 y RC30). . . . .	52
5.1. Resistencia a compresión para diferentes granulometrías y días de activación. . . . .	56
5.2. Resistencia a flexión para diferentes granulometrías del relave y días de activación. . . . .	58
5.3. Asentamiento (cm) según granulometría y porcentaje de reemplazo. . . . .	61
5.4. Porcentaje en peso de las fases presentes en el relave. . . . .	69
5.5. Valores del porcentaje de liberación de los minerales para la muestra. . . . .	70

# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1 Contexto

Durante el siglo XIX, la minería en Chile se consolidó como la principal actividad económica a nivel nacional. En ese contexto histórico, la conciencia ambiental era prácticamente inexistente, a pesar de tratarse de una actividad con un alto impacto sobre el medio ambiente. En la actualidad, la minería continúa desempeñando un rol fundamental en la economía chilena, especialmente en la explotación de cobre. Chile ocupa el primer lugar a nivel mundial en producción de este mineral, con una participación aproximada del 24% del total global según el Consejo Minero de Chile [17].

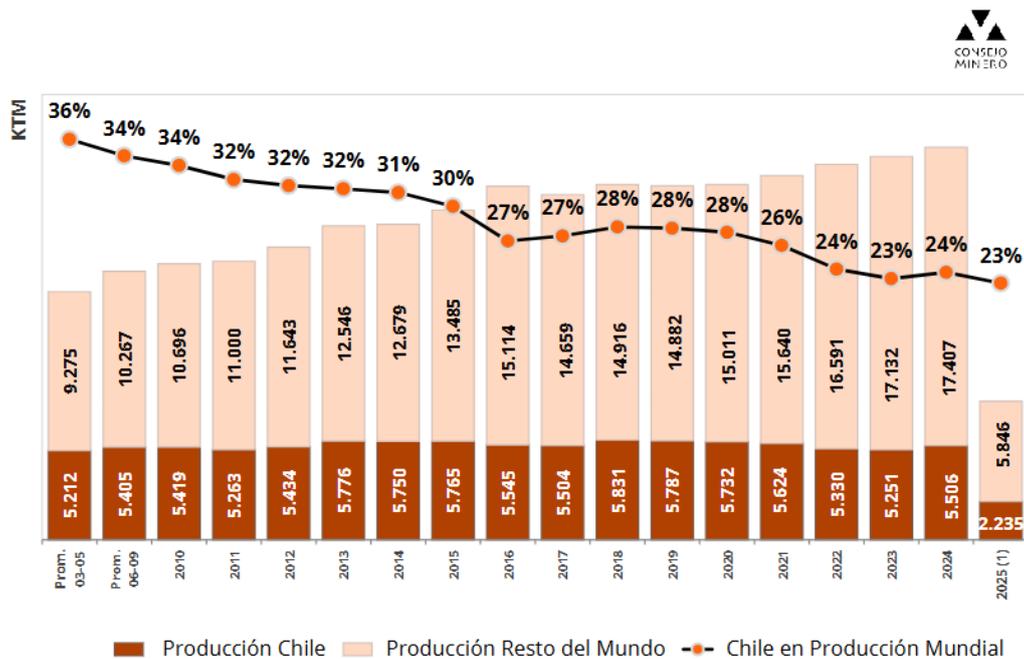


Figura 1.1: Producción de cobre en Chile y el resto del mundo, y participación de Chile en la producción mundial. Fuente:[17].

Este elevado nivel de producción implica, además de beneficios económicos, una considerable responsabilidad ambiental, ya que requiere de una sociedad comprometida con el medio ambiente, por su gran impacto sobre él. La legislación vigente exige medidas para mitigar los efectos negativos de la actividad minera; sin embargo, la magnitud de la industria obliga también a fomentar una mayor concienciación sobre su impacto en el medio ambiente. Entre los principales desafíos se encuentra la gestión de residuos mineros, particularmente los relaves,

subproductos generados durante el proceso de concentración del mineral, que consisten en materiales finos y estériles con potencial contaminante.

En Chile, se estima que se generan aproximadamente 537 millones de toneladas anuales de relaves según el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) [13], los cuales son comúnmente almacenados en grandes depósitos conocidos como tranques de relaves. Si estos depósitos no son gestionados adecuadamente, pueden representar un riesgo significativo para el medio ambiente y las comunidades cercanas, debido a posibles colapsos estructurales, filtraciones o emisiones de contaminantes.

En el presente trabajo se propone una alternativa sustentable para la reutilización de relaves mineros, dándoles una segunda vida a través de su incorporación en la elaboración de morteros. Para ello, se utilizó relave proveniente de una mina de Cu chilena que explota un yacimiento de tipo IOCG (iron oxide copper gold), ubicada en la Región de Atacama. Este depósito se encuentra clasificado como no activo según el Catastro de Depósitos de Relaves del SERNAGEOMIN [13].

La reutilización de este relave no solo permite valorizar un residuo potencialmente problemático, sino que también contribuye a disminuir la extracción de materias primas convencionales para la construcción, promoviendo así prácticas más sostenibles en el sector.

El objetivo principal de este estudio es evaluar el comportamiento del relave incorporado en morteros, para determinar su viabilidad técnica como material alternativo en aplicaciones constructivas.

## **1.2 Objetivos**

### **1.2.1 Objetivo General**

Evaluar el comportamiento mecánico de morteros con reemplazo parcial de cemento por relave minero de una mina de cobre, tratado mediante activación química con cal y molienda mecánica, mediante el análisis de su comportamiento en estado fresco y endurecido, con especial énfasis en su resistencia mecánica y estabilidad en el tiempo.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

1. Recopilar información sobre el relave proveniente de una mina de cobre, sus propiedades físicas y químicas, así como las normativas relacionadas con su reutilización en materiales de construcción.
2. Analizar antecedentes y estudios previos sobre la activación química y mecánica de relaves y su aplicación como material cementante suplementario.
3. Realizar tratamientos de activación química con cal y molienda mecánica a distintas fracciones del relave, y medir su evolución química mediante el pH.
4. Elaborar morteros con diferentes porcentajes de reemplazo de cemento por relave activado (10 %, 20 % y 30 %) y evaluar su trabajabilidad mediante el ensayo de cono de Abrams.
5. Someter las probetas a un proceso de curado de 28 días y posteriormente ensayarlas a flexión y compresión para determinar su resistencia mecánica.
6. Interpretar los resultados obtenidos y compararlos con referencias bibliográficas y con el desempeño de morteros convencionales.

## 2. ESTADO DEL ARTE

### 2.1 Conceptos previos: El relave

Es un tipo de residuo minero compuesto por partículas sólidas de grano fino. Este residuo es la fracción que se descarta del proceso de recuperación de minerales y metales valiosos. En el proceso de recuperación es clave la utilización de agua, lo que hace que el relave tenga una consistencia lodosa al final de este.

La generación de estos residuos hace indispensable la utilización de depósitos para su almacenamiento, con el fin de minimizar su impacto sobre el medio ambiente. Un depósito de relaves es una estructura diseñada para almacenar estos residuos lodosos, especialmente en minería de cobre.

Hay distintos tipos de depósitos que se clasifican según su contenido de agua y su forma de construcción. De esta forma, según el porcentaje de sólidos, los relaves se dividen en:

- Relaves convencionales: 30–50 % de sólidos.
- Relaves espesados: 55–75 % de sólidos.
- Relaves en pasta: más de 75 % de sólidos.
- Relaves filtrados: típicamente más del 80 % de sólidos.

#### **Relaves convencionales**

Son los más comunes por su bajo costo operativo. Estos se almacenan en tranques y embalses de relave.

- *Tranque de relave*: depósito en el que el muro se construye con la fracción más gruesa del relave (las arenas), que luego son compactadas. La parte fina se deposita en la cubeta (fondo). Es un método eficiente, pero requiere monitoreo constante por su alto contenido de agua y, a menudo, se diseña con cierto grado de impermeabilización para evitar filtraciones hacia el suelo o las napas subterráneas.



Figura 2.1: Vista aérea de un tranque de relaves.

- *Embalse de relave*: el muro de contención se construye con tierra y roca del entorno. Este se impermeabiliza tanto en su talud interno como en la parte superior o coronamiento.

### **Relaves espesados**

Tienen un mayor porcentaje de sólidos debido a que se someten a un proceso de espesamiento, que sedimenta gran parte de los sólidos. Este proceso se realiza principalmente para reducir el porcentaje de agua y facilitar su recuperación y reutilización.

### **Relaves filtrados**

Tipo de relave con menos del 20% de humedad (semiseco), ya que se hace pasar por filtros de prensa que permiten el paso del agua y retienen los sólidos mediante presión mecánica.

### **Relaves en pasta**

Con un porcentaje de agua entre 10% y 20%, tiene una consistencia espesa. Contiene una gran cantidad de partículas finas (menores a 20 micrones). Debido a su bajo contenido de agua, estos se depositan en seco en pilas, lo que reduce el riesgo de fallas catastróficas, ya que tienen alta estabilidad estructural.

Muchos relaves contienen minerales poco reactivos en estado natural (cuarzos, feldespatos, micas, etc), por eso activar puzolanicamente los relaves aumenta la reactividad química, para que estos puedan reaccionar con compuestos como el hidróxido de calcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) y formar productos cementantes como el gel C-S-H. Activar estos residuos es muy útil para la reutilización de estos, pudiendo transformar el relave de un pasivo ambiental a un recurso útil en la industria de la construcción. La activación de estos mejoran la durabilidad, resistencia química, y comportamiento a largo plazo. Además pueden mejorar la resistencia mecánica.

A continuación se describen los principales tipos de activación.

- *Activación mecánica*: tiene como objetivo reducir el tamaño de partícula mediante mo-

lienda, aumentando la superficie específica e induciendo una estructura más amorfa en los minerales al romper parcialmente su estructura cristalina.

- *Activación térmica:* se consigue calentando el relave a altas temperaturas ((normalmente entre 500°C y 800°C)). Si se excede la temperatura, puede ocurrir recristalización, lo que reduce la reactividad.
- *Activación química:* se utilizan activadores alcalinos (NaOH, Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>, KOH) que disuelven elementos como el silicio (Si) y el aluminio (Al), promoviendo la formación de geles cementantes como C-A-S-H o N-A-S-H.
- *Activación compuesta:* combinación de dos o más métodos anteriores (por ejemplo, activación mecano-química o termo-química) para potenciar la reactividad de los relaves de forma sinérgica.

## 2.2 Cemento, mortero y hormigón

### 2.2.1 Cemento

El cemento es un conglomerante hidráulico, es decir, un material inorgánico finamente molido que, al mezclarse con agua, forma una pasta que fragua y endurece debido a reacciones químicas de hidratación. Una vez endurecido, mantiene su resistencia incluso bajo el agua.

Está compuesto principalmente por los siguientes compuestos minerales:

- Silicato tricálcico (C3S)
- Silicato bicálcico (C2S)
- Aluminato tricálcico (C3A)
- Ferrita tetracálcica aluminoférrica (C4AF)

### Tipos de cementos

Según la norma UNE-EN 197-1, existen cinco tipos principales de cementos en función de su porcentaje de clínker y las adiciones utilizadas. En 2021, la norma UNE-EN 197-5 amplió esta clasificación al introducir nuevos tipos diseñados para reducir la huella de carbono mediante un mayor contenido de adiciones.

TIPOS DE CEMENTOS COMUNES Y COMPOSICIONES: PROPORCIÓN EN MASA (1)										
Tipo de cemento	Denominación	Designación	Clínker K	Escoria de hornos altos S	Humo de sílice D	Puzolanas naturales P	Cenizas volantes V	Caliza L	Componentes minoritarios adicionales (2)	
CEM I	Cemento Portland	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	0-5	
	Cemento Portland con escoria	CEM II/A-S CEM II/B-S	80-94 65-79	6-20 21-35	-	-	-	-	0-5 0-5	
CEM II	Cemento Portland con humo de sílice	CEM II/A-D	90-94	-	6-10	-	-	-	0-5	
	Cemento con puzolana	CEM II/A-P CEM II/B-P	80-94 65-79	-	-	6-20 21-35	-	-	0-5 0-5	
	Cemento Portland con ceniza volante	CEM II/A-V CEM II/B-V	80-94 65-79	-	-	-	6-20 21-35	-	0-5 0-5	
	Cemento Portland con caliza	CEM II/A-L	80-94	-	-	-	-	6-20	0-5	
	Cemento Portland mixto (3)	CEM II/A-M CEM II/B-M	80-94 95-79	6-20 (4) (5) 21-35 (4) (5) (6)						
	CEM III	Cemento de horno alto	CEM III/A CEM III/B	35-64 20-34	36-65 66-80	-	-	-	-	0-5 0-5
CEM IV	Cemento puzolánico	CEM IV/A	65-89	-	-	11-35 (4)	-	-	0-5	
		CEM IV/B	45-64	-	-	36-55 (4)	-	-	0-5	
CEM V	Cemento compuesto	CEM V/A	40-64	18-30	-	18-30	-	-	0-5	

Figura 2.2: Tipos de cementos según su composición. Fuente: [22].

- **CEM I: Cemento Portland.**

Compuesto en su mayoría por clínker (95–100 %). Ofrece alta resistencia y fraguado rápido. Se utiliza en estructuras de hormigón armado, prefabricados y obras que requieren resistencia temprana.

- **CEM II: Cemento Portland con adiciones.**

Contiene entre un 6 % y 35 % de adiciones minerales como escoria, cenizas volantes, puzolana, humo de sílice o caliza. Mejora la durabilidad y reduce el calor de hidratación. Es muy versátil y utilizado en hormigones generales.

- **CEM III: Cemento de escoria de horno alto.**  
Contiene entre un 36 % y 95 % de escoria siderúrgica granulada. Tiene bajo calor de hidratación y buena resistencia a ambientes agresivos como sulfatos o agua marina.
- **CEM IV: Cemento puzolánico.**  
Elaborado con puzolana natural o artificial (hasta un 55 %). Es resistente a ambientes químicos y genera poco calor durante el fraguado. Se emplea en presas, cimentaciones profundas y estructuras hidráulicas.
- **CEM V: Cemento compuesto.**  
Combina varias adiciones (escoria, cenizas, puzolana) en proporciones elevadas. Presenta una buena relación entre resistencia, durabilidad y sostenibilidad. Es apropiado para construcciones en entornos agresivos y proyectos de bajo impacto ambiental.
- **CEM II/C-M: Cemento Portland compuesto con varias adiciones.**  
Este tipo permite incorporar entre un 36 % y 50 % de materiales adicionales como escoria, cenizas volantes, puzolana o caliza. El objetivo principal es reducir el contenido de clínker y con ello las emisiones de CO<sub>2</sub>.
- **CEM VI: Cemento compuesto con alto contenido de adiciones.**  
Contiene entre un 35 % y 50 % de clínker y un 50 % a 65 % de una combinación de escoria, cenizas volantes, puzolana o caliza. Tiene una huella de carbono mucho menor y se orienta a proyectos sostenibles. A pesar del menor contenido de clínker, presenta un buen desarrollo de resistencia a largo plazo.

Además de los tipos normalizados CEM I a CEM V, también existen cementos especiales que responden a condiciones de servicio particulares. Entre ellos se encuentran los **cementos resistentes a sulfatos**, utilizados en suelos o aguas con alto contenido en sulfatos para evitar expansiones y fisuración; los **cementos marinos**, empleados en estructuras expuestas al agua de mar gracias a su buena durabilidad frente a cloruros; y los **cementos blancos**, destinados a aplicaciones arquitectónicas y estéticas por su elevada blancura. También destacan los **cementos de alta resistencia inicial (ARI)**, diseñados para alcanzar valores elevados de resistencia a edades muy tempranas, lo que permite un desencofrado rápido y un uso frecuente en prefabricados.

Existen además los **cementos de bajo calor de hidratación**, adecuados para estructuras masivas (presas, cimentaciones profundas), ya que reducen el riesgo de fisuración térmica durante el fraguado. Otro grupo importante son los **cementos aluminosos**, de fraguado rápido y gran resistencia inicial, empleados en reparaciones urgentes o en ambientes con temperaturas extremas. También se utilizan **cementos con bajo contenido de clínker** o con adiciones especiales para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub>, dentro de la tendencia hacia cementos más sostenibles.

## Fabricación del cemento

El proceso industrial para fabricar cemento Portland consta de las siguientes etapas:

1. **Obtención de materias primas:** se extraen de la cantera la caliza y las margas calcáreas (arcilla).
2. **Trituración:** la materia prima se transporta a una planta especial para su trituración.
3. **Prehomogeneización:** se mezclan las materias primas para asegurar una composición uniforme.
4. **Molienda de crudo:** se muele la mezcla anterior obteniendo un polvo fino llamado “crudo”.
5. **Pre calentamiento:** la mezcla pasa a través de una torre de ciclones, que la precalienta utilizando los gases calientes que libera el horno.
6. **Horno rotatorio:** la mezcla entra al horno rotatorio donde se alcanzan temperaturas de hasta 1500°C. Aquí se forman los principales compuestos del clínker:  $C_3S$ ,  $C_2S$ ,  $C_3A$  y  $C_4AF$ .
7. **Enfriamiento del clínker:** el clínker pasa por un sistema de enfriado rápido.
8. **Molienda final:** el clínker se mezcla con yeso y, a veces, con adiciones minerales. Se muele en conjunto para obtener lo que se conoce como cemento.
9. **Almacenamiento y despacho:** el cemento se almacena en silos y luego se transporta para su distribución en sacos (en España suelen ser de 25 kg) o a granel.

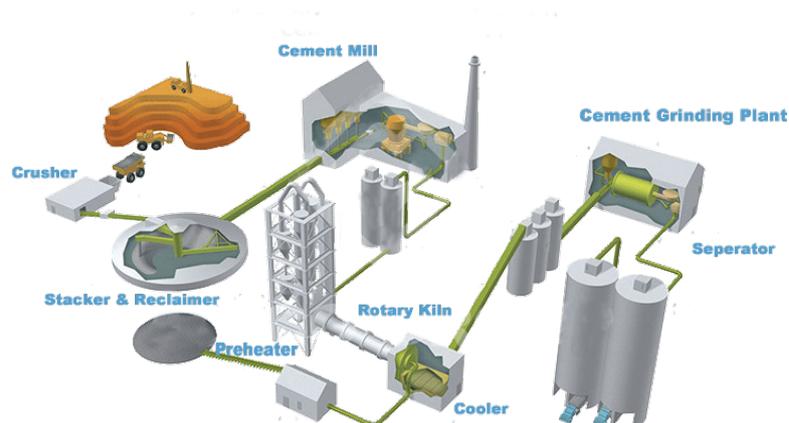


Figura 2.3: Proceso de fabricación del cemento. Fuente:[3].

## Proceso de calcinación

Durante el proceso de fabricación del clínker, en la etapa de calcinación dentro del horno rotatorio, se llevan a cabo diferentes reacciones térmicas según la temperatura que va alcanzando el polvo fino:

- **Pre calentador (< 1 minuto):** el material se precalienta con los gases del horno y elimina el agua libre por evaporación. Aquí comienza la descomposición de compuestos arcillosos.
- **Calcinación (~ 28 minutos):** en esta etapa se alcanzan temperaturas entre 600 y 900 °C. El carbonato cálcico ( $\text{CaCO}_3$ ) se descompone en óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ) y dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). Además, se forman minerales intermedios como la *belita* ( $\text{C}_2\text{S}$ ).
- **Transición (~ 5 minutos):** la temperatura llega aproximadamente a 1200 °C. El óxido de calcio libre ( $\text{CaO}$ ) reacciona con sílice ( $\text{SiO}_2$ ) y alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), generando compuestos como  $\text{C}_3\text{A}$  (aluminato tricálcico) y  $\text{C}_4\text{AF}$  (ferrito aluminato tetracálcico).
- **Sinterización (~ 10 minutos):** al alcanzar la temperatura máxima, que ronda los 1400 °C, aparece una fase líquida parcial (fusión controlada). Se forma la *alita* ( $\text{C}_3\text{S}$ ), fase responsable de la resistencia inicial del cemento.

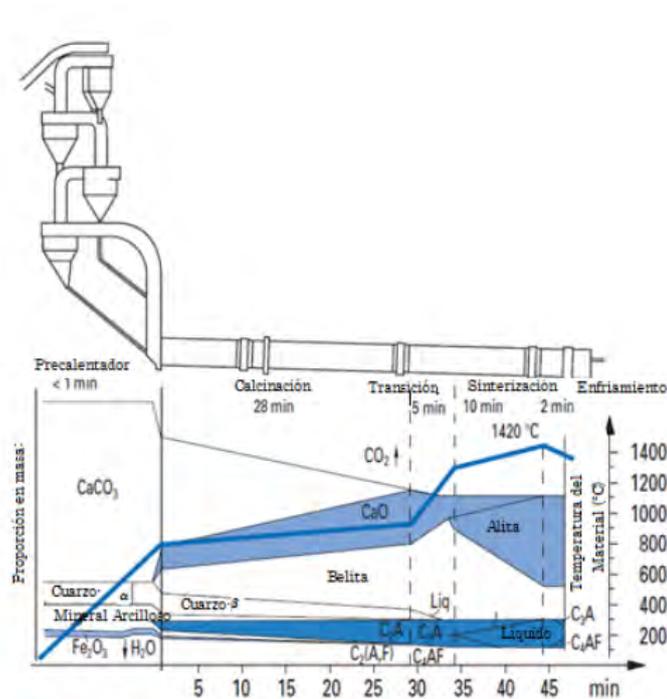


Figura 2.4: Fases dentro del horno rotatorio. Fuente:[12].

## Hidratación del cemento

La hidratación del cemento se produce cuando el cemento reacciona con el agua y desencadena una serie de cambios físico-químicos formando nuevos compuestos. Esta hidratación no ocurre de forma directa sino que se produce en las fases que se van a desarrollar a continuación.

- Fase inicial (primeros minutos):** en este primer contacto agua-cemento se produce la disolución de los componentes más solubles como los sulfatos y los aluminatos, dando lugar a nuevos compuestos como la etringita. También empieza a hidratarse el silicato tricálcico ( $C_3S$ ). Este proceso libera calor de forma intensa, lo que se conoce como el “pico exotérmico inicial”. A nivel físico, se aprecia un cambio en la fase líquida de la mezcla aunque todavía no se forma suficiente cantidad de productos de hidratación (como el gel C-S-H o el hidróxido de calcio) como para generar resistencia mecánica significativa.

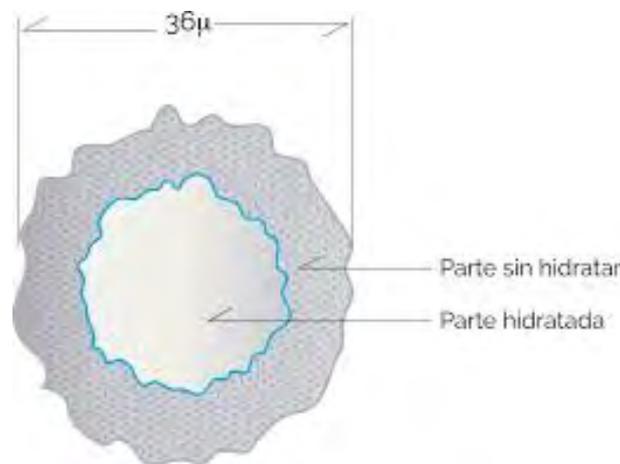


Figura 2.5: Esquema del patrón de formación de la hidratación del cemento. Fuente:[1].

- Fase de inducción (de 1 a 4 horas):** una vez pasado el pico exotérmico inicial, la velocidad de reacción disminuye. Se produce una disminución en la disolución de los silicatos ( $C_3S$  y  $C_2S$ ) y aumenta la concentración de calcio en el agua que queda entre los granos de cemento. Esta acumulación da lugar a la formación de los primeros núcleos de C-S-H (gel de silicato cálcico hidratado) y de hidróxido de calcio ( $Ca(OH)_2$ ), responsables de dar la resistencia a la mezcla. Físicamente, comienza a reducirse muy lentamente la porosidad, aunque sin ganancia mecánica relevante. La morfología de los cristales que se forman en esta etapa puede influir en la trabajabilidad del hormigón fresco.
- Fase de aceleración (aproximadamente de la 3ª a la 12ª hora):** en esta etapa se produce un aumento de la velocidad de las reacciones, siendo la etapa en la que más productos de hidratación se forman en un corto periodo de tiempo. El silicato tricálcico ( $C_3S$ ) reacciona intensamente con el agua, formando grandes cantidades de gel C-S-H y CH. A raíz de esto, la porosidad disminuye bruscamente y se libera una gran cantidad de calor (segundo pico exotérmico). Desde el punto de vista estructural, se puede destacar que durante esta etapa se produce el fraguado inicial, momento en el que el material comienza a adquirir rigidez y pierde su trabajabilidad, comenzando el desarrollo de la resistencia mecánica temprana.

- **Fase de post-aceleración (desde las 12 horas):** las reacciones continúan pero a un ritmo mucho más lento. Se sigue formando C-S-H y CH, y algunos compuestos como la etringita se transforman en monosulfato de calcio. Además, las cadenas de sílice (SiO<sub>2</sub>) que se han ido formando empiezan a unirse en estructuras más complejas y compactas, haciendo la estructura más densa. La liberación de calor irá disminuyendo, al igual que la velocidad de reacción. A medida que esta fase continúa, el cemento sigue mejorando su resistencia, se vuelve menos poroso y aumenta la adherencia de la grava y la arena. Esta etapa es muy importante porque garantiza que el hormigón sea resistente con el tiempo, más duradero, estable y menos propenso a absorber agua.

### 2.2.2 Mortero

Material utilizado en la construcción, formado por una mezcla homogénea de uno o varios conglomerantes (como cemento o cal), áridos finos (arena), agua y, a veces, aditivos o adiciones que mejoran sus propiedades. Según las normas **UNE-EN 998-1** y **UNE-EN 998-2**, el mortero se utiliza principalmente para dos aplicaciones: la unión de elementos de albañilería y el revestimiento de superficies. La norma UNE-EN 998-1 regula los morteros para revoco y enlucido (revestimientos), mientras que la UNE-EN 998-2 se enfoca en los morteros para albañilería.

En cuanto a los tipos, los morteros para revestimiento pueden clasificarse como:

- **GP:** mortero de uso general,
- **LW:** mortero ligero,
- **OC:** mortero de cal aérea,
- **CR:** mortero de conservación, y
- **R:** mortero de renovación.

Cada uno de estos tipos tiene características específicas según su uso previsto. Por otro lado, los morteros para albañilería se dividen en morteros *diseñados*, cuya composición está formulada con proporciones específicas de materiales, y morteros *prescritos*, definidos por sus propiedades finales. Además, estos se clasifican según su resistencia a compresión a 28 días en categorías como M2,5, M5, M10, M15 y M20.

### 2.2.3 Hormigón

El hormigón es un material estructural ampliamente utilizado en obras de ingeniería y arquitectura, compuesto por cemento, áridos gruesos y finos, agua y, en algunos casos, aditivos o adiciones que modifican sus propiedades. Según la norma **UNE-EN 206**, el hormigón, una vez mezclado, fragua y endurece gracias a la hidratación del cemento, desarrollando una alta resistencia mecánica y durabilidad.

Se clasifica de diversas formas en función de su composición, aplicación y comportamiento. Según la presencia o no de armaduras, se distingue entre:

- **Hormigón en masa:** sin refuerzo,

- **Hormigón armado:** con barras de acero pasivas,
- **Hormigón pretensado:** con cables activos sometidos a tensión previa.
- **Hormigón postensado:** con cables activos que se tensan después del endurecimiento del hormigón.

En función de su densidad, el hormigón puede ser:

- **Ligero:** densidad menor a  $2000 \text{ kg/m}^3$ ,
- **Normal:** entre  $2000$  y  $2600 \text{ kg/m}^3$ ,
- **Pesado:** mayor a  $2600 \text{ kg/m}^3$

Cuadro 2.1: Clasificación del hormigón según por tipo de armadura.

Tipo o Subcategoría	Descripción breve
Hormigón simple	Sin armadura
Hormigón armado	Con barras de acero pasivas
Hormigón pretensado	Con cables activos tensados

Cuadro 2.2: Clasificación del hormigón según por densidad.

Tipo o Subcategoría	Descripción breve
Ligero ( $< 2000 \text{ kg/m}^3$ )	Para aligerar estructuras
Normal ( $2000\text{--}2600 \text{ kg/m}^3$ )	Uso común en estructuras
Pesado ( $> 2600 \text{ kg/m}^3$ )	Protección radiológica o contrapesos

Cuadro 2.3: Cuadro 2.3: Clasificación del hormigón según su consistencia (ensayo del cono de Abrams).

Tipo o Subcategoría	Asiento en cono de Abrams (cm)	Forma de compactación
Seca	0 – 2	Vibrado enérgico en taller
Plástica	3 – 5	Vibrado enérgico en obra
Blanda	6 – 9	Vibrado o apisonado
Fluida	10 – 15	Picado con barra
Líquida	$\geq 16$	No apta para elementos resistentes

La consistencia del hormigón se determina mediante el ensayo del *cono de Abrams*, que mide la facilidad de deformación de la mezcla fresca. El procedimiento consiste en llenar un molde troncocónico en tres capas compactadas, retirar el molde verticalmente y medir la diferencia entre la altura inicial del cono y la altura final que alcanza el hormigón tras su asentamiento. Esta diferencia, denominada *asentamiento*, indica la fluidez del hormigón: un mayor asentamiento corresponde a una mezcla más plástica y fluida, mientras que un asentamiento menor refleja un hormigón más seco y rígido.

Cuadro 2.4: Clasificación del hormigón según por tipo de árido.

<b>Tipo o Subcategoría</b>	<b>Descripción breve</b>
Árido silíceo	Árido común en obra
Árido calizo	Árido calcáreo, reacción diferente
Árido reciclado	Reutilización de residuos

Cuadro 2.5: Clasificación del hormigón según por resistencia.

<b>Tipo o Subcategoría</b>	<b>Descripción breve</b>
Clases C20/25, C25/30, etc.	Resistencia a compresión (MPa)

Cuadro 2.6: Clasificación del hormigón según por exposición .

<b>Tipo o Subcategoría</b>	<b>Descripción breve</b>
XC (carbonatación)	Corrosión por carbonatación
XD (cloruros no marinos)	Corrosión por cloruros (no marino)
XS (cloruros marinos)	Corrosión por ambiente marino
XF (hielo-deshielo)	Exposición a ciclos de hielo-deshielo
XA (ataque químico)	Exposición a químicos agresivos

Cuadro 2.7: Clasificación del hormigón según por método de colocación.

<b>Tipo o Subcategoría</b>	<b>Descripción breve</b>
Vertido en obra	Hormigón vertido directamente
Bombeado	Transportado por tuberías
Proyectado (shotcrete)	Aplicado por proyección neumática
Prefabricado	Fabricado fuera de obra

## 2.3 Normativa y legislación

La incorporación de residuos mineros en productos de construcción está regulada por un conjunto de normas técnicas que aseguran su seguridad estructural, durabilidad, comportamiento ambiental y compatibilidad con el uso previsto.

### 2.3.1 Normas ASTM relevantes

Las normas ASTM (American Society for Testing and Materials) son ampliamente utilizadas en ensayos de materiales de construcción en Latinoamérica. Las más relevantes para este trabajo son:

- **ASTM C618** — Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete: define los requisitos químicos y físicos mínimos que deben cumplir los materiales puzolánicos para su uso en concreto; sirve como referencia para validar la actividad pozolánica de los relaves.
- **ASTM C1437** — Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar: mide la trabajabilidad de morteros mediante la prueba de expansión en mesa de sacudidas.
- **ASTM C305** — Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars: establece un protocolo estándar para el mezclado de morteros en laboratorio, garantizando reproducibilidad.
- **ASTM C348 y ASTM C349** — normas para ensayos de resistencia a flexión y compresión de morteros, respectivamente; se aplicaron para evaluar el comportamiento mecánico de las probetas.

Otras ASTM de apoyo (cuando correspondan):

- **ASTM C144** — Aggregate for Masonry Mortar (árido para morteros de albañilería).
- **ASTM C270** — Mortar for Unit Masonry (clasificación y requisitos de morteros de albañilería).
- **ASTM C136/C136M** — Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates (granulometría por tamizado).
- **ASTM C230/C230M** — Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement (equipo de mesa de fluidez usado por C1437).

Estas normas permiten comparar los resultados con valores de referencia aceptados internacionalmente, asegurando que los morteros modificados con relave se mantengan dentro de márgenes de seguridad.

Norma	Objeto	Aplicación en este estudio
ASTM C618	Especificación de ceniza volante y puzolanas naturales para uso en concreto; requisitos químicos y físicos.	Referencia para validar la actividad puzolánica del relave.
ASTM C1437	Ensayo de fluidez de morteros (mesa de sacudidas).	Control de trabajabilidad/consistencia del mortero.
ASTM C305	Mezclado mecánico de pastas y morteros de cementos hidráulicos.	Protocolo de amasado en laboratorio, reproducibilidad.
ASTM C348	Resistencia a flexión de morteros de cemento.	Ensayo mecánico de probetas.
ASTM C349	Resistencia a compresión de morteros de cemento.	Ensayo mecánico de probetas.
ASTM C144	Árido para morteros de albañilería.	Comparativo de requisitos del árido fino.
ASTM C270	Mortero para albañilería (clasificación y requisitos).	Marco de desempeño del mortero.
ASTM C136/C136M	Análisis granulométrico por tamizado.	Verificación de la curva granulométrica del árido.
ASTM C230/C230M	Mesa de fluidez para ensayos de cementos.	Equipo usado en el ensayo de fluidez (C1437).

Cuadro 2.8: Resumen de normas ASTM relevantes para el estudio.

### 2.3.2 Normas UNE aplicables

En Europa las normas UNE-EN regulan la fabricación, control y uso de materiales cementicios. Las aplicables en este estudio son:

- **UNE-EN 197-1** — Cementos comunes: composición, especificaciones y criterios de conformidad (CEM I a CEM V).
- **UNE-EN 196-1** — Métodos de ensayo de cementos: determinación de resistencias mecánicas (probetas 40 × 40 × 160 mm para mortero patrón de cemento).
- **UNE-EN 998-1** y **UNE-EN 998-2** — Morteros para revoco/enlucido y morteros para albañilería: clasificación, requisitos y evaluación de la conformidad.

Normas UNE complementarias clave:

- **UNE-EN 13139** — Áridos para morteros (granulometría, finos y sustancias nocivas).
- **UNE-EN 1008** — Agua de amasado para hormigón: muestreo, ensayo e idoneidad (referenciada por UNE-EN 998-1/998-2 para morteros).
- **Serie UNE-EN 1015** (métodos de ensayo de morteros de albañilería):
  - 1015-2 muestreo y preparación;
  - 1015-3 consistencia por mesa de sacudidas;
  - 1015-6 densidad aparente del mortero fresco;
  - 1015-7 contenido de aire del mortero fresco;
  - 1015-11 resistencia a flexión y compresión del mortero endurecido;
  - 1015-18 absorción de agua por capilaridad;
  - 1015-19 densidad aparente del mortero endurecido.
- **UNE-EN 933-1** — Ensayos de áridos: análisis granulométrico por tamizado.

■ **UNE-EN 196-5** — Determinación de la puzolanicidad de cementos puzolánicos.

Estas normativas garantizan la calidad de los productos y permiten certificar que, pese al uso de materiales alternativos como relaves, los morteros cumplan con las exigencias técnicas del sector de la construcción.

Norma	Objeto	Aplicación en este estudio
UNE-EN 197-1	Cementos comunes: composición, especificaciones y criterios de conformidad (CEM I–V).	Clasificación del cemento empleado (equivalente CEM IV puzolánico).
UNE-EN 196-1	Métodos de ensayo de cementos: determinación de resistencias mecánicas (prismas 40 × 40 × 160 mm).	Metodología para ensayos mecánicos en mortero patrón.
UNE-EN 998-1 / 998-2	Morteros para revoco/enlucido y para albañilería: clasificación, requisitos y evaluación de la conformidad.	Marco de diseño y verificación según uso previsto.
UNE-EN 13139	Áridos para morteros: requisitos de granulometría, contenido de finos y sustancias nocivas.	Clasificación del árido 0/1 – GF85; verificación de tamices y finos.
UNE-EN 1008	Agua de amasado para hormigón: muestreo, ensayos e idoneidad (aplicable a morteros vía 998-1/998-2).	Conformidad del agua potable/atemperada utilizada.
UNE-EN 1015-2 / -3 / -6 / -7 / -11 / -18 / -19	Serie de métodos de ensayo de morteros de albañilería: preparación, consistencia (mesa), densidad fresca, aire, resistencias, capilaridad y densidad endurecida.	Ensayos de control en estado fresco y endurecido.
UNE-EN 933-1	Ensayos de áridos: análisis granulométrico por tamizado.	Determinación de la curva granulométrica del árido fino.
UNE-EN 196-5	Determinación de la puzolanicidad de cementos puzolánicos.	Evaluación de reactividad cuando el relave actúa como adición.

Cuadro 2.9: Resumen de normas UNE-EN aplicables al estudio.

**Normativa española aplicable: CE-21 (Código Estructural, 2021)**

El **Código Estructural (CE-21)**, aprobado por el RD 470/2021, regula el proyecto, la ejecución y el control de las estructuras de hormigón, acero y mixtas en España. En relación con el *hormigón con materiales reciclados*, CE-21:

- **Admite el uso de materiales con contenido reciclado** (p. ej., áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición y adiciones cementicias) siempre que se demuestre su aptitud y se cumpla la normativa.
- **Exige trazabilidad y control del origen** del árido reciclado, su clasificación (p. ej., árido reciclado de hormigón vs. mixto) y el cumplimiento de **UNE-EN 12620** (áridos para hormigón) y **UNE-EN 206:2013+A1:2018** (hormigón).
- **Establece requisitos de calidad** del árido reciclado: composición y contenido de impurezas, granulometría, densidad y absorción, resistencia a fragmentación (ensayo de desgaste Los Ángeles), cloruros, sulfatos y yesos, entre otros, con el correspondiente control de recepción por lotes y ensayos.
- **Limita la aplicación en función del ambiente de exposición y del tipo de elemento:** el porcentaje de sustitución y las fracciones granulométricas deben justificarse mediante dosificación y control, priorizando el uso en fracción gruesa y en clases ambientales no severas cuando proceda.
- **Coordina con cementos UNE-EN 197-1/197-5:** permite cementos con adiciones (CEM II–V) y adiciones tipo escoria, cenizas volantes o puzolanas, en el marco de durabilidad y reducción de huella de carbono.

*Nota:* para proyectos concretos debe verificarse la clase de exposición, la dosificación, los límites de sustitución, y el plan de control y de trazabilidad establecidos por CE-21 y las UNE aplicables.

### 2.3.3 Regulación minera y ambiental

En Chile, el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) regula la clasificación, caracterización y gestión de relaves. Se consideró esta regulación debido a que el estudio experimental se desarrolló en Chile y el relave es procedente de una mina de Chile igualmente. Referencias relevantes:

- **Catastro Nacional de Depósitos de Relaves:** información sobre estado y tipo de depósitos (activos, inactivos, abandonados).
- **Decreto Supremo N.º 248 (2007)** — Reglamento para la aprobación de proyectos de diseño, construcción, operación y cierre de depósitos de relaves.
- **Decreto Supremo N.º 132** — Reglamento de Seguridad Minera.
- **Protocolos/guías para la evaluación ambiental de relaves mineros:** métodos para evaluar peligrosidad, lixiviación de metales y potencial de drenaje ácido.
- **Marco ambiental complementario:** ingreso al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA, DS N.º 40) cuando corresponda; cumplimiento de normativa de calidad y emisión aplicable.

Aunque estas regulaciones no fijan condiciones para la reutilización directa en materiales de construcción, sí determinan las características básicas para manipular un relave con seguridad, aspecto clave para su traslado y aplicación en obra.

Norma/Referencia	Objeto	Aplicación en este estudio
Catastro Nacional de Depósitos de Relaves	Instrumento de información sobre estado y tipo de depósitos (activos, inactivos, abandonados), ubicación y características básicas.	Identificación del depósito de origen y su condición.
DS N.º 248 (2007)	Reglamento para la aprobación de proyectos de diseño, construcción, operación y cierre de depósitos de relaves.	Referencia de gestión y seguridad del depósito de origen y durante el manejo/traslado del material.
DS N.º 132	Reglamento de Seguridad Minera: disposiciones de seguridad aplicables a faenas mineras y manejo de relaves.	Condiciones de seguridad en la manipulación, transporte y almacenamiento del material.
Protocolos/guías de evaluación ambiental de relaves	Metodologías para evaluar peligrosidad, lixiviación de metales y potencial de drenaje ácido, entre otros parámetros.	Caracterización ambiental del relave previa a su utilización en morteros.
SEIA (DS N.º 40)	Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental: procedimiento de ingreso y evaluación de proyectos con potencial impacto ambiental.	Determinación de permisos y evaluaciones cuando corresponda al manejo/traslado o tratamiento de relaves.

Cuadro 2.10: Resumen de referencias regulatorias de SERNAGEOMIN y marco ambiental aplicable en Chile.

## 2.4 Literatura y actualidad

La investigación sobre el uso de relaves como reductor del conglomerante principal ha tenido y tiene mucha relevancia en la actualidad, ya que busca reducir el impacto que estos residuos generan sobre el medio ambiente, pudiendo reutilizarlos como un componente más en la fabricación de morteros y hormigones.

### 2.4.1 Actualidad de la incorporación de relaves en morteros y hormigones

Como se describe en este apartado, existen estudios que han demostrado la posibilidad de la incorporación de relave activado, ya sea mecánicamente, térmicamente o químicamente, como sustituto parcial del cemento o de los áridos. En diversas investigaciones se ha observado el efecto que estos tiene sobre la resistencia, la trabajabilidad y la durabilidad.

En el estudio de Larenas Mora (2024) [19], titulado *Análisis de estabilidad química y física de morteros con sustitución de arena por material de relave*, se estudió el comportamiento mecánico y químico de morteros en los que se reemplazó parcialmente la arena por relave de cobre, en proporciones del 10 % al 50 %. El objetivo principal fue evaluar la durabilidad de estos morteros frente a un ataque ácido. Como resultado, se obtuvo que los morteros con un 20 % y 30 % de reemplazo tuvieron mejores resultados que un mortero convencional, con mejoras en la resistencia principalmente. En cuanto al ataque ácido, este grupo tuvo una mayor estabilidad química frente a otros (84 días de inmersión), con pocos cambios físicos y baja liberación de metales pesados. A diferencia, por ejemplo, de los reemplazos superiores al 40 % que presentaron deterioros y expansiones.

Otro estudio de Cárdenas Ticlavilca y Félix José (2019) [25], titulado *Propuesta de uso de relaves de mina polimetálica en la fabricación de materiales de construcción*, demostró una vez más la viabilidad de la utilización de relave, en este caso como agregado fino en la producción de bloques de concreto estructural. Al igual que en el estudio anterior, se diseñaron mezclas, en este caso con un 25 %, y presentaron una alta resistencia a la compresión, baja absorción de agua y buena densidad. Además, se observó que no liberaba metales pesados como arsénico, cadmio y mercurio. En cuanto a la evaluación económica, se reveló que estos eran un 12 % más baratos que uno convencional, lo que afirma que no solo el relave es útil en cuanto a propiedades físicas y químicas, sino que además resulta económicamente rentable.

De manera complementaria, Castro (2023) [4] analizó la viabilidad de emplear relaves de cobre como material cementante alternativo en la elaboración de morteros geopoliméricos, en su trabajo titulado *Uso de relaves de cobre como material cementante en morteros*. El objetivo principal de este estudio fue analizar el comportamiento mecánico y la trabajabilidad de estos morteros con relave activado con solución alcalina. Entre los resultados obtenidos se destaca que este mortero dio una resistencia de 2,5 MPa, lo que confirma que este tipo de mezcla no puede ser utilizada para morteros estructurales, pero sí como revestimiento. A su vez, la trabajabilidad presentó una consistencia seca, lo que le permite al autor concluir que es posible mejorarla con un ajuste en la mezcla, en los materiales de la activación o mediante aditivos.

Anicama Acosta (2010) [2], en este caso, realizó reemplazos parciales de cemento en un 10 % a un 25 % con tres tipos de relaves. Se evaluaron sus propiedades tanto en fresco —como la trabajabilidad, el aire o la temperatura— como en estado endurecido —resistencia a compresión, tracción y abrasión—.

De entre los resultados, podemos destacar el relave de Andaychagua en un reemplazo del 10 %, que presentó la mejor resistencia a la compresión sin afectar a la trabajabilidad.

Por todo ello, se espera que al realizar este reemplazo se obtengan resultados similares y favorables en comparación con los estudios anteriores, que justifique la viabilidad de la utilización de relaves como sustituto parcial del cemento. De confirmarse esta hipótesis, se abriría la posibilidad de ampliar las aplicaciones prácticas de los relaves en diferentes áreas de la construcción.

#### **2.4.2 Investigaciones recientes**

En el estudio realizado por Kotthoff Cáceres (2020) [8], titulado *Mineralogía de depósitos de relave en Chile y relación con yacimientos*, se evaluaron tres depósitos de relaves de distintos yacimientos chilenos: un pórfido cuprífero (Cauquenes), un IOCG (El Buitre) y un sistema de vetas polimetálicas (Bellavista). El objetivo de este estudio fue identificar elementos de valor económico y ver en qué fases minerales se encontraban. Se encontró que, efectivamente, los relaves aún contenían elementos con valor económico como cobre, hierro, molibdeno, cobalto y tierras raras, que se encontraban principalmente en minerales como calcopirita, pirita, magnetita, molibdenita y apatito.

Además, en los relaves provenientes de pórfidos cupríferos e IOCG se mantiene la mineralogía de sus yacimientos originales. Se concluyó que, a pesar de que estos elementos están en concentraciones bajas, es una opción viable desde el punto de vista técnico y económico, y puede traer beneficios ambientales y financieros al convertir estos depósitos en nuevas fuentes de recursos valiosos.

En el estudio realizado por Greet et al. (2017) [16], titulado *Fine Grinding: How Mill Type Affects Particle Shape Characteristics and Mineral Liberation*, se analizó cómo el tipo de molino afectaba las propiedades de las partículas. Se estudiaron tres tipos: molino de bolas (convencional), IsaMill™ (molino horizontal con agitación intensa) y SMD™ (Stirred Media Detritor, molino vertical de agitación), y se caracterizaron las siguientes propiedades: granulometría, forma de partícula (elongación, angularidad) y grado de liberación mineral.

Aunque todos los molinos alcanzaron granulometrías similares, hubo diferencias en la distribución y la forma. El molino de bolas genera partículas más redondeadas y alargadas; por el contrario, el IsaMill™ y el SMD™ producen partículas más angulosas, con formas irregulares y menos elongadas. El IsaMill™ produjo una distribución más uniforme y un mayor porcentaje de partículas por debajo de 20  $\mu\text{m}$ , mientras que el molino de bolas mostró una curva de distribución más amplia, con más partículas gruesas residuales.

El IsaMill™ y el SMD™ generaron mejor liberación de minerales valiosos, debido a la mayor generación de fracturas a lo largo de las interfaces mineralógicas. Así, se concluye que efectivamente el tipo de molino afecta las propiedades de las partículas resultantes.

### 3. METODOLOGÍA E INSTRUMENTACIÓN

#### 3.1 Materiales y preparación de muestras

Para la realización del trabajo de laboratorio se emplearon, de acuerdo con los objetivos del estudio, los siguientes componentes principales, cuyas características se describen a continuación en relación con su aplicación en las muestras.

- **Relave:** El relave utilizado para el presente trabajo proviene de un tranque de relaves de una mina de cobre que explota un yacimiento de tipo IOCG (iron oxide copper gold). Este depósito se encuentra ubicado en la **III Región de Atacama**, y está clasificado por el **SERNAGEOMIN** como **no activo**. Se trata de un residuo resultante del proceso de recuperación del cobre. Los datos sobre su granulometría se pueden encontrar en la **Figura 3.1** y en los **Cuadros 3.1** y 3.2.

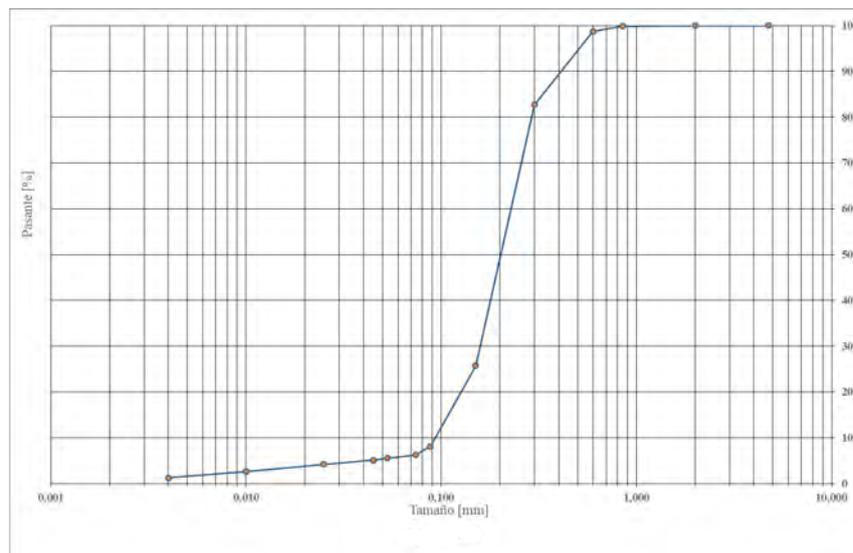


Figura 3.1: Granulometría relave. Fuente:[21].

<b>CC</b>	1,18
<b>Cu</b>	2,45

Cuadro 3.1: Coeficiente de curvatura (Cc) y coeficiente de uniformidad (Cu).

Percentil	Relave micrones
D80	290,3
D60	227,7
D30	158,1
D10	93,1

Cuadro 3.2: Distribución de percentiles del relave.

- **Arena:** El árido utilizado para los morteros se clasifica como árido fino y natural, que cumple requisitos de la norma UNE-EN 13139 como árido para morteros con granulometría (0/1 – GF85). En la parte superior de la **Figura 3.2** podemos encontrar el árido utilizado. La especificaciones sobre la granulometria se pueden encontrar en la **Figura 3.3** y en los **Cuadros 3.3** y 3.4.



Figura 3.2: Fotografía tomada en el laboratorio de ensayos de distintos tipos de áridos. Fuente: Elaboración propia.

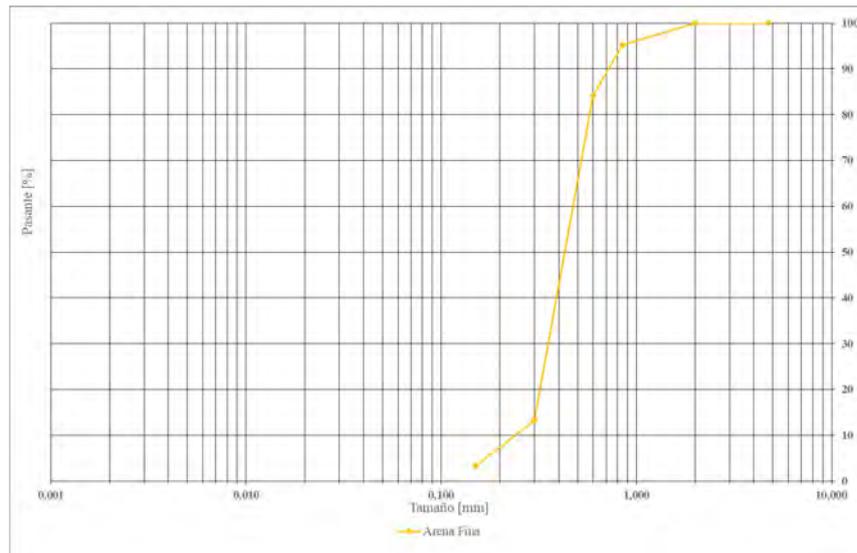


Figura 3.3: Granulometría Arena. Fuente:[21].

<b>CC</b>	1,10
<b>Cu</b>	1,99

Cuadro 3.3: Coeficiente de curvatura (Cc) y coeficiente de uniformidad (Cu) para Arena Fina.

<b>Percentil</b>	<b>Arena micrones</b>
D80	576,3
D60	473,9
D30	353,4
D10	238,8

Cuadro 3.4: Distribución de percentiles del material Arena Fina.

- **Cemento:** para los morteros se utilizó cemento marca Bío Bío especial, formado por clinker, puzolana y yeso; su equivalente UNE-EN 197-1 es un cemento común tipo CEM IV (puzolánico).

En la **Figura 3.4** y la **Figura 3.5** se muestran los resultados de la caracterización granulométrica mediante análisis láser. *Size distribution* corresponde a la frecuencia relativa o densidad de probabilidad en función del tamaño de partícula, y *Undersize* al porcentaje de partículas menores a un cierto tamaño.

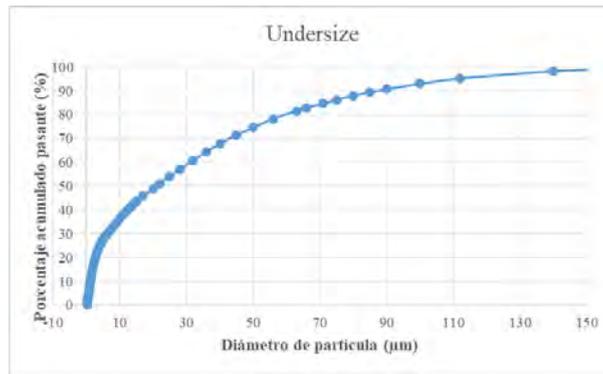


Figura 3.4: Porcentaje de partículas menores a un cierto tamaño del cemento. Fuente:[21].

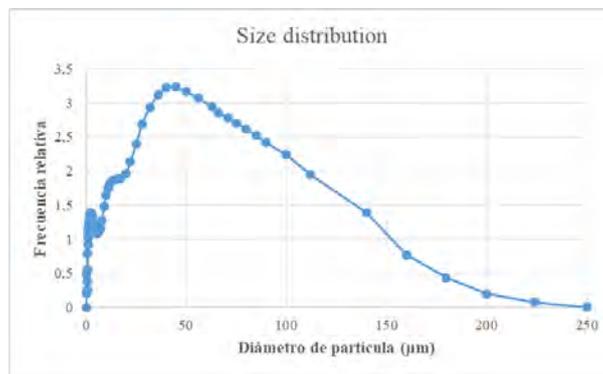


Figura 3.5: Frecuencia relativa en función del tamaño de partícula del cemento. Fuente:[21].

- **Agua:** Para las mezclas se empleó agua potable de la red pública de Concepción (Chile). Esta además era agua atemperada para favorecer un endurecimiento más rápido del mortero. Conforme a UNE-EN 1008 y según lo permitido por UNE-EN 998-1/998-2.

### 3.2 Parametros de estudio

Con el objetivo de garantizar un control adecuado y verificar que el desarrollo del estudio se ajusta a lo esperado, se midieron los siguientes parámetros de estudio.

Se consideraron como parámetros principales la trabajabilidad, el pH de las pastas de relave, la densidad de las probetas curadas y las resistencias mecánicas a flexión y compresión.

La medición de pH es fundamental para poder evaluar la reactividad química de los relaves activados. Un descenso en los valores de pH es indicativo de que parte del hidróxido de calcio añadido ha reaccionado con los componentes del relave (sílice, alúmina, etc.), favoreciendo la formación de compuestos cementantes secundarios. En morteros y hormigones, un pH elevado es esencial para mantener un medio altamente alcalino que garantice la estabilidad química del sistema y en estructuras que requieran de armadura, proteja al acero frente a la corrosión. Gracias a este seguimiento podemos ver la viabilidad de utilizar este residuo como material cementante suplementario, ya que valores estables o en descenso controlado reflejan un buen grado de interacción con la cal y, por ende, una mayor durabilidad del mortero.



Figura 3.6: Medidor de pH utilizado en los ensayos.

La importancia de llevar un control de la trabajabilidad mediante el cono de Abrams es que permite saber cuánto de fluida es la mezcla en estado fresco, una trabajabilidad adecuada asegura un buen llenado de moldes y una distribución homogénea de los materiales. Está directamente relacionada con la demanda de agua, la granulometría y la finura de los componentes. Y en este caso sirve para saber como afecta el reemplazo del cemento por el relave.

La densidad aparente de las probetas en estado endurecido es un parámetro fundamental porque está directamente relacionada con la porosidad de la matriz. Una mayor densidad suele asociarse a una microestructura más compacta y, por tanto, a mejores propiedades mecánicas y mayor durabilidad del material. Por el contrario, una densidad reducida puede reflejar una mezcla más porosa, con menor resistencia y mayor susceptibilidad frente a agentes externos.

Por último, a evaluación de la resistencia mecánica constituye uno de los parámetros más relevantes en el estudio de morteros y hormigones, ya que define su capacidad estructural y su aptitud para distintas aplicaciones constructivas.

### 3.3 Preparación del relave

El relave descrito anteriormente que se utilizó para la elaboración de los morteros pasó por dos tipos de activaciones: mecánica y química.

Antes de eso se separó en dos fracciones, fina y gruesa, por encima y por debajo de  $150\ \mu\text{m}$ , formándose así tres grupos de tratamiento:

1. Fracción fina activada químicamente.
2. Fracción fina molida, luego activada químicamente.
3. Fracción gruesa molida unida a la fracción fina sin moler, y activadas químicamente en conjunto.



Figura 3.7: Fotografía del panel de mando del molino de bolas utilizado en el ensayo. Fuente: Elaboración propia.

La activación mecánica se llevó a cabo en un molino de bolas; se molieron la fracción fina y la gruesa por separado durante 15 minutos.

En cuanto a la activación química, se realizó mediante una solución saturada de cal; se utilizaron dos cantidades: 4,8 g y 7,2 g. La mezcla de relave, agua y cal se dejó activando durante diferentes periodos: algunas 1 día, otras 3 y otras 7. Durante este tiempo de activación se almacenaban en un recipiente de vidrio sellado al vacío que mantenía en su interior condiciones de temperatura y humedad normales.

Justo después de preparar la pasta (relave + cal + agua) se medía el pH para, posteriormente, una vez acabado el tiempo de activación, volver a medir y analizar la progresión y la efectividad de la activación.

### **3.4 Fabricación de morteros y ensayos en estado fresco**

Se fabricaron morteros con un reemplazo parcial del cemento por relave en proporciones de 10 %, 20 % y 30 %, con una proporción agua/cemento de 0,7, con la siguiente dosificación:

Cuadro 3.5: Dosificación de mezclas.

	<b>Cemento (g)</b>	<b>Pasta de relave activado (g)</b>	<b>Áridos finos (g)</b>	<b>Agua (g)</b>
<b>RC10</b>	391,50	75,40	1086,00	273,1
<b>RC20</b>	348,00	149,36	1086,00	242,6
<b>RC30</b>	304,50	221,85	1086,00	213,7

El mezclado se realizó siguiendo la norma UNE-EN 196-1, que indica:

- Verter el agua y el cemento en el recipiente, evitando pérdidas y completando el vertido en máximo 10 s.
  
- Iniciar mezclado a velocidad lenta durante 30 s.
  
- Añadir la arena gradualmente durante los siguientes 30 s.
  
- Cambiar a velocidad rápida y mezclar 30 s más.
  
- Pausa de 90 s; en los primeros 30 s raspar el mortero adherido a paredes y fondo, colocándolo en el centro.
  
- Reanudar a velocidad rápida durante 60 s.

Una vez mezclado, se realiza el cono de Abrams para medir la consistencia de la mezcla y evaluar su trabajabilidad. Este proceso se realiza al menos 2 veces para obtener un resultado más representativo, que será el promedio.

El procedimiento fue el siguiente, respetando los pasos de la norma UNE-EN 12350-2, que consiste en humedecer el molde y la placa de base, eliminar el exceso de agua y colocar el cono sobre la base, sujetándolo firmemente. Se llena en tres capas iguales, cada una compactada con 25 golpes de varilla distribuidos uniformemente, inclinándola ligeramente en la primera capa para alcanzar la base.



Figura 3.8: Fotografía de los instrumentos utilizados en el ensayo de consistencia. Fuente: Elaboración propia.

Si la última capa queda por debajo del borde, se añade material y se retira el exceso, de forma que quede a ras del cono. A continuación, se levanta el cono en 2 a 5 segundos en dirección vertical, evitando cualquier movimiento lateral o torsión, y se mide inmediatamente la diferencia de altura entre el molde y el centro de la masa asentada para determinar el valor de asentamiento.

A continuación, se vierte en moldes prismáticos regulados de 40 mm × 40 mm × 160 mm según la norma UNE-EN 196-1 vigente.

El vertido de la mezcla se realiza inmediatamente tras preparar el mortero, llenando el molde en tres capas compactadas con sacudidas y golpes de varilla. Se nivela la superficie con espátula y se retira el exceso, asegurando que el mortero esté enrasado.

Una vez limpios los bordes y retirado el mortero sobrante, se pasa a la mesa vibratoria durante 7 segundos, lo que facilita que las partículas sólidas se asienten y se reduzca la porosidad. Por último, cubrimos nuestro molde de tres probetas con papel film plástico y etiquetamos para poder identificarlos después en el desmolde.

### **3.5 Proceso de curado y ensayos mecánicos en estado endurecido**

Este procedimiento describe la preparación, el curado y los ensayos de resistencia mecánica (flexión y compresión) de probetas de mortero prismáticas.

Tras el moldeo, los moldes se mantienen durante 24 horas para su endurecimiento inicial. Transcurrido ese tiempo, se procede a su desmolde, cuidando aristas y caras de carga para no introducir defectos que puedan afectar a los ensayos posteriores.

Inmediatamente después del desmoldeo, los prismas se introducen en una piscina con agua saturada de cal a  $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$  durante 28 días, conforme a la UNE-EN 196-1. El curado en agua saturada de cal crea un medio químico y de humedad controlado que protege a las probetas mientras se desarrolla su microestructura. Al estar el agua ya saturada en  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , se mantiene un pH elevado ( $\approx 12,5$ ) y un equilibrio muy similar al del interior de la pasta de cemento. Por el efecto del ión común y el principio de Le Châtelier, la presencia de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{OH}^-$  en la disolución reduce el gradiente químico entre el poro y el baño, de modo que la portlandita no tiende a disolverse ni a migrar hacia el exterior. Ese entorno fuertemente alcalino también limita la carbonatación temprana. En inmersión, el  $\text{CO}_2$  del aire apenas alcanza la superficie del mortero.



Figura 3.9: Fotografía de las probetas durante el curado en agua saturada en cal. Fuente: Elaboración propia.

La inmersión asegura, además, disponibilidad continua de agua para la hidratación del cemento. Sin ese aporte de agua, la superficie se seca antes que el interior, la hidratación se frena y la pieza queda incompleta. Con el baño se iguala la humedad, hay menos retracción y menos microfisuras. Así, la microestructura es más uniforme y estable, las resistencias mejoran y la variación entre probetas disminuye.

Las probetas se extraen del baño a los 28 días y se secan durante al menos 24 h. Se miden masa y dimensiones para posteriormente calcular la densidad.

El ensayo de flexión se realiza a tres puntos sobre cada prisma de  $40 \times 40 \times 160$  mm. La probeta se coloca centrada sobre dos rodillos cilíndricos paralelos a su eje longitudinal, el rodillo de carga actúa en el centro. Las superficies de contacto deben estar limpias y planas. Se registra la carga máxima y se calcula la resistencia a flexión con la expresión indicada en la UNE-EN 196-1, consignando además el modo de rotura observado.

Tras la flexión, cada prisma proporciona dos mitades de aproximadamente  $40 \times 40 \times 80$  mm. El ensayo de compresión se realiza sobre cada mitad (o, justificadamente, sobre la mitad más íntegra y larga), colocando la pieza centrada entre los platos de la prensa.

Para poder llevar un control de calidad y seguimiento de muestras, se registran el nombre de cada probeta, las fechas de moldeo, desmoldeo y curado, la temperatura del baño, las dimensiones y masa, las cargas máximas de flexión y compresión y los modos de rotura. Este registro garantiza la comparabilidad entre los diferentes tipos de probetas y el cumplimiento de la normativa.



Figura 3.10: Muestras etiquetadas en estado fresco. Fuente: Elaboración propia.

### 3.5.1 Equipos

Para el desarrollo de los ensayos mecánicos se utilizaron dos tipos de equipos: Para la flexión se utilizó el modelo MULTISPEED 34-V1072 para el que se empleó un *dispositivo de carga en tres puntos*, instalado en el equipo. Este dispositivo consta de dos apoyos inferiores fijos y un rodillo superior móvil, a través del cual se aplica la carga hasta la rotura de la probeta.



Figura 3.11: Máquina utilizada para el ensayo de flexión. Fuente: Elaboración propia.

Desde el inicio del ensayo, la máquina registra automáticamente todos los parámetros de carga y desplazamiento en la pantalla de control, generando en tiempo real la curva de rotura de la probeta. Tras la rotura de la probeta, se realiza una fotografía del lote con el fin de verificar que la falla se producía de manera limpia y acorde con el modo de rotura esperado.

En el ensayo de compresión se utilizó la prensa hidráulica MATEST modelo C088-11N, en la que de la misma forma se coloca un *dispositivo de compresión con platos horizontales y paralelos*, insertado entre las prensas de la máquina, cuya función es transmitir de manera uniforme la carga a la probeta, que se registra inmediatamente en la máquina.



Figura 3.12: Máquina utilizada para el ensayo de compresión. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 3.14 se pueden ver los modos de rotura válidos según las normas especificadas en la sección 2.3 y en la Figura 3.13 la rotura de las probetas reales, que se examinan con detenimiento para comprobar que cumplan con el modo de rotura especificado en la norma.



Figura 3.13: Probetas tras el ensayo de compresión. Fuente: Elaboración propia.



Figura 3.14: Esquemas de modos de rotura en compresión.

## 4. RESULTADOS EXPERIMENTALES

En este capítulo se van a desarrollar los resultados obtenidos en el presente trabajo, siguiendo las normas indicadas en la sección de normativa (ASTM y UNE-EN) 2.3. Con el objetivo de facilitar la comparación entre los diferentes casos estudio. En cada apartado se destacan las tendencias principales y su impacto en el uso del relave en morteros.

### 4.1 Caracterización del relave

Como se expuso en el capítulo anterior, en la metodología había tres grupos de tratamiento en función de la granulometría y de la activación; a continuación se mostrará la caracterización granulométrica de: fino molido, fino sin moler y grueso molido.

Las gráficas corresponden a:

- *Size distribution* (distribución de tamaño): frecuencia relativa o densidad de probabilidad en función del tamaño de partícula.
- *Undersize*: indica el porcentaje de partículas menores a un cierto tamaño.

#### Fino molido

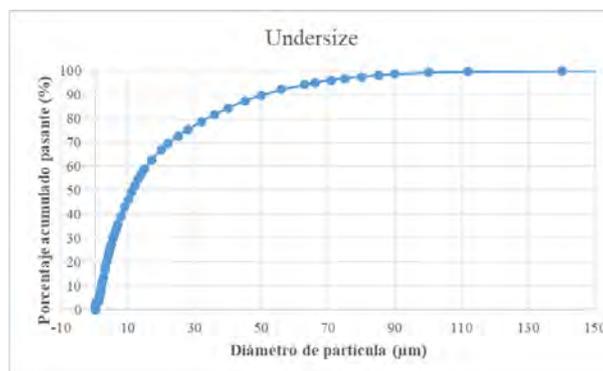


Figura 4.1: Undersize fracción fina molido. Fuente:[21].

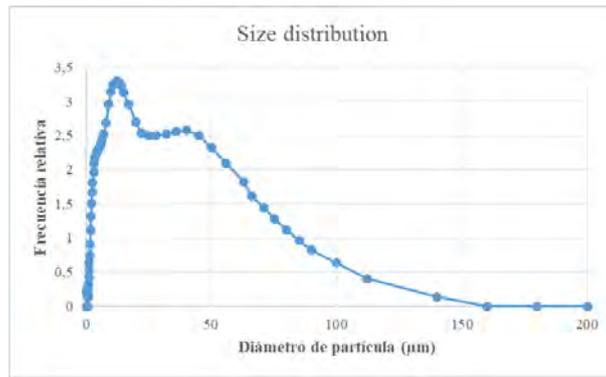


Figura 4.2: Size distribution fracción fina molida. Fuente:[21].

En el caso de la fracción fina molida, la distribución de tamaño muestra un pico en partículas muy finas ( $<10\ \mu\text{m}$ ) y un segundo pico menor alrededor de  $30\text{--}40\ \mu\text{m}$ , seguido de una caída progresiva hacia tamaños mayores. En la curva de *undersize* se observa que el 90% del material se alcanza antes de los  $100\ \mu\text{m}$ , lo que indica un predominio de partículas finas. Esto confirma que, al tratarse de un material originalmente fino, la molienda refuerza la fracción más pequeña.

#### Fino sin moler

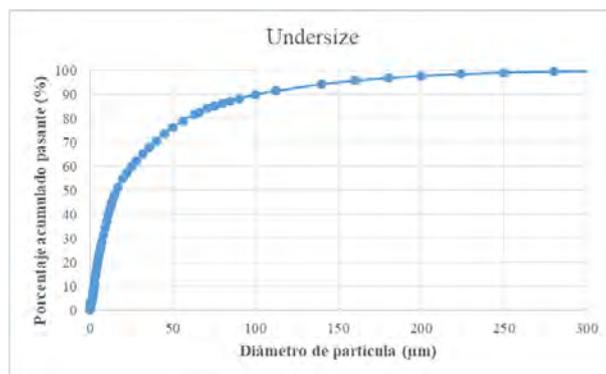


Figura 4.3: Undersize fracción fina sin moler. Fuente:[21].

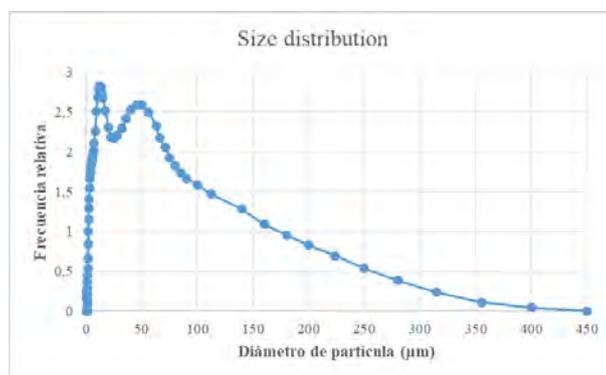


Figura 4.4: Size distribution fracción fina sin moler. Fuente:[21].

La fracción fina sin moler presenta una distribución de tamaño con forma similar al caso molido, pero con una cola más larga hacia tamaños grandes (alcanzando hasta  $300\text{--}400\ \mu\text{m}$ ). El

pico principal en partículas finas sigue presente, aunque más aplanado. En la curva de *undersize*, el 90% se alcanza mucho más tarde que en el caso molido (aproximadamente 200  $\mu\text{m}$ ), lo que sugiere que el material crudo, aunque fino, contenía partículas pequeñas junto con partículas mayores que, sin la molienda, no se llegan a desintegrar.

### Grueso molido

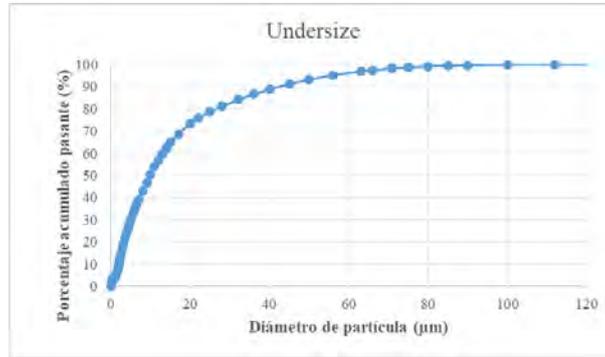


Figura 4.5: Undersize fracción gruesa molido. Fuente:[21].

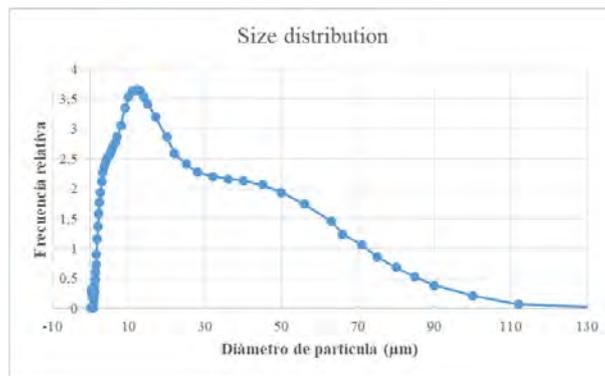


Figura 4.6: Size distribution fracción gruesa molido. Fuente:[21].

Finalmente, en la fracción gruesa molido, la distribución de tamaño presenta un pico principal alrededor de 10  $\mu\text{m}$  y una caída más brusca que en los casos anteriores. Esto sugiere que la molienda redujo de forma significativa el tamaño de las partículas que eran originalmente gruesas. En la curva de *undersize*, el 90% se alcanza alrededor de 80–90  $\mu\text{m}$ , confirmando una molienda efectiva en la que la fracción fina generada es comparable a la de la muestra fina molido.

## 4.2 Trabajabilidad de las mezclas de mortero y pH pasta de relave

### 4.2.1 Trabajabilidad

Con el objetivo de analizar cómo afectan los distintos grupos de tratamiento en la trabajabilidad, a cada mezcla de mortero se le realizó el ensayo de asentamiento con el cono de Abrams en dos ocasiones, con el fin de obtener resultados más representativos. A continuación se mostrarán los resultados.

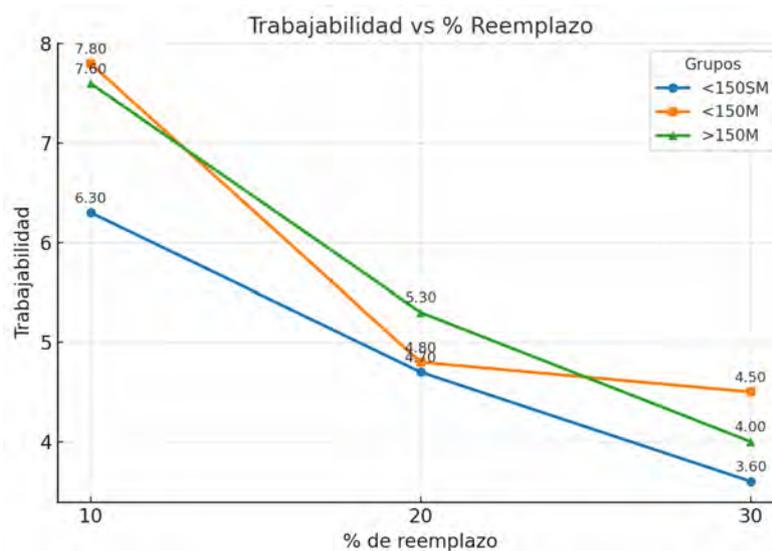


Figura 4.7: Trabajabilidad de morteros con distintos porcentajes de reemplazo y granulometrías de relave. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 4.7 se muestran los resultados del ensayo del cono de Abrams para los diferentes porcentajes de reemplazo representados en el eje horizontal y para los tres grupos de tratamiento.

Cuadro 4.1: Asentamiento de cono según granulometría y porcentaje de reemplazo

Granulometría	% Reemplazo	Asentamiento (cm)
Fino sin moler	10	6,30
	20	4,70
	30	3,60
Fino molido	10	7,80
	20	4,80
	30	4,50
Grueso molido + Fino sin moler	10	7,60
	20	5,30
	30	4,00

La Figura 4.8 grafica los resultados obtenidos de trabajabilidad del grupo de reemplazo del 10% según la granulometría y los días de activación.

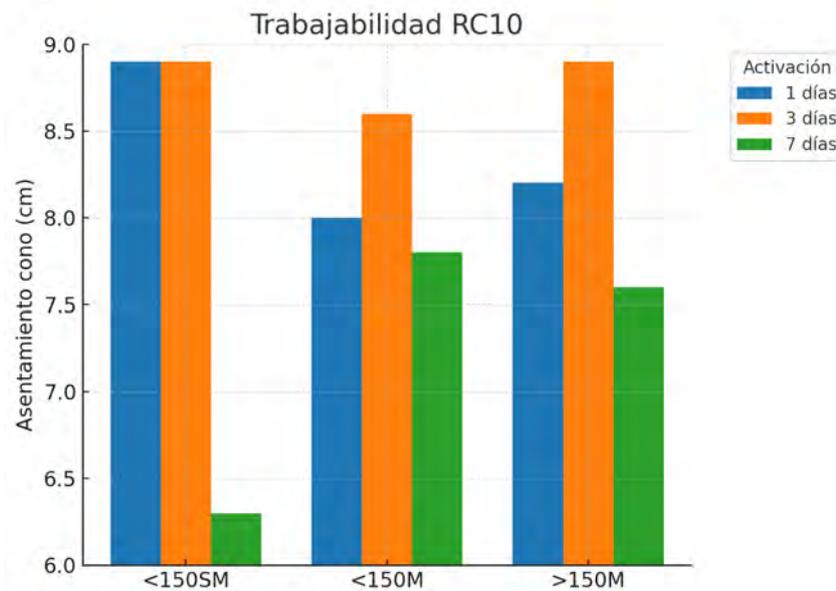


Figura 4.8: Trabajabilidad mortero con reemplazo de 10% según granulometría y activación del relave. Fuente: Elaboración propia.

Los resultados muestran que la activación de 3 días ofrece la mayor trabajabilidad en los tres grupos, mientras que la activación de 7 días tiende a reducirla, especialmente en el caso del relave sin moler. Esto refleja la influencia tanto de la granulometría como del tiempo de activación en la consistencia de los morteros.

Cuadro 4.2: Asentamiento de morteros según condición, activación y granulometría del relave.

Condición	Activación / Cal	Asentamiento (cm)
CTRL	–	11,00
	4,8 g cal	10,00
	7,2 g cal	10,40
<150SM	1 día	8,90
	3 días	8,90
	7 días	6,30
<150M	1 día	8,00
	3 días	8,60
	7 días	7,80
>150M	1 día	8,20
	3 días	8,90
	7 días	7,60

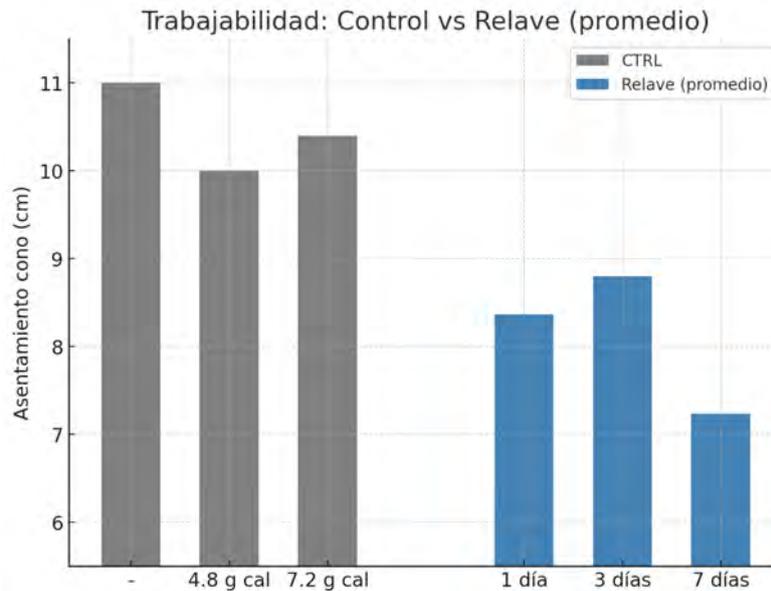


Figura 4.9: Trabajabilidad: comparación entre el control y el promedio de los morteros con relave bajo distintas condiciones de activación. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 4.9 se compara la trabajabilidad del control con la de los morteros con relave considerando el valor promedio de las tres granulometrías en diferentes condiciones, el control presenta los valores más altos de asentamiento con 11 cm sin cal y ligeramente menores cuando se incorpora 4,8 g (10 cm) y 7,2 g (10,4 cm), lo que refleja que la mezcla sin sustitución de relave es más fluida, en cambio los morteros con relave muestran una trabajabilidad inferior en todas las activaciones, manteniéndose en torno a 8,6–8,8 cm a 1 y 3 días y reduciéndose a unos 7,2 cm a los 7 días. En conjunto se observa que la incorporación de relave reduce la trabajabilidad respecto al control aunque una activación intermedia permite un comportamiento más favorable.

#### 4.2.2 pH de las pastas de relave

La evolución del pH en los relaves activados es muy importante para analizar su reactividad química y el consumo de cal en el tiempo. Para interpretar los resultados, se analizan los valores de pH inicial y final en distintos periodos de reposo (1, 3 y 7 días), para poder observar los cambios que ocurren a lo largo del tiempo de activación.

Los relaves activados a 1 día suelen reflejar una disolución inicial de los compuestos más solubles, mostrando valores cercanos a la saturación.

Con 3 días, el pH puede estabilizarse o incrementarse ligeramente debido a la interacción progresiva entre la cal y las fases reactivas del relave.

Finalmente, a los 7 días, los resultados evidencian si el sistema alcanza un equilibrio químico o si persiste la liberación de especies alcalinas.

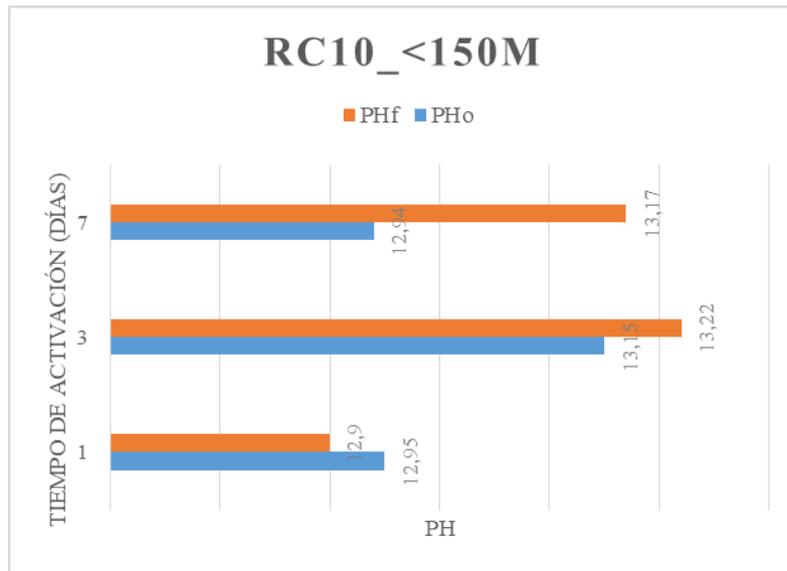


Figura 4.10: Gráfica pH reemplazo 10 % relave fino molido. Fuente: [21].

En la Figura 4.10 se observa que el pH final tiende a ser mayor que el inicial, especialmente a los 3 y 7 días, donde se aprecia un  $\Delta\text{pH}$  positivo más evidente. Este comportamiento sugiere que la molienda del relave fino favorece la liberación de especies alcalinas solubles (como carbonatos básicos u óxidos), lo que eleva la alcalinidad de la solución. Sin embargo, un  $\Delta\text{pH}$  positivo indica que no hubo consumo neto de hidróxido de calcio por reacción puzolánica, por lo que la reactividad química del relave en estas condiciones sería limitada.

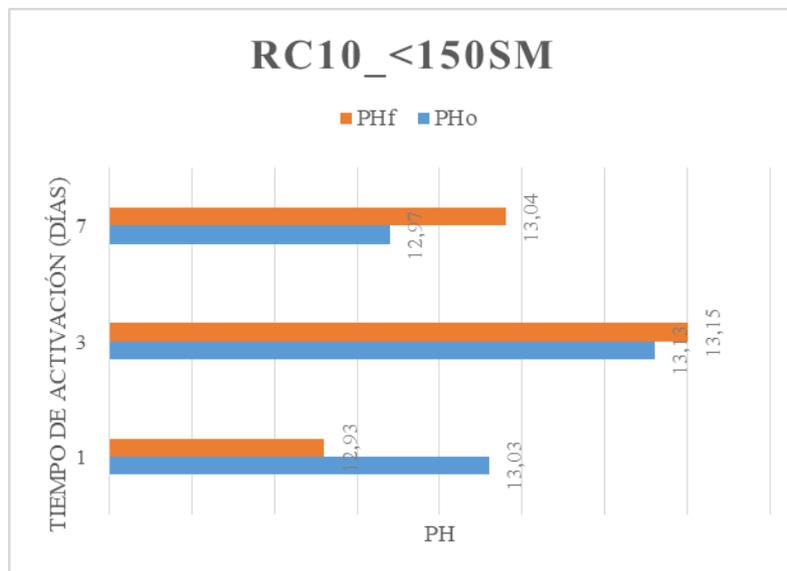


Figura 4.11: Gráfica pH reemplazo 10 % relave fino sin moler. Fuente: [21].

En este caso, la variación entre el pH inicial y final es muy reducida en todos los tiempos de reposo, con valores prácticamente estables. Esto sugiere que el relave sin moler presenta menor superficie reactiva, lo que limita la interacción con la cal y, por tanto, la evolución del pH en el medio.

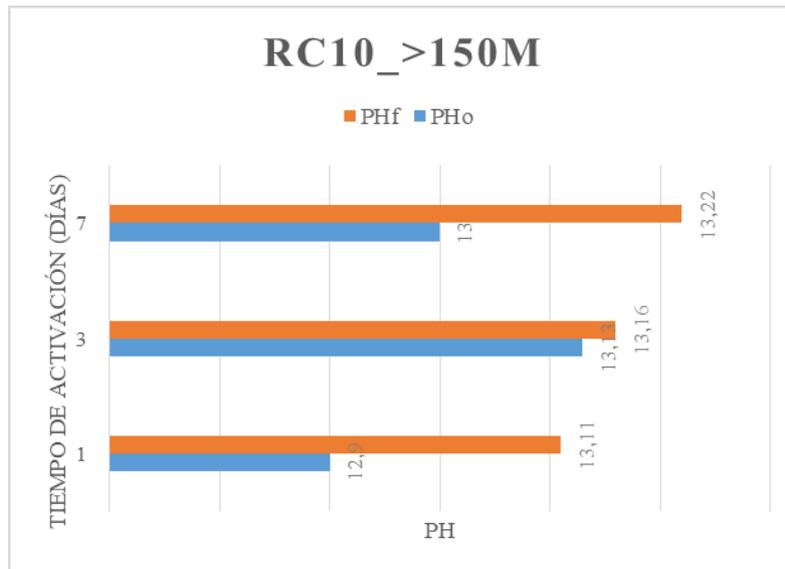


Figura 4.12: Gráfica pH reemplazo 10 % grueso molido + fino sin moler. Fuente: [21].

La mezcla de fracción gruesa molida con fina sin moler muestra un comportamiento intermedio: existe un incremento del pH final respecto al inicial en los tres tiempos de reposo, aunque menos marcado que en el caso del relave fino completamente molido. Esto refleja que la molienda parcial aporta cierta reactividad adicional, aunque sin alcanzar el mismo nivel que el relave molido.

Cuadro 4.3: Valores de pH inicial (PHo) y final (PHf) de las pastas de relave para distintas granulometrías, tiempos de activación y porcentajes de reemplazo.

Granulometría	Activación (días)	% Reemplazo	PHo	PHf
<150SM	1	10	13,03	12,93
	3	10	13,13	13,15
	7	10	12,97	13,04
	7	20	13,20	13,15
	7	30	13,10	13,10
<150M	1	10	12,95	12,90
	3	10	13,15	13,22
	7	10	12,94	13,17
	7	20	13,24	13,06
	7	30	13,19	13,15
>150M	1	10	12,90	13,11
	3	10	13,13	13,16
	7	10	13,00	13,22
	7	20	13,19	13,23
	7	30	13,26	13,13

Las tres gráficas correspondientes a 7 días de activación muestran un comportamiento bastante estable en los valores de pH, con diferencias mínimas entre el pH inicial y final ( $\Delta$ pH). En el caso del relave fino molido, Figura 4.13, se observa una ligera disminución del pH final en comparación con el inicial en algunas proporciones, lo que sugiere un mayor consumo de cal

y una cierta reactividad de las fases finas del relave. Por otro lado, en el relave fino sin moler, Figura 4.14, los valores se mantienen prácticamente constantes, indicando que la falta de molienda limita la liberación de fases reactivas y, con ello, la interacción con la cal. Finalmente, en la mezcla con fracción gruesa molida, Figura 4.15, los valores de pH inicial y final son muy próximos, reflejando un sistema que alcanza rápidamente un equilibrio químico.

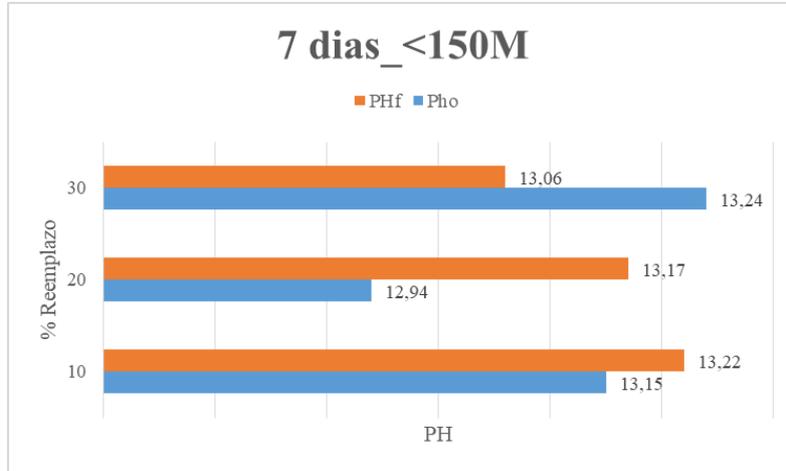


Figura 4.13: Gráfica pH diferentes grupos de reemplazo granulometría fino molido. Fuente: [21].

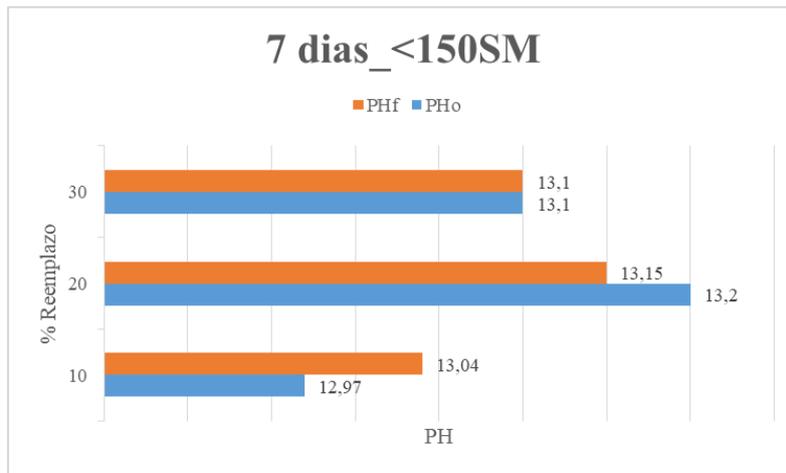


Figura 4.14: Gráfica pH diferentes grupos de reemplazo granulometría fino sin moler. Fuente: [21].

En general, el RC20 tiende a ser el más reactivo, porque logra un balance: tiene suficiente relave para reaccionar, pero no en exceso como para saturar el sistema (como ocurre en RC30). RC10, al tener poco relave, apenas genera cambios de pH.

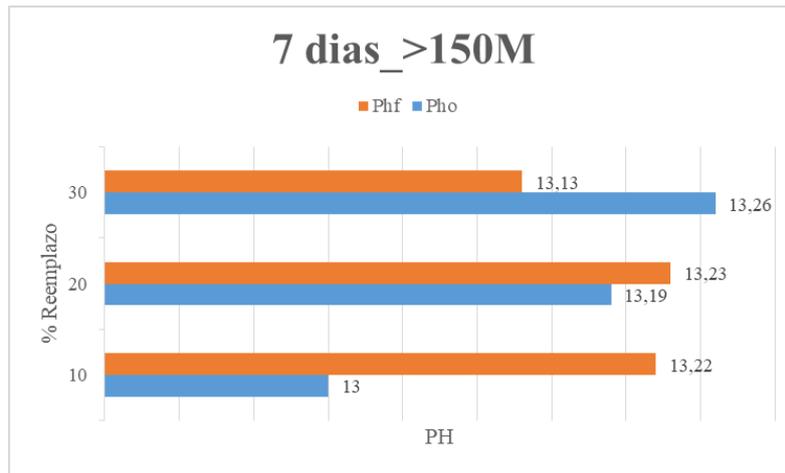


Figura 4.15: Gráfica pH diferentes grupos de reemplazo granulometría grueso molido + fino sin moler. Fuente: [21].

### 4.3 Densidad de las probetas curadas

Posterior al curado, las probetas se secan y, antes de ser ensayadas, se miden sus dimensiones y su masa, con el fin de calcular la densidad de cada una. Este parámetro está directamente relacionado con la porosidad de las probetas, lo que permite llevar un control adicional y establecer vínculos entre la densidad, la resistencia mecánica y la durabilidad del mortero. En la Figura 4.16 se presenta la densidad promedio del grupo control y de los tres grupos con reemplazo. El grupo control alcanza una densidad de  $1,92 \text{ g/cm}^3$ , mientras que el grupo RC10 presenta la mayor densidad, con  $1,95 \text{ g/cm}^3$ , lo que indica que con un 10% de reemplazo se logra una compactación similar e incluso ligeramente superior al control. En cambio, en RC20 la densidad desciende a  $1,87 \text{ g/cm}^3$ . Finalmente, en RC30 la densidad se mantiene en valores intermedios, alcanzando  $1,83 \text{ g/cm}^3$ , aunque sin llegar a los niveles iniciales del control.

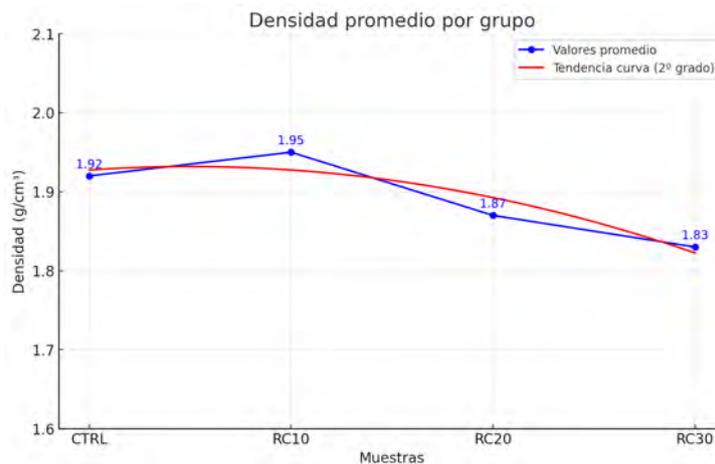


Figura 4.16: Densidades promedio por grupo de reemplazo y control. Fuente: Elaboración propia.

En conjunto, esto sugiere que bajas sustituciones de relave mantienen o aumentan la densidad (de  $1,92$  a  $1,95 \text{ g/cm}^3$ ), mientras que incrementos mayores (20% y 30%) tienden a reducirla, alcanzando valores de  $1,87$  y  $1,83 \text{ g/cm}^3$ , respectivamente.

Cuadro 4.4: Datos densidad organizados por grupo (CTRL, RC10, RC20 y RC30).

<b>Grupo</b>	<b>Condición</b>	<b>Valor</b>
CTRL	CTRL	1,92
	CTRL 4,8	1,94
	CTRL 7,2	1,92
RC10	<150sm_1d	1,89
	>150m_1d	1,89
	<150sm_1d	1,93
	<150sm_3d	2,07
	>150m_3d	2,03
	<150sm_3d	2,01
	<150sm_7d	1,95
	>150m_7d	1,92
	<150sm_7d	1,94
RC20	<150sm_7d	1,36
	>150m_7d	1,86
	<150sm_7d	1,86
RC30	<150sm_7d	1,83
	>150m_7d	1,83
	<150sm_7d	1,84

#### 4.4 Resistencia a flexión y compresión a 28 días

A continuación se expondrán los resultados obtenidos en los ensayos de compresión y flexión. Con el fin de hacerlo más sencillo e ilustrativo, se mostrarán los valores promedios de cada grupo de reemplazo y de las muestras control (mortero convencional). Para más detalle, véase el 8.

En la Figura 4.17 se observa que la muestra CTRL (sin reemplazo) presenta la mayor resistencia promedio a compresión (20,49 MPa). Al introducir un 10% de reemplazo (RC10), la resistencia disminuye de forma considerable (15,64 MPa), mientras que en RC20 se recupera parcialmente hasta 17,11 MPa, aunque sin alcanzar el nivel de la muestra control. Finalmente, en RC30 la resistencia baja aún más (12,79 MPa). La disminución de resistencia puede consi-



Figura 4.17: Gráfico valores promedio ensayo de resistencia a la compresión. Fuente: Elaboración propia.

derarse normal debido a la reducción de la cantidad de cemento en la mezcla; sin embargo, los resultados muestran que es posible incorporar relave y aún así obtener valores cercanos al mortero convencional (CTRL), contribuyendo a reducir el impacto ambiental de la construcción.

En el caso de la flexión, la muestra CTRL alcanza 7,97 MPa. El grupo RC10 presenta una caída significativa (5 MPa), pero en RC20 se observa un aumento notorio hasta 8 MPa, llegando incluso a superar levemente al control. Finalmente, RC30 vuelve a descender hasta 5,72 MPa.



Figura 4.18: Gráfico valores promedio ensayo de resistencia a la flexión. Fuente: Elaboración propia.



Figura 4.19: Máquina de ensayo utilizada para pruebas de flexión en probetas.

Los resultados demuestran que mediante un porcentaje adecuado de reemplazo (RC20), el uso de relave no solo permite acercarse, sino también igualar o mejorar la resistencia frente al mortero convencional, al mismo tiempo que se disminuye el impacto ambiental.

## 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 5.1 Influencia de la granulometría del relave y su activación en la resistencia mecánica

La granulometría del relave, es decir, su distribución de tamaño, es una característica que influye directamente sobre la resistencia de las probetas de mortero, ya que afecta de forma directa a la cantidad de poros de estas y a la demanda de agua de la mezcla.

#### 5.1.1 Resistencia a la compresión

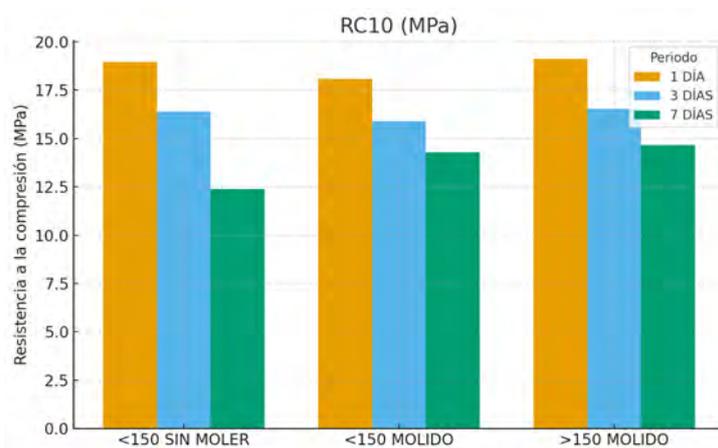


Figura 5.1: RC 10- Resistencia a la compresión. Fuente:[21].

En la Figura 5.1 se presentan los resultados del ensayo de resistencia a compresión para morteros con un 10% de reemplazo de cemento por relave (RC10), evaluados a 28 días de curado tras diferentes tiempos de activación (1, 3 y 7 días). Como se ha desarrollado previamente la granulometría correspondiente a cada condición: relave fino sin moler, relave fino molido y mezcla 50/50 de grueso molido con fino sin moler. La gráfica permite comparar la influencia de la granulometría sobre la resistencia a compresión.

#### Granulometría

Observando y analizando la gráfica, se pueden identificar varias tendencias que se explican a continuación:

- **Influencia de la granulometría a un día de activación:** Este grupo con activación breve mostró un efecto notable sobre la resistencia. Destaca el mortero con mezcla de partículas finas y gruesas, que alcanzó la mayor resistencia (19 MPa), superando al relave fino

sin moler (18.95 MPa) y al relave fino molido (18.07 MPa). Esto indica que la combinación de dos tipos de granulometrías resulta beneficiosa. Esto puede ocurrir porque las partículas más finas ocupan el espacio de los poros que dejan las gruesas, construyendo una matriz más compacta. Las partículas gruesas tienen menor superficie específica, pero demandan menos agua que las partículas finas, aportando rigidez a la matriz.

Cuadro 5.1: Resistencia a compresión para diferentes granulometrías y días de activación.

Granulometría	1 día (MPa)	3 días (MPa)	7 días (MPa)
< 150 $\mu m$ sin moler	18.95	16.40	12.84
< 150 $\mu m$ molido	18.07	15.09	14.28
< 150 $\mu m$ sin moler + > 150 $\mu m$ molido	19.12	16.53	14.66

- Relave fino sin moler vs. molido:** Al contrario de la expectativa de que moler más fino siempre mejora la reactividad, el relave fino molido 15 minutos no produjo resistencias mayores que la misma fracción sin moler.

De hecho, a 1 día de activación rindió con ligeramente menos resistencia. Esto puede deberse a que, al moler la fracción fina, muchas partículas ya eran del orden del tamaño del cemento y una molienda adicional generó ultrafinos que aumentan la superficie específica pero no necesariamente la reactividad de fases poco puzolánicas, penalizando la trabajabilidad, como se puede ver en la Figura 5.2, (más agua requerida) más de lo que mejora la reacción. Sin aditivos dispersantes, las partículas sobremolidas tienden a aglomerarse (por fuerzas electrostáticas o formación de gel de sílice-cal inicial), provocando el efecto de “encapsulamiento” según Wu et al. [26]. En la práctica, se puede explicar como que el mortero con relave muy molido probablemente necesitó una mayor relación agua/cemento para lograr el mismo flujo de cono de Abrams que los otros (debido a su mayor demanda de agua por finura), dando así como resultado una matriz más porosa.

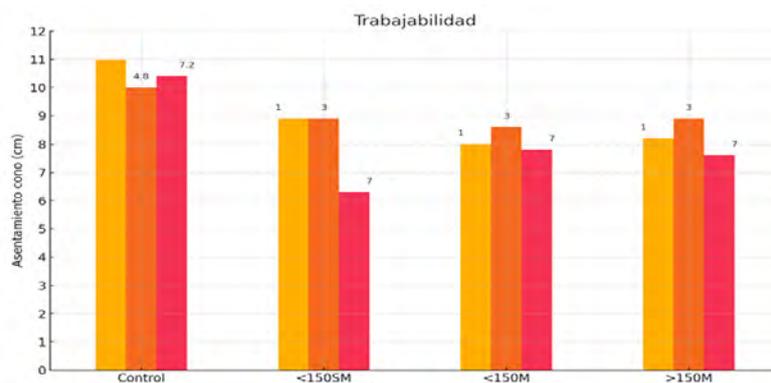


Figura 5.2: Trabajabilidad mortero RC10. Fuente: [21].

## Activación

Otra característica que influye sobre la resistencia de las probetas son los días de activación. Para todas las granulometrías, la máxima resistencia se obtuvo con 1 día de activación, mientras que las de 7 días fueron menores. Esto demuestra que no por más días de activación se obtiene una mayor resistencia. En la activación prolongada, el calcio reacciona con minerales del relave

formando compuestos como C-S-H o portlandita, que se depositan sobre sus partículas. Esto crea capas y grumos que las aíslan y hacen que luego no se mezclen bien con el cemento, reduciendo la resistencia del mortero, según el estudio experimental de Wu et al. (2024) [26] mencionado anteriormente.

### 5.1.2 Resistencia a la flexión

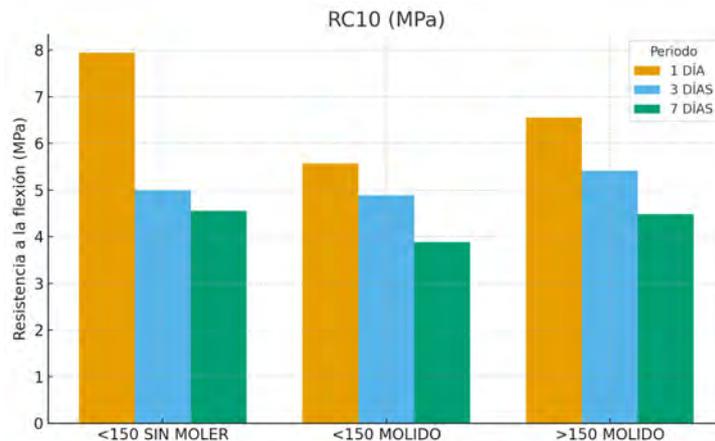


Figura 5.3: RC 10- Resistencia a la flexión. Fuente:[21].

## Granulometría

- Granulometría mixta vs. fina:** Con 1 día de activación, las mezclas con distribución de tamaños más amplia ( $> 150\mu\text{m}$  molido +  $< 150\mu\text{m}$  sin moler) alcanzaron aproximadamente 6.52 MPa, superando al fino molido (5.57 MPa) pero quedando por debajo del caso fino sin moler (7.95 MPa).

En general, el mortero con fracción fina sin moler alcanzó los mejores resultados iniciales, lo que puede explicarse porque las partículas menos molidas mantienen mayor rigidez estructural y un mejor anclaje en la matriz. Sin embargo, a medida que avanza el tiempo de curado, la granulometría mixta se comporta de manera más estable, presentando valores intermedios y menos caída con respecto al fino sin moler.

- Relave fino molido:** Presentó menor resistencia inicial a flexión (5.57 MPa a 1 día) en comparación con los otros casos. No obstante, a los 3 días logra un valor intermedio (4.90 MPa), mientras que a los 7 días cae a 3.84 MPa. Esto puede estar relacionado con la mayor superficie específica, que favorece reacciones tempranas pero también genera mayor demanda de agua y formación de microfisuras.

En flexión, estas discontinuidades son críticas, ya que la propagación de grietas se ve favorecida por la presencia de zonas débiles en la matriz.

Cuadro 5.2: Resistencia a flexión para diferentes granulometrías del relave y días de activación.

<b>Granulometría del relave</b>	<b>1 día (MPa)</b>	<b>3 días (MPa)</b>	<b>7 días (MPa)</b>
< 150 $\mu\text{m}$ sin moler	7.95	4.99	4.55
< 150 $\mu\text{m}$ molido	5.57	4.90	3.84
> 150 $\mu\text{m}$ molido + < 150 $\mu\text{m}$ sin moler	6.52	5.41	4.49

## **Activación**

Al igual que en el caso de la compresión, los mejores resultados se obtuvieron con un día de activación en los tres grupos. Por ejemplo, el relave fino sin moler alcanzó 7.95 MPa a 1 día, mientras que a los 7 días descendió hasta 4.55 MPa. La pérdida de resistencia con periodos más prolongados de activación es más notoria en flexión que en compresión, ya que la prueba depende fuertemente de la continuidad de la matriz. Una activación más larga pudo generar reacciones tempranas de la cal añadida (formación de carbonatos o compuestos cálcicos secundarios), que al integrarse en la pasta redujeron la cohesión interna y facilitaron la propagación de grietas. Incluso a los 3 días ya se aprecia una caída importante, como en el caso del fino sin moler, que pasa de 7.95 a 4.99 MPa.

### **5.1.3 Resistencias de Morteros con Relave Activado a 7 Días**

La resistencia de los morteros que sustituyen parte del cemento por relave minero está influida por tres factores que se relacionan entre sí:

- El tamaño de las partículas del relave (granulometría),
- El porcentaje de cemento que se reemplaza,
- La forma en que el relave se activa químicamente.

En este trabajo se estudiaron morteros hechos con relave activado durante 7 días, usando tres tipos de granulometría (<150  $\mu\text{m}$  sin moler, <150  $\mu\text{m}$  molido y mezcla con >150  $\mu\text{m}$  molido), tres porcentajes de reemplazo (10%, 20% y 30%) y dos cantidades de cal para la activación (4,8 g y 7,2 g). El objetivo es ver cómo estas variables, por separado y en conjunto, afectan la resistencia a compresión y flexión.

Como se puede observar en la gráfica 5.4, la mayor resistencia a compresión se obtuvo con un reemplazo del 20% en las tres granulometrías evaluadas. En cada caso, la resistencia aumenta notablemente del 10% al 20% y decae en el 30% de reemplazo. Es importante destacar que, aunque todos los relaves fueron preactivados en solución de cal durante 7 días, la cantidad de cal añadida varió con el porcentaje de reemplazo: en la activación del relave para 10% se usaron 4,8 g de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , mientras que para 20% y 30% se usaron 7,2 g. Esto pudo ser la razón del incremento notable en el 20% de reemplazo: con más cal disponible el relave pudo desarrollar una ligera reacción puzolánica inicial al absorber  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  y formar productos cementantes adicionales (C-S-H), complementando la hidratación del cemento. A un 30% de reemplazo la cantidad de relave es mayor. Lo que pudo ocurrir es que esa cantidad de cal (7,2 g al igual que en 20%) no alcanzó a activar todo el relave, esto explicaría por qué la resistencia decayó. Las partículas finas del mortero con un 20% de reemplazo rellenaron los huecos y

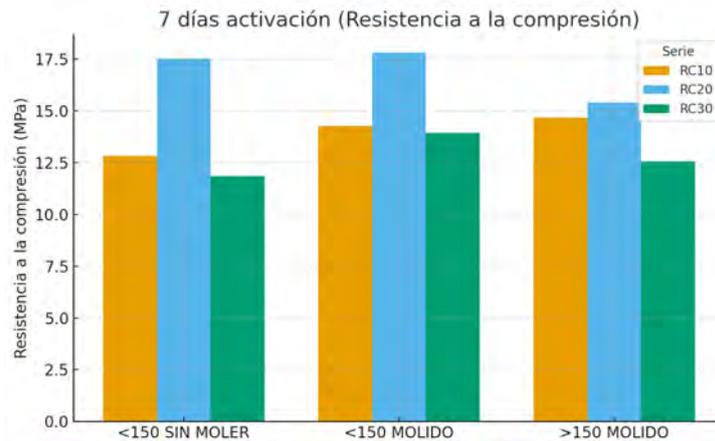


Figura 5.4: 7 días de activación- Resistencia a la compresión. Fuente:[21].

densificaron la matriz acelerando la hidratación y aportando resistencia, mientras que con un 30% de reemplazo, al haber menos cemento y una cantidad de relave no activado, el relave pasa de ser un relleno a un material inerte que no actúa como material cementante.

Otro factor importante es la demanda de agua, como se comentó anteriormente, una mayor cantidad de finos, como puede ser el relave, aumenta la demanda de agua y la viscosidad de la mezcla. Aunque el relave fue activado previamente con una solución de cal, incorporando una humedad inicial, al haber mucha cantidad de finos requiere más agua, elevando la relación agua/cemento efectiva. Una mayor a/c produce una pasta más porosa y, por tanto, menos resistente.

En la Figura 5.5 se encuentran representados los mismos grupos anteriores, pero con los valores de la resistencia a la flexión. Al igual que en el caso de compresión, hay varios factores que afectan a su resistencia. De nuevo, el que mejores resultados tuvo fue el del 20% de reemplazo para todas las granulometrías.

Este efecto fue más marcado que en compresión, lo que confirma que la flexión es más sensible a la calidad y continuidad de la matriz cementante.

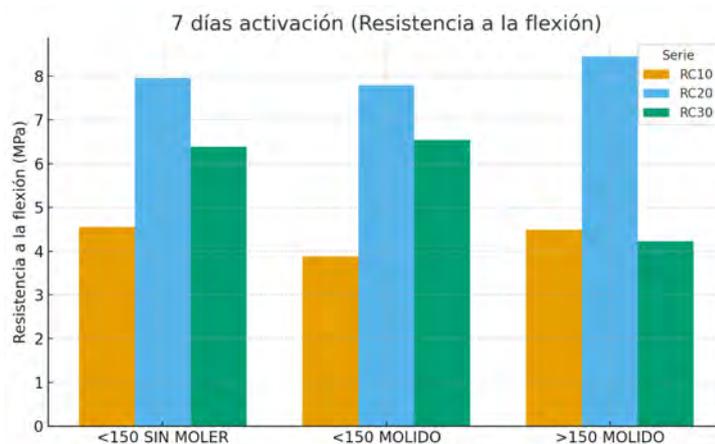


Figura 5.5: 7 días de activación - Resistencia a la flexión. Fuente:[21].

En el caso del relave fino sin moler, la resistencia pasó de aproximadamente 4.5 MPa (10%) a aproximadamente 8 MPa (20%), para luego descender a aproximadamente 6.3 MPa (30%).

Con el relave fino molido, el incremento fue igualmente claro: de aproximadamente 3.9 MPa (10%) a aproximadamente 7.8 MPa (20%), lo que indica que el relleno ultrafino, junto con la activación con 7.2 g de cal en el 20%, densificó y cohesionó la matriz de manera efectiva. Sin embargo, al 30% la resistencia apenas mejoró respecto al 10% (aproximadamente 6.6 MPa), debido a que el exceso de finos pudo favorecer la formación aglomeraciones y defectos, reduciendo la continuidad de la matriz. En el 10% molido, la menor cantidad de cal añadida (4.8 g) y el reducido contenido total de relave limitaron el beneficio observable.

La mezcla de relave grueso molido y fino sin moler alcanzó la resistencia más alta de todas al 20% de reemplazo (aproximadamente 8.3 MPa). La amplia distribución de tamaños favoreció la compactación y la resistencia, generando una microestructura más densa y estable. Sin embargo, con el 30% esta ventaja desapareció: la reducción de cemento dejó parte de las partículas de relave inertes, actuando como puntos débiles y disminuyendo la resistencia, situándose en valores similares a los del 10% (aproximadamente 4.3 – 4.5 MPa).

## 5.2 Trabajabilidad

La Figura 5.6 y la Tabla 5.3 muestran la variación del asentamiento de cono de Abrams en función de la granulometría del relave (<150SM, <150M y >150M) y del porcentaje de reemplazo de cemento (10 %, 20 % y 30 %).

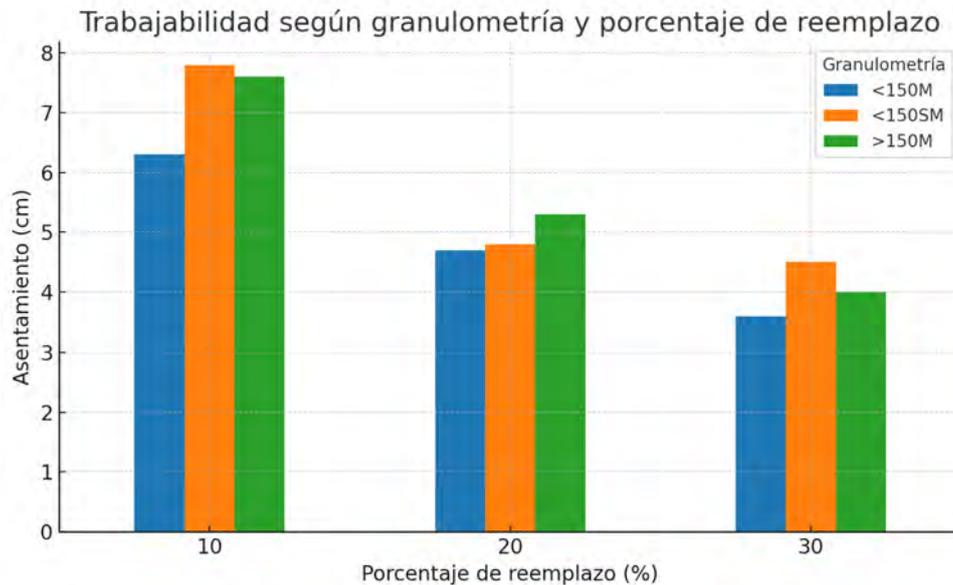


Figura 5.6: Trabajabilidad según granulometría y porcentaje de reemplazo. Fuente: Elaboración propia.

Cuadro 5.3: Asentamiento (cm) según granulometría y porcentaje de reemplazo.

Reemplazo (%)	<150M	<150SM	>150M
10	6,3	7,8	7,6
20	4,7	4,8	5,3
30	3,6	4,5	4,0

Se observa que la trabajabilidad disminuye de forma progresiva a medida que aumenta el porcentaje de reemplazo. Mientras que al 10% los valores de asentamiento se mantienen entre 6,3 y 7,8 cm, al 20% caen a un rango de 4,7–5,3 cm, y al 30% descienden aún más, entre 3,6 y 4,5 cm. Esto evidencia que a mayor incorporación de relave incrementa la rigidez de la mezcla, debido a su elevada superficie específica y a la mayor demanda de pasta para recubrir las partículas.

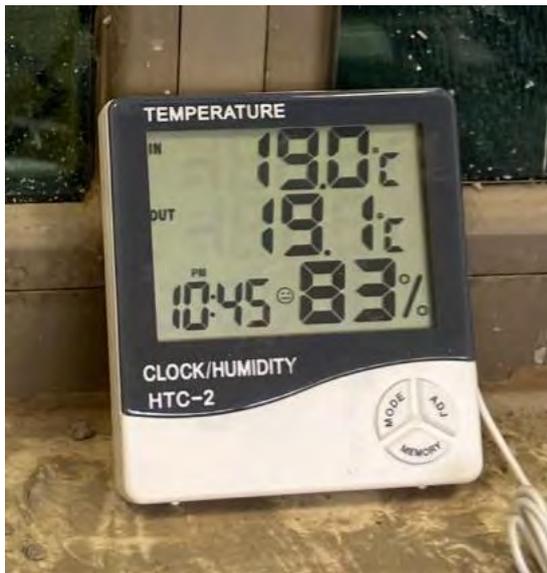
Al comparar las granulometrías, se puede observar que la fracción molida presenta los valores más bajos de asentamiento, lo que indica que su mayor finura y angularidad generan un aumento en los puntos de contacto y en el contenido de vacíos, reduciendo la fluidez de la mezcla. En contraste, el fraccionamiento grueso mostró un mejor desempeño en el 20% de reemplazo (5,3 cm), lo cual puede asociarse a una menor demanda de agua. La fracción fina sin moler presentó un comportamiento intermedio: alcanzó el mayor asentamiento al 10% (7,8 cm), disminuyó notablemente al 20% y volvió a superar ligeramente al resto de granulometrías en el 30%.

Según el modelo de Larrard descrito por Cabrera et al. [7], el espesor máximo de pasta disminuye cuando las partículas son más esféricas, ya que presentan una menor superficie específica y requieren menos recubrimiento. En nuestra experiencia, sin embargo, la fracción fina molido mostró una trabajabilidad reducida, lo que sugiere que el proceso de molienda incrementó la angularidad y la superficie de las partículas. Como consecuencia, la mezcla demandó una mayor cantidad de pasta para su recubrimiento y perdió fluidez.

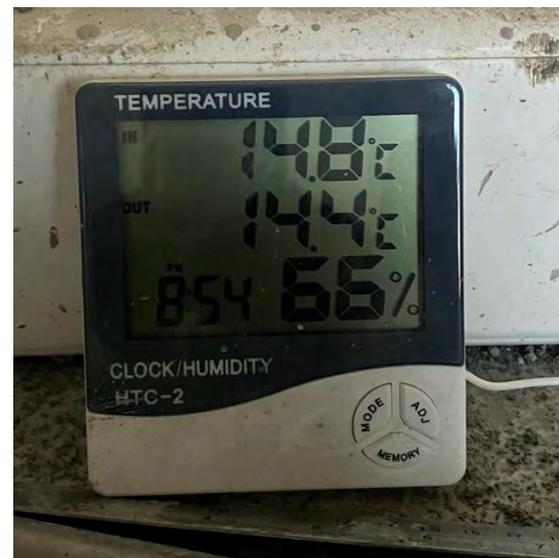
Asimismo, se confirma que los finos no plásticos del relave actúan principalmente como material de relleno, favoreciendo el empaquetamiento, pero sin generar efectos plastificantes en la mezcla. En este sentido, la trabajabilidad de los morteros con relaves depende directamente tanto de la proporción de sustitución como de la granulometría utilizada, siendo más favorables aquellas fracciones con menor angularidad y menor contenido de finos.

### 5.3 Influencia de las condiciones de Temperatura y Humedad en la resistencia del mortero

En el estudio se elaboraron tres tipos de mortero control al inicio (finales de verano) y otros tres al final (invierno), manteniendo idéntica formulación pero bajo condiciones ambientales distintas, con el fin de poder estudiar cómo afectan las condiciones ambientales en la resistencia. En el primer caso, las probetas se fabricaron a una temperatura promedio de 19 °C y humedad relativa de 83 %, mientras que en el segundo la temperatura fue de 14,8 °C con una humedad relativa de 66 %.



Condiciones iniciales: 19,0 °C y 83 % HR.



Condiciones finales: 14,8 °C y 66 % HR.

Figura 5.7: Comparación de condiciones ambientales en la elaboración de morteros control. Fuente: Elaboración propia.

Los morteros control fabricados en condiciones más frías y secas presentaron una disminución notable en compresión y flexión respecto a los elaborados en verano. Este comportamiento se atribuye a dos factores principales:

- La menor temperatura ralentizó la velocidad de hidratación del silicato tricálcico ( $C_3S$ ), reduciendo la ganancia de resistencia a 28 días.
- La humedad relativa más baja favoreció la pérdida de agua en la superficie de las probetas antes del curado en baño, lo que incrementó la porosidad y la formación de microfisuras.

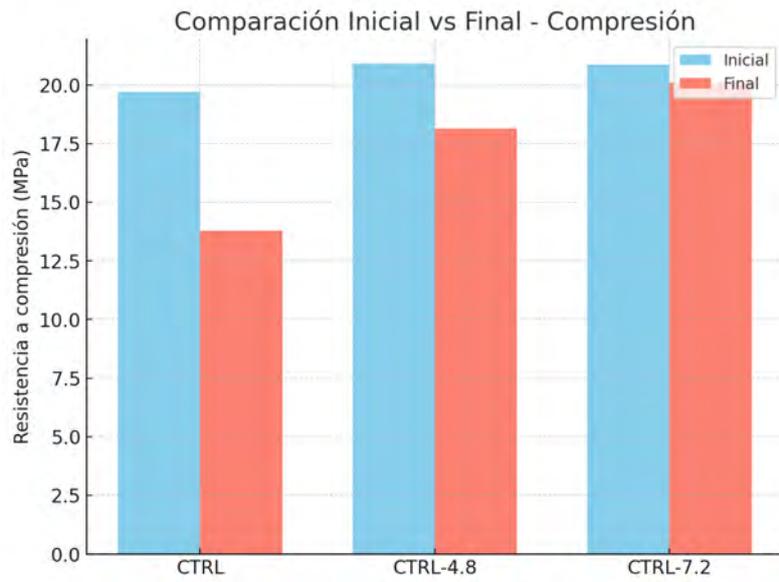


Figura 5.8: Comparación de resistencia a compresión entre probetas iniciales y finales. Fuente: Elaboración propia.

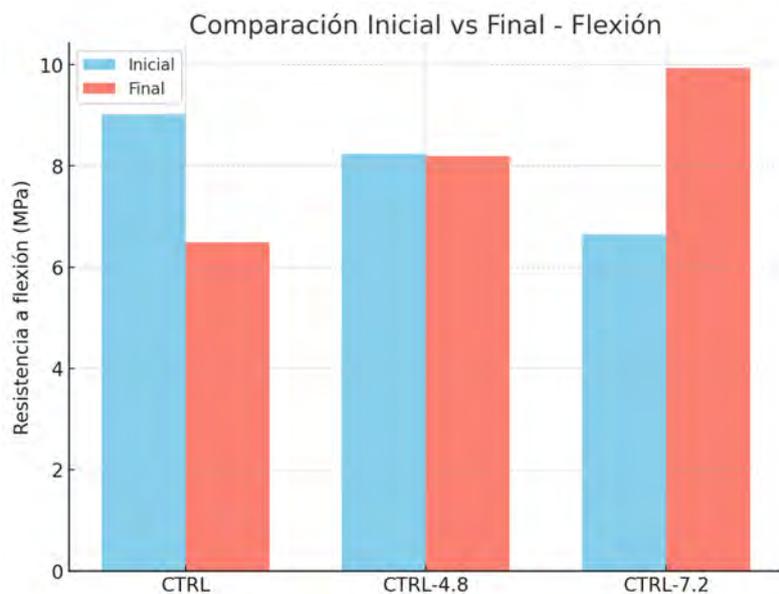


Figura 5.9: Comparación de resistencia a flexión entre probetas iniciales y finales. Fuente: Elaboración propia.

A temperaturas más altas ( 19 °C, condiciones iniciales), la reacción de hidratación arranca más rápido, generando un fraguado más temprano y una liberación de calor inicial mayor. Esto suele mejorar las resistencias tempranas, pero también puede generar porosidad si no se controla la relación a/c.

A temperaturas más bajas ( 14,8 °C, condiciones finales), la hidratación inicial fue más lenta, a pesar de la utilización de agua atemperada, por tanto la microestructura temprana quedó menos consolidada, y aunque luego el curado en agua ayudó, el material inició con una microestructura menos densa. Eso explica que el CTRL puro perdiera un 30% de resistencia en invierno.

## 5.4 Análisis de la Reactividad de Relaves Mineros Activados

El uso de relaves mineros como material suplementario cementante es una buena estrategia para la reutilización de estos residuos. Sin embargo, muchos de estos presentan baja reactividad puzolánica y es necesario hacer un proceso de activación previo a su utilización. La activación química y mecánica fueron los dos métodos utilizados para este trabajo. En este análisis técnico se va a evaluar la reactividad química de los relaves mineros activados durante 7 días, mediante la medición de pH inicial y pH final bajo las distintas condiciones experimentales.

La variación de pH es un indicador directo de la reactividad química del relave. Se pueden dar tres casos generales:

- $\Delta\text{pH}$  Negativo (pH final menor que inicial): indica que parte del hidróxido de calcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) añadido ha reaccionado con componentes del relave ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , etc.), reduciendo la concentración de  $\text{OH}^-$  libre en solución y provocando una caída del pH. Un  $\Delta\text{pH}$  negativo es signo de reactividad puzolánica, ya que el relave está fijando cal y formándose compuestos cementantes. Por ejemplo, en ensayos puzolánicos clásicos se observa que la reducción de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  por reacción puzolánica conlleva valores de pH cada vez más bajos.
- $\Delta\text{pH} \approx 0$  (sin cambio significativo de pH): indica una baja o nula reactividad del relave en cuanto a reacción con la cal. Un pH final igual al inicial implica que la concentración de  $\text{OH}^-$  en solución se mantuvo prácticamente constante, lo que ocurre si el relave no consumió apreciablemente el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ni liberó otros álcalis. En este caso, el relave estaría actuando principalmente como material inerte o de relleno en la matriz.
- $\Delta\text{pH}$  Positivo (pH final mayor que inicial): en general, un  $\Delta\text{pH}$  positivo indicaría ausencia de reacción puzolánica y posible liberación de alcalinidad adicional. Por ejemplo, si inicialmente el pH medido fue algo más bajo debido a disolución incompleta de la cal o a cierta neutralización inicial (p. ej. por compuestos ligeramente ácidos en el relave), al cabo de 7 días el sistema puede haber alcanzado una mayor saturación de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  llevando el pH a su valor de equilibrio. Otra posibilidad es que el relave mismo contenga fases alcalinas ligeramente solubles (carbonatos básicos, óxidos) que con el tiempo elevan el pH. En cualquier caso, un  $\Delta\text{pH}$  positivo implica que no hubo consumo neto de  $\text{OH}^-$  por reacción puzolánica, sino más bien un aumento de la alcalinidad disponible. Esto sugiere fuertemente que el relave es poco reactivo químicamente o no tuvo un buen proceso de activación.

En resumen, cuanto más negativo sea el  $\Delta\text{pH}$ , mayor es la reactividad puzolánica del relave, pues significa que consumió más hidróxido de calcio formando productos cementantes.

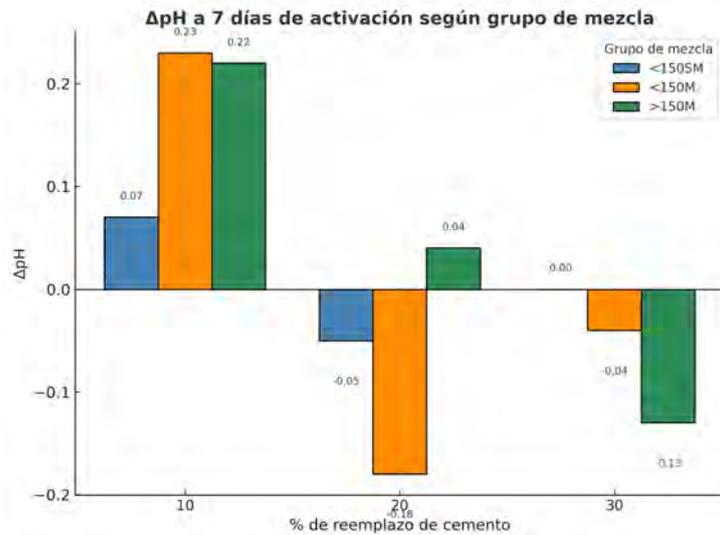


Figura 5.10: 7 días de activación -  $\Delta\text{pH}$ . Fuente: Elaboración propia.

La granulometría y el grado de molienda del relave son determinantes en la reactividad química. En general, partículas más finas y materiales molidos tienden a ser más reactivos por varias razones: mayor área superficial específica, mayor proporción de fases amorfas o defectos inducidos, y una mejor dispersión en la matriz de cal. Nuestros datos comparan tres escenarios: relave fino sin moler ( $< 150\text{SM}$ ), relave fino molido adicionalmente ( $< 150\text{M}$ ), y una mezcla que incluye la fracción gruesa molido ( $> 150\text{M}$ ).

Se espera que las muestras con relave molido presenten caídas de pH más pronunciadas ( $\Delta\text{pH}$  más negativos) que aquellas con relave sin moler. Esto indicaría que la molienda aumentó la reactividad puzolánica al facilitar la disolución de sílice y alúmina del relave en la solución altamente alcalina. En otras palabras, la activación mecánica genera partículas más reactivas que contribuyen a las reacciones puzolánicas.

En la Figura 5.10, con un reemplazo del 10% todas las granulometrías presentan  $\Delta\text{pH}$  positivo. Esto indica que a los 7 días no hubo consumo neto de alcalinidad, sino incluso un ligero aumento de pH. Los relaves actúan mayormente como material inerte de relleno, con muy baja reactividad química. El aumento más notorio en el relave molido confirma que la molienda intensifica la superficie específica, pero en esta baja sustitución no hubo suficiente interacción como para consumir  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ .

Con un reemplazo del 20% se observa el cambio más importante: el relave molido presenta el  $\Delta\text{pH}$  más negativo, lo que significa que consumió la mayor cantidad de cal, mostrando alta reactividad puzolánica. El relave sin moler también consume algo de alcalinidad ( $\Delta\text{pH}$  levemente negativo), pero mucho menos. En cambio, la mezcla apenas modifica el pH, lo que indica una reactividad intermedia-baja, consistente con que parte del material grueso molido aún tenga carácter inerte.

Con un 30% de reemplazo, el consumo de alcalinidad disminuye respecto al 20%. El relave molido apenas consume cal ( $\Delta\text{pH} = -0.04$ ), y el sin moler no consume nada,  $\Delta\text{pH} = 0$ , el pH final e inicial en este caso es el mismo, la concentración de  $\text{OH}^-$  en solución se mantuvo constante, el relave no consumió apreciablemente el  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ni liberó otros álcalis. La mezcla de las dos granulometrías muestra un  $\Delta\text{pH}$  negativo mayor ( $-0.13$ ), lo que indica cierta reactividad, aunque probablemente no por todo el material, sino por fracciones finas liberadas tras la molienda.

Los resultados de  $\Delta\text{pH}$  obtenidos en este trabajo muestran que la cantidad de cal disponible es determinante en la reactividad del relave. Con un 10% de reemplazo (4,8 g de cal) el  $\Delta\text{pH}$  resultó positivo, lo que indica que la cal permaneció en exceso y que el relave apenas reaccionó. En estas condiciones no se esperaría observar una microestructura con muchos C-S-H, ya que la reacción fue mínima y la cal quedó prácticamente sin consumir.

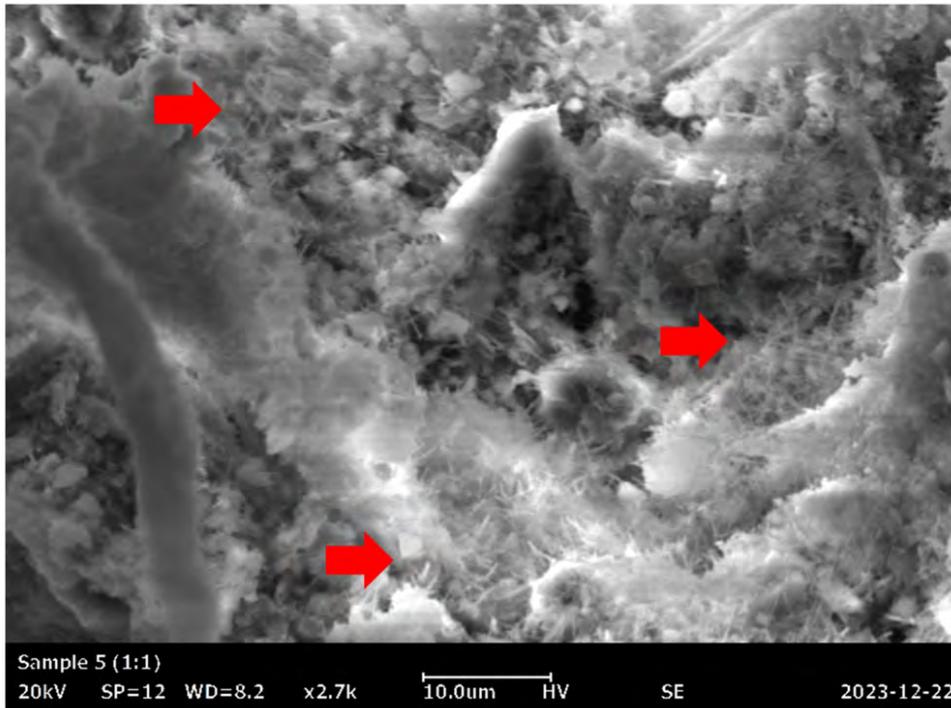


Figura 5.11: Imagen SEM donde se observan estructuras aciculares asociadas a productos C-S-H. Fuente:[14].

En cambio, con un 20% de reemplazo (7,2 g de cal) se alcanzó el mayor consumo de cal ( $\Delta\text{pH}$  más negativo), lo que señala que la relación entre la cantidad de relave y la cal disponible fue buena. En este caso es donde debería haber la mayor formación de productos de reacción. De hecho, estudios de microscopía electrónica en mezclas de cal con relaves han evidenciado que, tras la activación, aparecen estructuras aciculares nanométricas de C-S-H que se mezclan en la matriz. Estas fibras son un indicador directo de que ha reaccionado de forma efectiva; su aparición está relacionada directamente con el grado de consumo de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ .

Finalmente, al aumentar el reemplazo a 30% (con la misma cantidad de cal, 7,2 g), el  $\Delta\text{pH}$  volvió a valores cercanos a cero en la mayoría de granulometrías. Esto refleja que, aunque había más relave disponible, la cal no alcanzó a activar todo el relave, quedando partículas inertes sin reaccionar. En estas condiciones todavía puede formarse C-S-H, pero en menor cantidad que en el 20%.

En conjunto, se puede concluir que la microestructura observada en otros estudios —con abundancia de fibras y agujas de C-S-H en condiciones óptimas de cal— coincide con nuestros resultados de  $\Delta\text{pH}$ . El mayor consumo de alcalinidad en el 20% de reemplazo corresponde con el mayor grado de formación de productos aciculares de C-S-H, mientras que en el 10% y 30% la reacción fue limitada por exceso de cal (sin reaccionar) o por insuficiencia de cal frente al relave disponible.

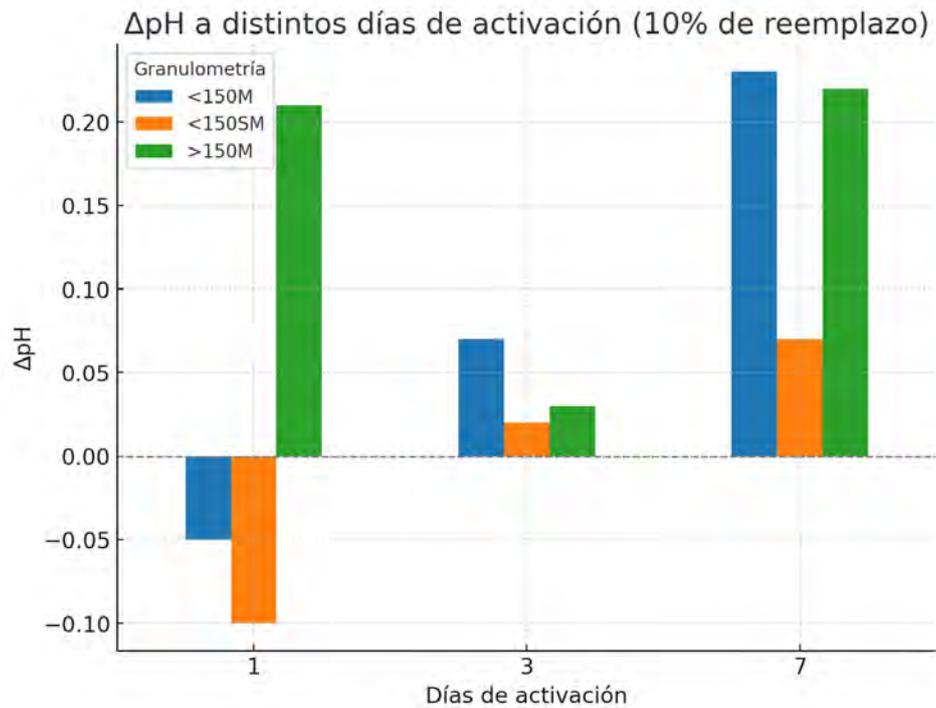


Figura 5.12:  $\Delta\text{pH}$  a distintos días de activación (10 % de reemplazo). Fuente: Elaboración propia.

La Figura 5.12 muestra la variación de  $\Delta\text{pH}$  en pastas de relave con un 10 % de reemplazo, considerando diferentes granulometrías y tiempos de activación (1, 3 y 7 días).

En general, los valores se mantienen positivos o cercanos a cero, lo que indica un consumo limitado de cal y, por tanto, una baja reactividad química del relave en este nivel de sustitución.

En el caso del relave fino molido ( $< 150\text{M}$ ), se aprecia un incremento progresivo de  $\Delta\text{pH}$  con el tiempo, alcanzando el valor más alto a los 7 días, lo que refleja una mayor liberación de alcalinidad asociada a su elevada superficie específica.

La fracción gruesa molida ( $> 150\text{M}$ ) presenta un comportamiento similar, con valores también positivos y crecientes, confirmando que la molienda genera una superficie más activa, aunque sin traducirse en un consumo neto de cal.

Por el contrario, el relave fino sin moler ( $< 150\text{SM}$ ) muestra menos variaciones e incluso un valor negativo a 1 día, evidenciando la menor reactividad de esta fracción en estado natural.

En conjunto, los resultados confirman que, con un 10 % de reemplazo, la cal permanece en exceso y la interacción con el relave es muy limitada; la molienda favorece una mayor respuesta alcalina, pero sin alcanzar valores de  $\Delta\text{pH}$  negativos que indiquen consumo significativo de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Esto refuerza la conclusión de que el 10 % actúa principalmente como material de relleno, con escasa participación en reacciones puzolánicas.

## 5.5 Análisis de la composición mineralógica del relave

El relave de cobre analizado presenta una composición que contiene mayormente silicatos aluminosos y óxidos de hierro, con feldespato potásico, cuarzo, clorita, óxidos/hidróxidos de Fe, plagioclasa y biotita como fases principales, junto con proporciones menores de muscovita, pirita y calcopirita. La composición química por FRX (Fluorescencia de Rayos X) confirma un alto contenido de SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> y Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, lo que en principio indica que hay sílice y alúmina, además de una fracción importante de hierro, que toma un papel importante en la durabilidad y estabilidad química del sistema.

Cuadro 5.4: Porcentaje en peso de las fases presentes en el relave.

Muestra	Composición (%)
Feldespato potásico (K-Feldspar)	18.68
Cuarzo (Quartz)	17.65
Clorita (Chlorite)	16.52
Óxidos-Hidróxidos de Fe	15.08
Feldespatos (Plagioclasa)	10.31
Biotita	8.34
Piroxeno-Anfíbol	3.58
Pirita	2.42
Otros	2.27
Carbonatos (Ca-Fe-Mg)	1.32
Epidota	1.31
Silicatos accesorios	0.80
Rutilo/Anatasa	0.59
Moscovita (Mica blanca)	0.45
Calcopirita	0.29
Alunita-Jarosita	0.26
Anhidrita/Yeso	0.07
Arcillas	0.04
Corindón	0.02
Otros sulfuros	0.01
Minerales de Cu oxidados	0.00
Molibdenita	0.00

Aunque exista mucho cuarzo en el relave, este se comporta como un material inerte por su estructura cristalina estable con enlaces covalentes muy fuertes y baja solubilidad en medios alcalinos, incluso a pH elevados. Por lo tanto, no tiene un papel tan importante en la activación ya que no llega a reaccionar con la cal. En cambio, los feldespatos (ortoclasa y plagioclasa) son las fases que más pueden activar puzolánicamente dentro del relave: en medio alcalino pueden liberar lentamente sílice y alúmina, consumiendo Ca(OH)<sub>2</sub> y contribuyendo a la formación de geles tipo C-S-H o C-A-S-H.



Figura 5.13: Muestra de relave. Fuente: Elaboración propia.

Las muestras de relave fueron sometidas a análisis mineralógico automatizado mediante Qemscan®, así como a ensayos de fluorescencia de rayos X (FRX), con el fin de caracterizar su composición química y mineralógica en función de su potencial uso en materiales cementantes alternativos. De entre los resultados destaca su reactividad moderada y que además requiere tiempos prolongados de curado o molienda fina para exponerse adecuadamente. Sus tamaños medios ( $23\text{--}25\ \mu\text{m}$ ) favorecen la superficie específica, pero no alcanzan la reactividad inmediata.

Los filosilicatos (biotita, muscovita y clorita) contienen sílice y alúmina en sus estructuras, pero su carácter laminar (combinan enlaces covalentes fuertes dentro de las láminas con enlaces débiles entre ellas) y bajo grado de liberación limitan la interacción con el medio alcalino. El QEMSCAN (Quantitative Evaluation of Minerals by Scanning Electron Microscopy) muestra que estas fases se encuentran en tamaños finos ( $10\text{--}19\ \mu\text{m}$ ), aunque gran parte está ocluida. De ahí que se recomiende tratamientos de activación mecánica para mejorar su liberación y reactividad. Sin molienda previa, actúan más como relleno que como reactivos.

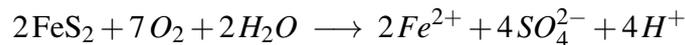
Cuadro 5.5: Valores del porcentaje de liberación de los minerales para la muestra.

Mineral	$\leq 10\%$	$\leq 20\%$	$\leq 30\%$	$\leq 40\%$	$\leq 50\%$	$\leq 60\%$	$\leq 70\%$	$\leq 80\%$	$\leq 90\%$	$< 100\%$	100%
Calcopirita	40,5	25,0	11,2	20,1	0,3	0,2	0,0	0,4	0,0	0,0	2,3
Pirita	16,2	3,2	7,4	1,3	2,5	6,0	1,6	3,4	8,5	18,5	31,3
Cuarzo	4,0	6,8	11,3	8,6	12,8	9,9	4,9	9,3	13,0	14,1	5,4
Feldespato K	4,3	6,2	10,3	11,3	12,2	11,0	14,4	13,4	9,3	4,0	3,4
Piroxeno-Anfibola	21,2	6,4	4,4	6,1	9,8	1,5	5,3	9,5	12,9	12,9	10,1
Clorita	10,2	15,3	13,4	9,5	5,9	7,5	5,8	7,3	6,7	11,7	6,7
Muscovita	50,8	12,8	22,6	5,9	4,6	0,1	0,5	0,4	0,6	0,0	1,7
Biotita	20,7	28,3	23,4	10,2	4,3	1,6	2,0	1,6	1,3	2,9	3,8
Plagioclasa	4,2	6,9	7,7	8,7	9,8	15,4	9,4	8,8	8,6	16,0	4,6

En la tabla 5.5 se presentan los valores de porcentaje de liberación de los minerales para la muestra. La liberación corresponde al porcentaje de área ocupado por cada mineral dentro de la partícula analizada. De acuerdo con este criterio, una fase mineral que ocupa entre 0 y 30% del área de la partícula se clasifica como *ocluida*; entre 30 y 70% como *parcialmente liberada*; y entre 70 y 100% como *liberada*. El software Qemscan® realiza este cálculo considerando categorías de liberación con incrementos del 10%, expresadas en porcentaje en peso del mineral

presente en cada rango. Así, por ejemplo, la clase  $\leq 90\%$  corresponde a partículas compuestas casi en su totalidad por la fase mineral analizada, con un grado de liberación mayor a  $80\%$  y menor o igual a  $90\%$ .

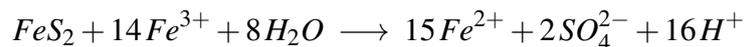
Los óxidos e hidróxidos de hierro, que representan más del  $15\%$ , tienen escasa sílice reactiva y no aportan al consumo de cal. Su papel es básicamente físico, contribuyen a la dureza de la matriz, aunque si hay mucha cantidad puede afectar la estabilidad química a largo plazo por riesgo de oxidación. Por otro lado, los sulfuros (pirita y calcopirita) tienen un efecto más problemático: la pirita, bien liberada, es propensa a oxidarse y generar ácido sulfúrico, lo que neutraliza parte del  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  disponible y disminuye la alcalinidad del sistema. La reacción global simplificada de oxidación de la pirita es:



El aumento de  $\text{H}^+$  acidifica el medio. Posteriormente, el hierro ferroso ( $\text{Fe}^{2+}$ ) puede oxidarse a férrico ( $\text{Fe}^{3+}$ ):



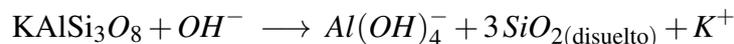
El  $\text{Fe}^{3+}$  resultante puede atacar más pirita, amplificando el ciclo de oxidación:



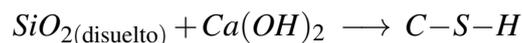
La calcopirita, aunque presente en trazas y poco liberada, podría tener un comportamiento similar bajo condiciones de oxidación. Esto convierte a los sulfuros en fases inhibitorias de la activación química, en contraste con los silicatos que, aunque de reactividad lenta, pueden contribuir positivamente.

En conjunto, la mineralogía explica los resultados de activación observados en términos de  $\Delta\text{pH}$ . Los feldespatos son los principales responsables de los descensos de pH (consumo de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) cuando están finamente molidos, mientras que el cuarzo y los óxidos de hierro mantienen valores cercanos a cero, al actuar como fases inertes.

#### **Disolución del feldespato en medio alcalino:**



#### **Reacción de los productos disueltos con la cal:**



Los filosilicatos, con baja liberación, solo aportarían tras activación mecánica, y la pirita introduce un riesgo de acidificación que puede neutralizar parte de la cal disponible. De este modo, la combinación de silicatos cristalinos de baja reactividad, filosilicatos poco liberados y sulfuros oxidables explica por qué el relave presenta solo una activación química moderada, con descensos limitados de pH y un comportamiento más cercano a un material de relleno que

a un sustituto puzolánico.

## 6. CONCLUSIONES Y LINEAS FUTURAS

### 6.1 Conclusiones

En el presente trabajo se estudió la resistencia mecánica de morteros con ciertos porcentajes de reemplazo de relave, además de distintas granulometrías del mismo, con distintas activaciones. Analizando todas estas variaciones por separado y en conjunto, podemos sacar varias conclusiones.

Es evidente que el porcentaje de reemplazo del 20% fue el que mejores resultados obtuvo en resistencias mecánicas tanto en flexión como en compresión; podemos atribuir estos buenos resultados a que, como observamos en los resultados de pH, tuvo la mayor reactividad en conjunto.

Los resultados del caso del 30%, aunque fueron menores que el 20% y en el caso de la compresión incluso menores que en el 10%, mostraron resistencias mecánicas bastante estables, sin caídas bruscas.

Los resultados de los porcentajes de reemplazo del 10% y 30% no fueron tan buenos como en el caso del 20%, debido a que la cantidad de cal añadida para activar el relave químicamente pudo no ser suficiente para el aumento del porcentaje de relave, por lo que no reaccionó completamente, dejando partículas inertes. Además, como observamos en la sección 5.3, las resistencias en probetas mezcladas en condiciones más frías y secas fueron menores que las elaboradas bajo condiciones más cálidas y húmedas. En este sentido, las probetas del 30% se realizaron bajo las condiciones más frías, lo cual debe considerarse al interpretar los resultados en conjunto. Si bien la diferencia atribuida a las condiciones ambientales de temperatura y humedad es relativamente leve, constituye un factor a tener en cuenta en el análisis de las resistencias mecánicas.

En cuanto al 10%, aunque tuvo mejores resultados en el ensayo de compresión en comparación con el 30%, si nos fijamos en los resultados de pH, fue la que peor reactividad presentó en todas sus granulometrías. En este caso, los relaves actuaron mayormente como material inerte de relleno, con muy baja reactividad química.

Dentro del grupo del 10% de reemplazo se realizaron diferentes tiempos de activación (1, 3 y 7 días). Un día de activación mostró un efecto notable sobre la resistencia, lo cual resulta coherente teniendo en cuenta que, de entre los tres periodos de activación, fue el que mejor reactividad presentó en general, tal como se observa en la variación de pH de la sección 5.4.

La evaluación de la granulometría del relave mostró que los morteros elaborados con relave molido, tanto en la fracción fina como en la gruesa, alcanzaron resistencias mecánicas superiores a las obtenidas con relave sin moler, lo que confirma que la activación mecánica resulta efectiva al incrementar la superficie específica de las partículas y favorecer su interacción con la matriz cementante. Cabe destacar, sin embargo, que esta mayor finura también implicó un

aumento en la demanda de agua, lo cual redujo la trabajabilidad de las mezclas.

En términos relativos, la fracción gruesa molida presentó un comportamiento intermedio y la fracción fina molida alcanzó valores ligeramente superiores en algunos casos, aunque las diferencias entre ambas no fueron muy marcadas y dependieron del porcentaje de reemplazo y del tipo de ensayo (compresión o flexión). En cambio, el uso de relave sin moler resultó sistemáticamente el menos eficiente en cuanto a resistencia mecánica. Estas tendencias responden al equilibrio entre el empaquetamiento granular y el efecto del tamaño de partícula en las reacciones de hidratación: las partículas finas contribuyen a densificar la matriz y reaccionar de forma puzolánica, mientras que las más gruesas aportan principalmente al empaquetamiento sin generar un incremento tan marcado en la resistencia.

## **6.2 Líneas futuras**

En base a los resultados y conclusiones obtenidas, este trabajo constituye un punto de partida para un estudio paralelo, en el que se considere una muestra más amplia que permita aumentar la representatividad del experimento, con nuevas mezclas que consideren distintas granulometrías, activaciones y distintos porcentajes de reemplazo.

En lo técnico, se recomienda adoptar un 20% de reemplazo de cemento por relave activado como valor de referencia, ya que representó el mejor equilibrio entre resistencia mecánica y reactividad, ajustando en cada caso la cantidad de cal al porcentaje de sustitución para evitar tanto excesos como deficiencias en la activación. Asimismo, resulta conveniente priorizar curvas continuas que combinen fracciones finas y gruesas, ya que favorecen la compactación de la matriz y reducen la porosidad, evitando, al mismo tiempo, sobremoliendas que generan ultrafinos con elevada demanda de agua y riesgo de aglomeración. En cuanto a los tiempos de activación, los resultados sugieren que los intervalos óptimos se sitúan entre 1 y 3 días, ya que períodos más prolongados pueden encapsular partículas y disminuir la resistencia; este proceso debe controlarse mediante la variación de pH, buscando valores ligeramente negativos como indicador de consumo real de cal. En el estado fresco, el uso de aditivos superplastificantes resulta fundamental para compensar la menor trabajabilidad de las fracciones finas sin necesidad de aumentar la relación agua/cemento, lo que permite adaptar la granulometría a la aplicación: con más finos molidos en morteros estructurales para maximizar la resistencia, o con fracciones más gruesas en morteros de revestimiento y bombeables para mejorar la fluidez.

Finalmente, se considera pertinente ampliar la investigación mediante estudios que contemplen diferentes dosificaciones, granulometrías, porcentajes de reemplazo, dosis de cal y la incorporación de aditivos, junto con ensayos de durabilidad, estabilidad ambiental y análisis de ciclo de vida. Asimismo, para reforzar las conclusiones obtenidas, resulta recomendable realizar ensayos complementarios orientados a la evaluación de la resistencia a edades más prolongadas (por ejemplo, a 90 días), así como al comportamiento del material frente a ciclos de humedad-sequedad. Del mismo modo, se sugiere profundizar en la caracterización ambiental mediante pruebas de lixiviación de elementos potencialmente tóxicos presentes en el relave inmovilizado. De esta forma, será posible correlacionar con mayor precisión la formación de productos cementantes con el desarrollo de resistencias mecánicas a largo plazo y, en consecuencia, validar la viabilidad técnica, ambiental y económica del uso de relaves en morteros, en coherencia con los objetivos de sostenibilidad y reducción del impacto ambiental.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Universidad Militar Nueva Granada (UMNG). *Hidratación del cemento Portland*. Proceso de hidratación del cemento según Matallana (2006). s. f. URL: [http://virtual.umng.edu.co/distancia/ecosistema/ovas/ingenieria\\_civil/tecnologia\\_del\\_concreto\\_y\\_laboratorio/unidad\\_1/medios/documentacion/p6h20.php](http://virtual.umng.edu.co/distancia/ecosistema/ovas/ingenieria_civil/tecnologia_del_concreto_y_laboratorio/unidad_1/medios/documentacion/p6h20.php).
- [2] Gerson Alfredo Anicama Acosta. “Estudio experimental del empleo de materiales de desecho de procesos mineros en aplicaciones prácticas con productos cementicios”. Tesis para optar al Título de Ingeniero Civil. Lima, Perú: Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ciencias e Ingeniería, 2010.
- [3] AGICO Cement / Cement-Plants.es. *Proyecto EPC "llave en mano" para planta de cemento*. Servicio integral de diseño, fabricación, instalación y puesta en marcha de plantas de cemento (EPC turnkey). 2025. URL: <https://cementplants.es/epc-project/>.
- [4] Rodrigo Marcelo Castro Alfaro. “Uso de relaves de cobre como material cementante en morteros geopolímeros de construcción”. Tesis de Pregrado en Ingeniería Civil. Santiago, Chile: Universidad Andrés Bello, Facultad de Ingeniería, Escuela de Obras Civiles, 2023.
- [5] American Concrete Institute. *Guide to Hot Weather Concreting (ACI 305R-20)*. Farmington Hills, MI: American Concrete Institute, 2020. ISBN: 978-1-64195-112-8.
- [6] Cecilia Kimberly Orozco Ávila. “Simulación termodinámica de la producción de clínker”. Tesis de Ingeniería en Metalurgia y Materiales. Ciudad de México: Instituto Politécnico Nacional, Escuela Superior de Ingeniería Química e Industrias Extractivas, 2016.
- [7] O. A. Cabrera, L. P. Traversa y N. F. Ortega. “Fluidez de morteros cementíceos con arenas machacadas”. En: *Materiales de Construcción* 60.300 (2010), págs. 115-130. ISSN: 0465-2746. DOI: 10.3989/mc.2010.50909.
- [8] Karen Kotthoff Cáceres. “Mineralogía de depósitos de relave en Chile y relación con yacimientos de origen: potencial para la recuperación de elementos de valor”. Memoria de Título de Geóloga y Tesis de Magíster en Ciencias, Mención Geología. Santiago, Chile: Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Geología, 2020.
- [9] Nicolás Ignacio Urrutia Castellaro. “Estudio reológico de relaves basado en técnicas de caracterización avanzada de minerales”. Memoria de Título de Ingeniero Civil de Minas y Tesis de Magíster en Ciencias de la Ingeniería, Mención Metalurgia Extractiva. Santiago, Chile: Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería de Minas, 2016.

- [10] Alessandra Castro y Fernanda Ferreira. “Efecto de empaquetamiento de las partículas en la durabilidad de los hormigones de alto desempeño”. En: *Revista Ingeniería de Construcción* 31.2 (2016), págs. 91-104. DOI: 10.4067/S0718-50732016000200003. URL: [https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-50732016000200003](https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-50732016000200003).
- [11] Biblioteca Nacional de Chile – Memoria Chilena. *Minería colonial (1541–1810)*. Historia de la explotación del oro, plata y cobre en la época colonial en Chile. s. f. URL: <https://www.memoriachilena.gob.cl/602/w3-article-752.html>.
- [12] María Fernanda Díaz Burbano. “Estudio del efecto conjunto de la Fluorita y el Yeso como mineralizadores en la fabricación de cemento Portland I”. Tesis de Maestría en Ingeniería de Materiales y Procesos. Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, Escuela de Ingeniería de Materiales, 2012. URL: <https://bffrepositorio.unal.edu.co/server/api/core/bitstreams/f56397a6-3dcf-4175-a07a-b0ca1aaf3863/content>.
- [13] Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN). *Datos Públicos de Depósitos de Relaves*. Catastro Nacional de depósitos de relaves activos e inactivos. 2023. URL: <https://www.sernageomin.cl/datos-publicos-deposito-de-relaves/>.
- [14] Jesús F. González-Sánchez et al. “Increasing the Sustainability of the Stabilization/Solidification of Potentially Toxic Elements Contained in Tailings from an Active Mine Using a Modified Lime Mortar”. En: *Sustainability* 16.6 (2024), pág. 2320. DOI: 10.3390/su16062320.
- [15] Mifeng Gou, Longfei Zhou y Nathalie Wei Ying Then. “Utilization of Tailings in Cement and Concrete: A Review”. En: *Science and Engineering of Composite Materials* 26.1 (2019), págs. 449-464. DOI: 10.1515/secm-2019-0029. URL: <https://doi.org/10.1515/secm-2019-0029>.
- [16] Lucy Little et al. “Fine grinding: How mill type affects particle shape characteristics and mineral liberation”. En: *Minerals Engineering* 111 (2017), págs. 148-157. DOI: 10.1016/j.mineng.2017.05.007.
- [17] Consejo Minero. *Cifras actualizadas de la minería*. Informe mensual sobre indicadores de la industria minera en Chile. 2025. URL: <https://consejominero.cl/mineria-en-chile/cifras-actualizadas-de-la-mineria/>.
- [18] Consejo Minero. *Cifras actualizadas de la minería*. Presentación en PowerPoint. Elaborado con información de Cochilco, Sernageomin, USGS e ICSG. Mar. de 2025.
- [19] Christopher Anthony Larenas Mora. “Análisis de estabilidad química y física de morteros con sustitución de arena por material de relave”. Memoria de Título de Ingeniero Civil de Minas. Concepción, Chile: Universidad de Concepción, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Metalúrgica, 2024.
- [20] Benjamín Manuel Campos Ordaz. “Modelo de negocio para el tratamiento de relaves en la minería chilena”. Tesis de Magíster en Gestión y Dirección de Empresas. Santiago, Chile: Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Industrial, 2015.
- [21] Daniela Ruiz Ruiz. *Datos evaluación mecánica de morteros con reemplazo de cemento*. Data set. Zenodo, 2025. DOI: 10.5281/zenodo.17045057. URL: <https://doi.org/10.5281/zenodo.17045057>.

- [22] Sika S.A.U. *Hormigón Proyectado: Sistemas de Aplicación de productos Sika en el Hormigón Proyectado*. Inf. téc. N00ba 13.1. Documento técnico. Fecha: 27/07/09, 40 páginas. Sika S.A.U., 2009. URL: <https://esp.sika.com/dms/getdocument.get/03fffe32-4b95-31cb-948e-dd65fc15b0bf/L74STATEMENTHORMIGONPROYECTADO.pdf>.
- [23] Sistema Español de Inventario de Emisiones. *Fabricación de cemento (proceso de des-carbonatación)*. Inf. téc. Ficha metodológica SNAP 04.06.12, actualización octubre 2017. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, Gobierno de España, 2017. URL: <http://www.prtr-es.es/Data/images/GuiaMetodosMedicionyFEEdiciembre2013.pdf>.
- [24] GCP Applied Technologies. *Cement PSD and Water Demand*. Blog (Corporate Technical Note). 2025. URL: <https://gcpat.mx/es-la/about/news/blog/cement-psd-and-water-demand>.
- [25] Félix José Cárdenas Ticlavilca. “Propuesta de uso de relaves de mina polimetálica en la fabricación de unidades de albañilería - caso ex unidad minera Mercedes 3”. Tesis de Ingeniería Civil. Lima, Perú: Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC), 2019. DOI: 10.19083/tesis/625225. URL: <http://hdl.handle.net/10757/625225>.
- [26] Xu Wu et al. “Experimental Study on the Preparation of Cementitious Materials Through the Activation of Lead-Zinc Tailings”. En: *Minerals* 14.12 (2024), pág. 1215. DOI: 10.3390/min14121215. URL: <https://www.mdpi.com/2075-163X/14/12/1215>.

## 8. ANEXOS

### 8.1 Probetas post-ensayos

A continuación, se muestran las fotografías tomadas de cada lote de probetas, post-ensayo de compresión y post-ensayo de flexión.

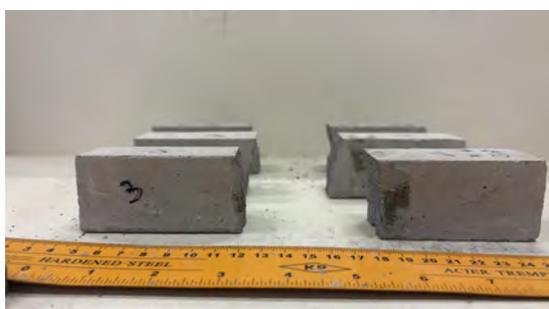
#### 8.1.1 Muestras con reemplazo 10 %

##### 1 día de activación

##### Granulometría fina molida



Figura 8.1: Probeta post-ensayo de compresión. Fuente: Elaboración propia.



(a) Probeta post-ensayo de flexión (vista frontal).



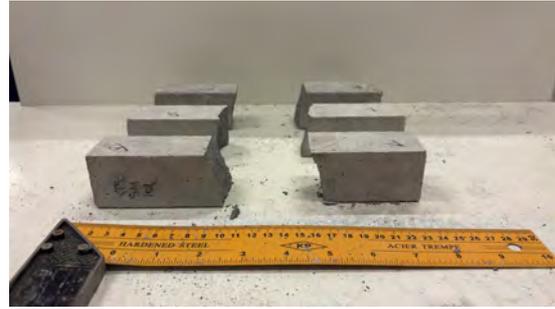
(b) Probeta post-ensayo de flexión (vista en planta).

Figura 8.2: Probetas post-ensayo de flexión. Fuente: Elaboración propia.

##### Granulometría fina sin moler



(a) Probeta post-ensayo de flexión (vista en planta).



(b) Probeta post-ensayo de flexión (vista frontal).

Figura 8.3: Probetas post-ensayo de flexión. Fuente: Elaboración propia.



(a) Probeta post-ensayo de compresión (vista frontal).



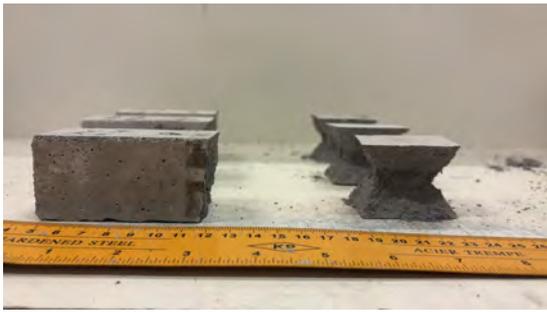
(b) Probeta post-ensayo de compresión (vista en planta).

Figura 8.4: Probetas post-ensayo de compresión. Fuente: Elaboración propia.

### Granulometría mixta



Figura 8.5: Probeta post-ensayo de flexión (vista en planta). Fuente: Elaboración propia.



(a) Probeta post-ensayo de compresión (vista frontal).

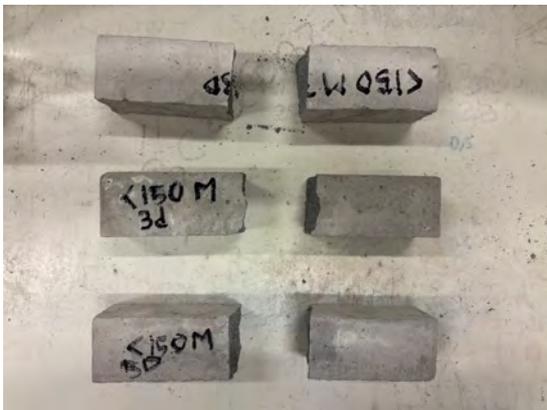


(b) Probeta post-ensayo de compresión (vista en planta).

Figura 8.6: Probetas post-ensayo de compresión. Fuente: Elaboración propia.

### 3 días de activación

#### Granulometría fina molida



(a) Probeta post-ensayo de flexión (vista frontal).



(b) Probeta post-ensayo de flexión (vista en planta).

Figura 8.7: Probetas post-ensayo de flexión. Fuente: Elaboración propia.



(a) Probeta post-ensayo de compresión (vista frontal).



(b) Probeta post-ensayo de compresión (vista en planta).

Figura 8.8: Probetas post-ensayo de compresión. Fuente: Elaboración propia.

### Granulometría fina sin moler



(a) Vista frontal.

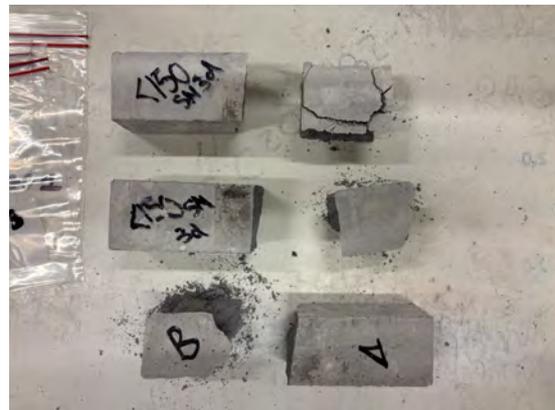


(b) Vista en planta.

Figura 8.9: Probetas post-ensayo de flexión. Fuente: Elaboración propia.



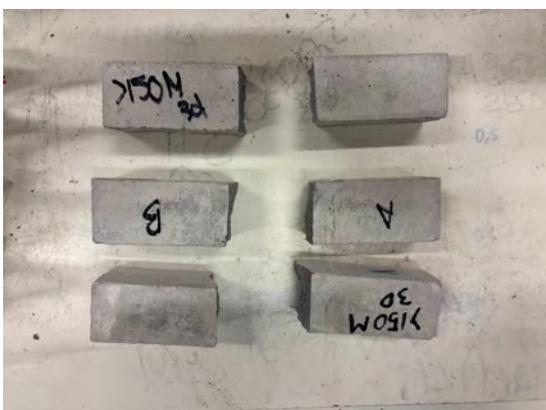
(a) Vista frontal.



(b) Vista en planta.

Figura 8.10: Probetas post-ensayo de compresión. Fuente: Elaboración propia.

### Granulometría mixta



(a) Vista frontal.



(b) Vista en planta.

Figura 8.11: Probetas post-ensayo de flexión. Fuente: Elaboración propia.



(a) Vista frontal.



(b) Vista en planta.

Figura 8.12: Probetas post-ensayo de compresión. Fuente: Elaboración propia.

### 7 días de activación

#### Granulometría fina molida



(a) Vista frontal.



(b) Vista en planta.

Figura 8.13: Probetas post-ensayo de flexión. Fuente: Elaboración propia.



(a) Vista frontal.



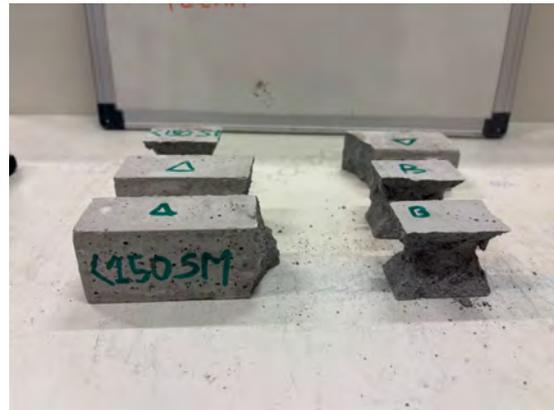
(b) Vista en planta.

Figura 8.14: Probetas post-ensayo de compresión. Fuente: Elaboración propia.

### Granulometría fina sin moler



(a) Vista en planta.



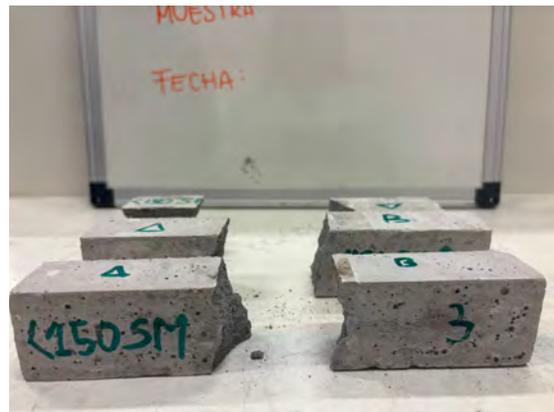
(b) Vista frontal.

Figura 8.15: Probetas post-ensayo de compresión. Fuente: Elaboración propia.

### Granulometría mixta



(a) Vista frontal.

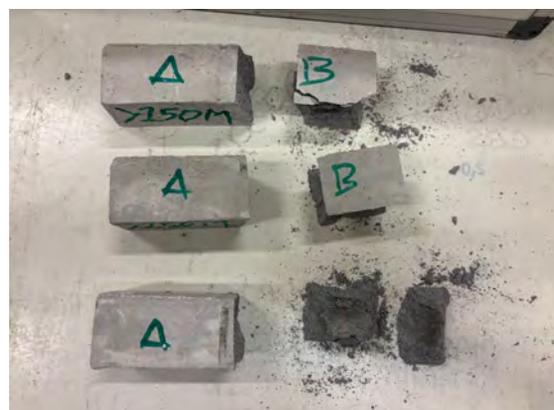


(b) Vista en planta.

Figura 8.16: Probetas post-ensayo de flexión. Fuente: Elaboración propia.



(a) Vista frontal.



(b) Vista en planta.

Figura 8.17: Probetas post-ensayo de compresión. Fuente: Elaboración propia.

### 8.1.2 Muestras con reemplazo 20 %

#### Granulometría fina molida



(a) Vista frontal.



(b) Vista en planta.

Figura 8.18: Probetas post-ensayo de flexión. Fuente: Elaboración propia.



(a) Vista en planta.



(b) Vista frontal.

Figura 8.19: Probetas post-ensayo de compresión. Fuente: Elaboración propia.

#### Granulometría fina sin moler

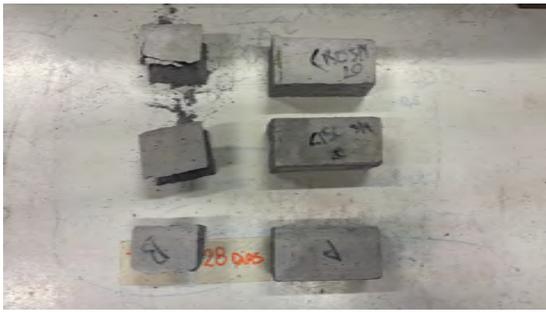


(a) Vista en planta.

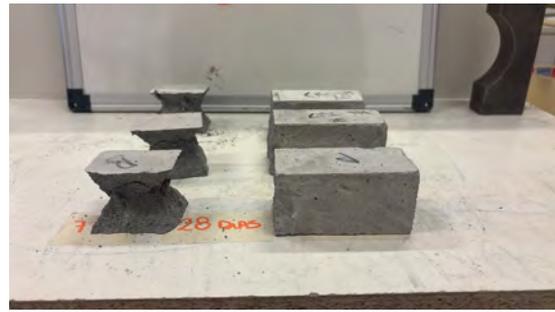


(b) Vista frontal.

Figura 8.20: Probetas post-ensayo de flexión. Fuente: Elaboración propia.



(a) Vista en planta.



(b) Vista frontal.

Figura 8.21: Probetas post-ensayo de compresión. Fuente: Elaboración propia.

### Granulometría mixta



(a) Vista en planta.



(b) Vista frontal.

Figura 8.22: Probetas post-ensayo de flexión. Fuente: Elaboración propia.



(a) Vista frontal.

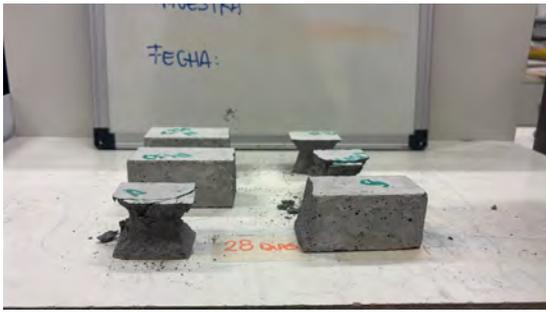


(b) Vista en planta.

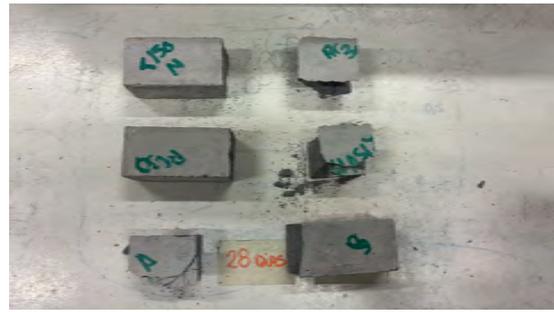
Figura 8.23: Probetas post-ensayo de compresión. Fuente: Elaboración propia.

### 8.1.3 Muestras con reemplazo 30 %

#### Granulometría fina molida



(a) Vista frontal.



(b) Vista en planta.

Figura 8.24: Probetas post-ensayo de compresión. Fuente: Elaboración propia.



(a) Vista frontal.



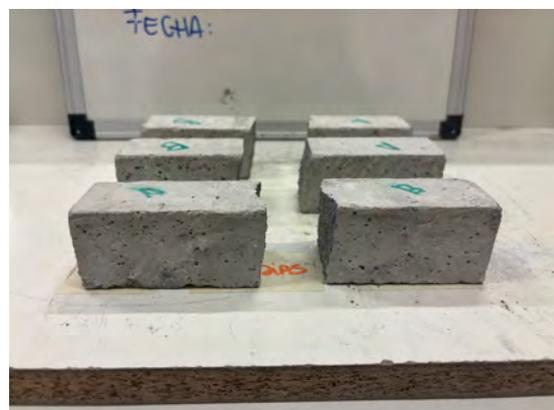
(b) Vista en planta.

Figura 8.25: Probetas post-ensayo de flexión. Fuente: Elaboración propia.

### Granulometría fina sin moler

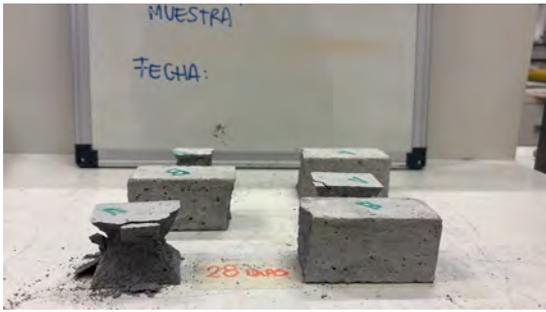


(a) Vista frontal.

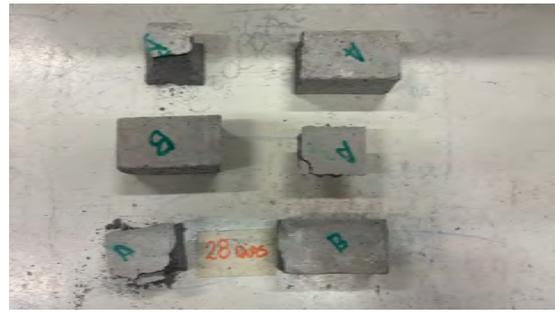


(b) Vista en planta.

Figura 8.26: Probetas post-ensayo de flexión. Fuente: Elaboración propia.



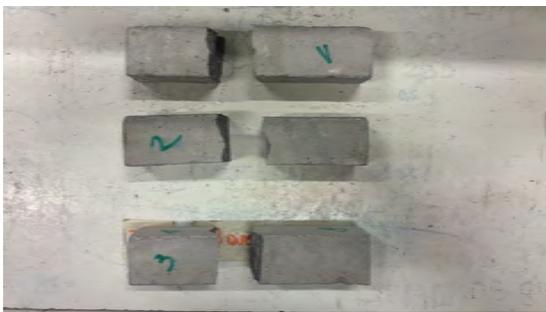
(a) Vista frontal.



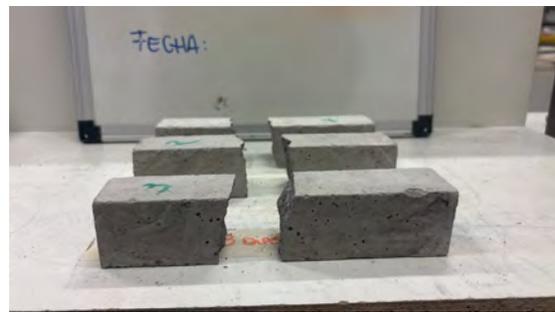
(b) Vista en planta.

Figura 8.27: Probetas post-ensayo de compresión. Fuente: Elaboración propia.

### Granulometría mixta

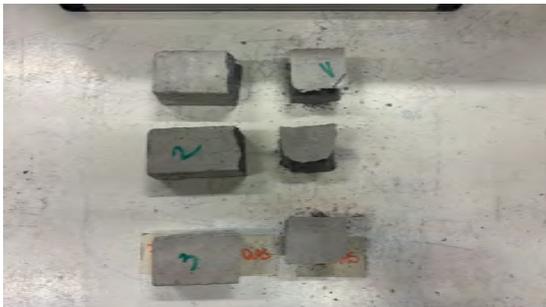


(a) Vista en planta.

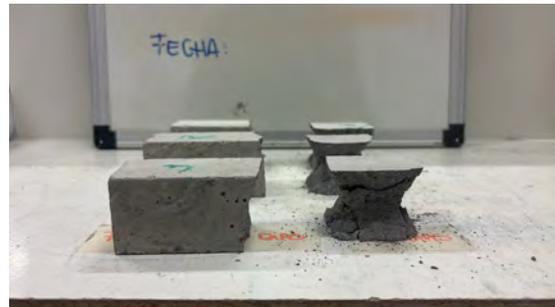


(b) Vista frontal.

Figura 8.28: Probetas post-ensayo de flexión. Fuente: Elaboración propia.



(a) Vista en planta.



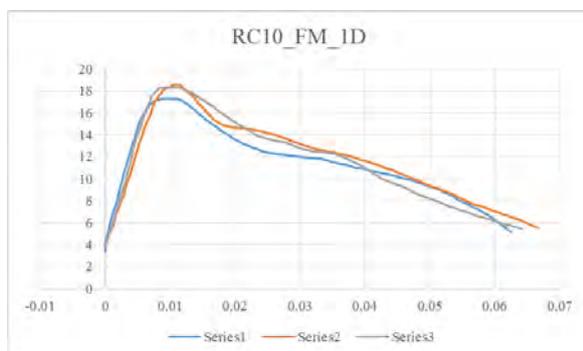
(b) Vista frontal.

Figura 8.29: Probetas post-ensayo de compresión. Fuente: Elaboración propia.

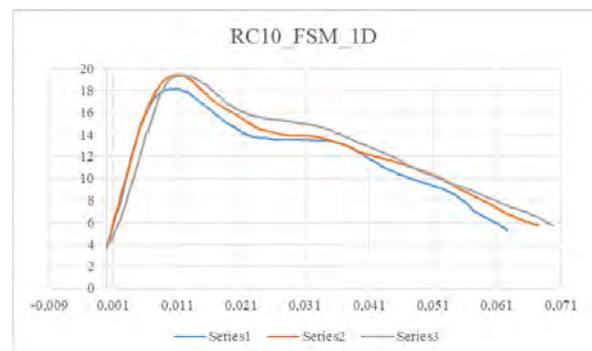
## 8.2 Curvas de los ensayos de compresión

A continuación, se van a mostrar los resultados de las curvas de rotura de las probetas ensayadas a compresión. En cada gráfica aparecen tres curvas equivalentes a las tres probetas ensayadas de la mezcla correspondiente. Estas representan en el eje vertical la carga aplicada en MPa y en el eje horizontal la deformación unitaria.

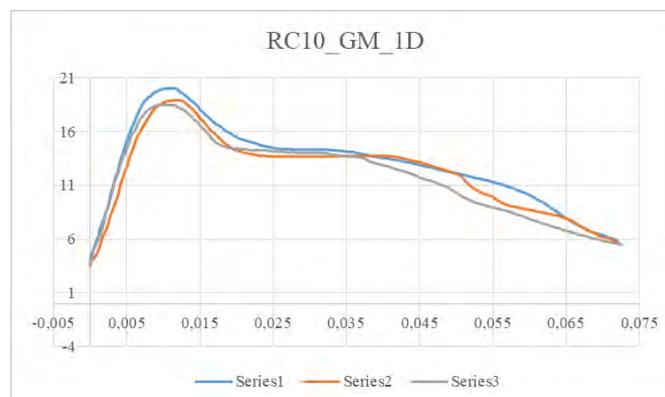
### 8.2.1 Probetas 10 % de reemplazo



(a) Fracción fina molida

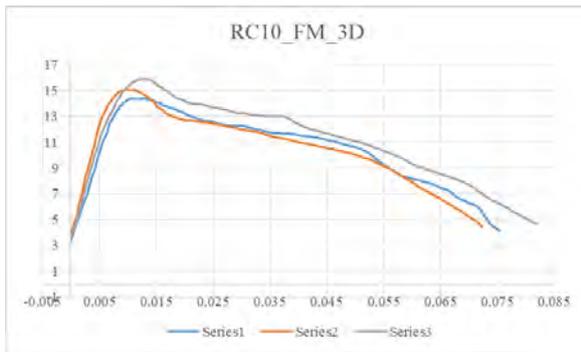


(b) Fracción fina sin moler

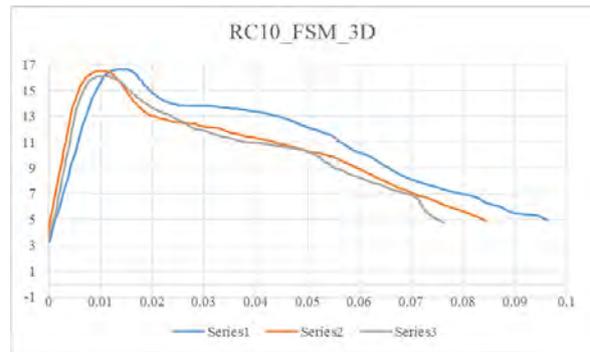


(c) Fracción gruesa molida + fracción fina sin moler

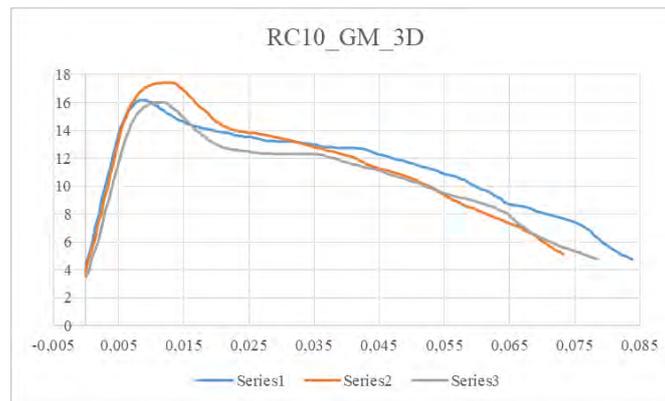
Figura 8.30: Reemplazo de cemento del 10% con un día de activación



(a) Fracción fina molida

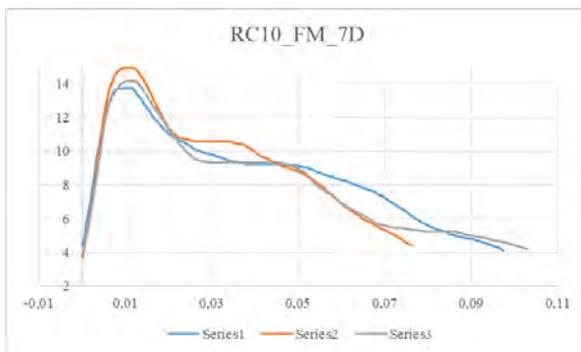


(b) Fracción fina sin moler

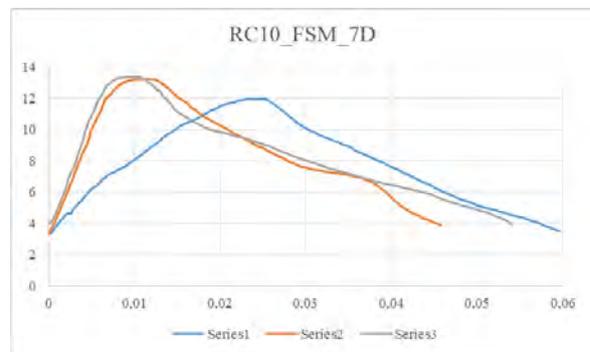


(c) Fracción gruesa molida + fracción fina sin moler

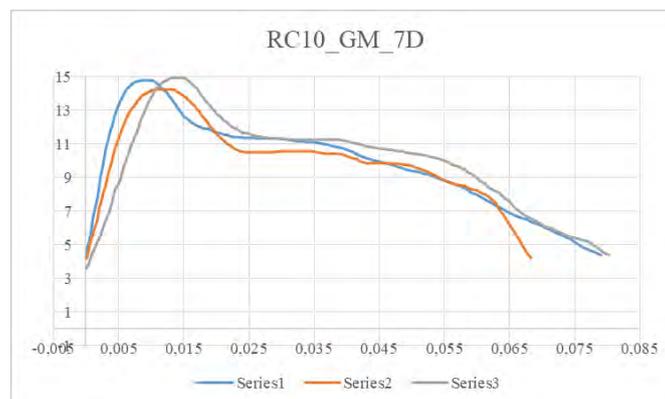
Figura 8.31: Reemplazo de cemento del 10% con tres días de activación



(a) Fracción fina molida



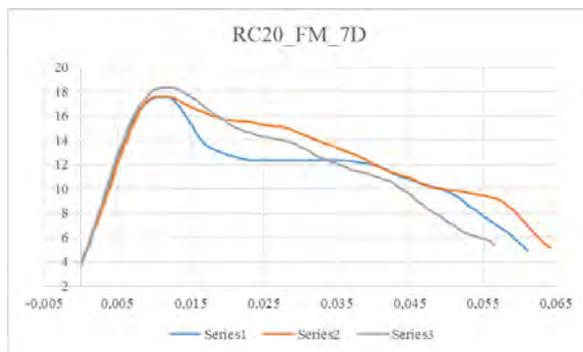
(b) Fracción fina sin moler



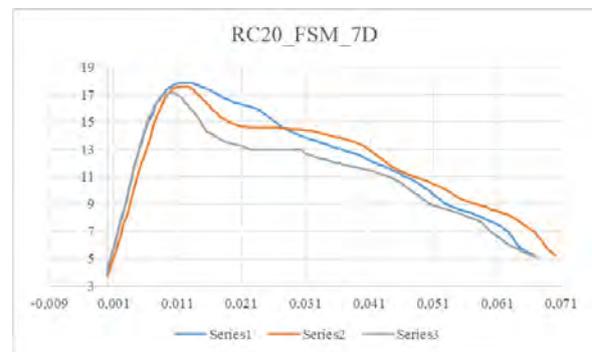
(c) Fracción gruesa molida + fracción fina sin moler

Figura 8.32: Reemplazo de cemento del 10% con siete días de activación 89

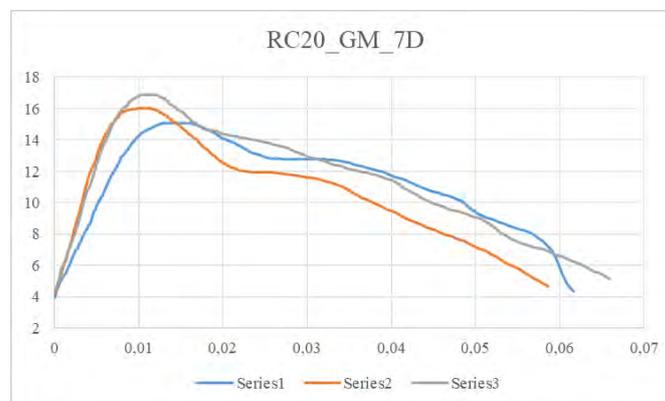
### 8.2.2 Probetas 20 % de reemplazo



(a) Fracción fina molido



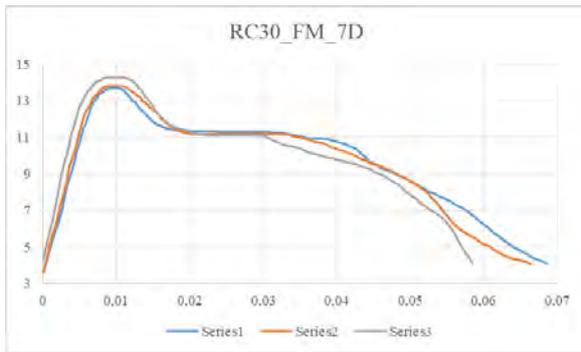
(b) Fracción fina sin moler



(c) Fracción gruesa molido + fracción fina sin moler

Figura 8.33: Reemplazo de cemento del 20% con siete días de activación

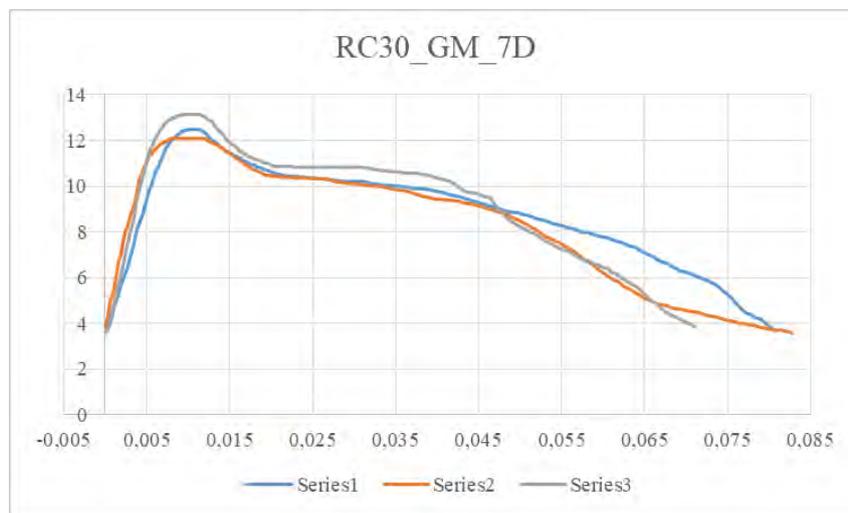
### 8.2.3 Probetas 30 % de reemplazo



(a) Fracción fina molida



(b) Fracción fina sin moler



(c) Fracción gruesa molida + fracción fina sin moler

Figura 8.34: Reemplazo de cemento del 30 % con siete días de activación