

Utilización de arcillas de tierras raras como reemplazo de cemento para la fabricación de mortero

Lucas Daza-Badilla¹, René Gómez^{1,2}, Cristian Canales³, Siva Avudaiappan⁴, Roberto Gómez-Espina¹, Adolfo Alcayaga¹, Fernando Betancourt¹

¹Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Universidad de Concepción, Chile. Email: ldaza2016@udec.cl, regomez@udec.cl, robgozmez@udec.cl, fbetancourt@udec.cl

²Advanced Mining Technology Center, Universidad de Chile, Chile. Email: regomez@udec.cl

³Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Concepción, Chile. Email: cristcanales@udec.cl

⁴Departamento de Ciencias de la Construcción, Facultad de Ciencias de la Construcción Ordenamiento Territorial, Universidad Tecnológica Metropolitana, Santiago, Chile. s.avudaiappan@utem.cl

Resumen

Los elementos de tierras raras son moderadamente abundantes en la corteza terrestre y se encuentran en diversos minerales, tanto en depósitos de roca dura como aluviales. La caolinita, un mineral de arcilla, tiene aplicaciones en la industria de la construcción. Chile posee potencial geológico para las arcillas de tierras raras, con proyectos como el de El Cabrito en Penco, el cual es pionero en la explotación de lantánidos en el país. Este estudio tiene como objetivo innovar en el sector minero mediante la sustitución del cemento por arcillas de tierras raras. Se propone reemplazar entre el 5% y el 50% del peso total de las muestras. Los ensayos mecánicos de compresión y flexión muestran una mejoría significativa hasta un 10% de reemplazo, lo que sugiere que las arcillas tienen un gran potencial como sustituto del cemento. A futuro, se plantea un proceso de calcinación para mejorar aún más la resistencia de estas mezclas.

Palabras clave: estilo; formato; indicaciones; plantilla modelo.

Abstract

Rare earth elements are moderately abundant in the earth's crust and are found in various minerals, both in hard rock and alluvial deposits. Kaolinite, a clay mineral, has applications in the construction industry. Chile has geological potential for rare earth clays, with projects such as El Cabrito in Penco, which is a pioneer in the exploitation of lanthanides in the country. This study aims to innovate in the mining sector by replacing cement with rare earth clays. It is proposed to replace between 5% and 50% of the total weight of the samples. Mechanical compression and bending tests show a significant improvement up to 10% replacement, suggesting that clays have great potential as a substitute for cement. In the future, a calcination process is proposed to further improve the strength of these mixtures.

Keywords: formatting; guidelines; sample template; style; version 2017.1

1. Introducción

Los elementos de tierras raras son elementos moderadamente abundantes en la corteza terrestre, encontrados en una variedad de minerales como carbonatos, óxidos, fosfatos y siliciuros. Se encuentran tanto en depósitos de roca dura como en depósitos aluviales en todo el mundo, con depósitos significativos en varios países. Sin embargo, en la

mayoría de los casos, su recuperación solo es viable como subproductos de otros minerales, aunque en algunos depósitos importantes, pueden ser el producto principal. Aunque hay numerosos minerales que contienen tierras raras, la mayoría del suministro mundial proviene de algunas fuentes principales, con alrededor de una docena de minerales adicionales que pueden complementar este suministro. [1].

Los elementos de tierras raras son aquellos que se han vuelto extremadamente importantes para nuestro mundo de tecnología debido a sus propiedades magnéticas, fosforescentes y catalíticas únicas. Estos elementos son críticos para tecnologías que van desde teléfonos celulares y televisores hasta bombillas LED y turbinas eólicas (Figura 1).

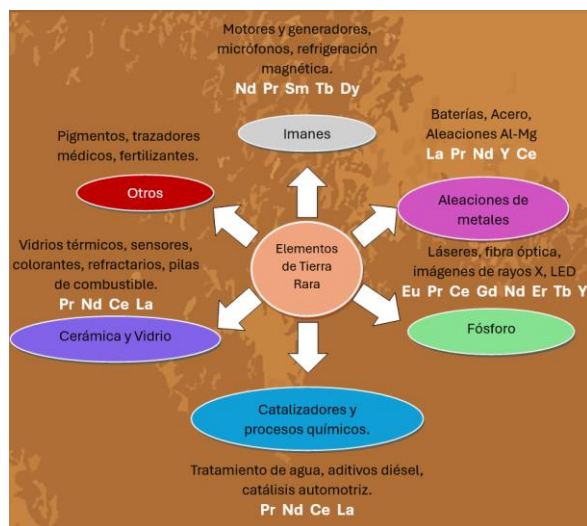


Figura 1. Usos de los elementos de las tierras raras [2].

1.1. Tierras Raras livianas y pesadas

Los Elementos de Tierras Raras generalmente se subdividen en Elementos de Tierras Raras Livianas (ETRL) y Elementos de Tierras Raras Pesadas (ETRP), aunque su definición puede variar de un autor a otro. Según [3], los ETRL se refieren a los lantánidos que tienen electrones desapareados que van desde 0 hasta 7 en el orbital 4f (desde La hasta Gd), mientras que los ETRP tienen electrones apareados en el orbital 4f (desde Tb hasta Lu). El itrio se incluye como ETRP debido a sus similitudes químicas, mientras que el escandio no se incluye en ninguna de las categorías debido a sus diferencias químicas con respecto a otros ETR, especialmente su pequeño radio iónico. En consecuencia, algunos pueden no considerar al escandio como un miembro válido del grupo de los ETR [4].

Tabla 1. Principales Clasificaciones de las Tierras Raras según peso atómico [5].

Liviano										Pesado										Otro
Liviano					Intermedio					Pesado										Pm
La	Ce	Pr	Nd	Sc	Sm	Eu	Gd	Yb	Lu	Ho	Tm	Er	Tb	Dy	Y					

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, Cochilco se basa en datos de Technology Metals Research que consideran Elementos de Tierras Raras Livianas (ETRL) desde La hasta Sc, siendo este último el último elemento en esta categoría según la referencia anterior. Además, incluye Elementos de

Tierras Raras Pesadas (ETRP) desde Yb hasta Y. En un rango intermedio de Elementos de Tierras Raras, están presentes los elementos Sm, Eu y Gd.

1.2. Aspectos generales en la estructura de los elementos de las tierras raras

El llenado y la extensión espacial de las capas externas de electrones (5d y 6s), que son más importantes en la formación de enlaces químicos, son esencialmente constantes en toda la serie de lantánidos. Lo que varía de un elemento a otro es el número de electrones en la capa interna f. Debido a que las electronegatividades de los átomos son casi idénticas, un compuesto que incorpora un lantánido puede fácilmente incorporar otro como sustituto [2]. De hecho, los lantánidos muestran una dependencia lineal, conocida como la contracción de lantánidos (ver figura 1a), de sus radios atómicos en el número atómico Z [6].



Figura 2. Contracción de Lantánidos [6].

Varias propiedades de los lantánidos siguen una tendencia general que es similar en principio a la contracción de lantánidos. Los lantánidos metálicos tienen una dureza Vickers, densidad y puntos de fusión crecientes con el aumento del número atómico. El europio y el iterbio son excepciones notables, ya que son divalentes en el estado metálico en lugar del estado trivalente más común. El cerio también es una excepción, ya que el cerio también puede ser tetravalente, pero el efecto en la dureza Vickers, la densidad y el punto de fusión no es tan pronunciado [7].

Las tierras raras no son descubiertas en la naturaleza como elementos puros, sino que se presentan como partes, ya sean pequeñas o grandes, de ciertos minerales. Los minerales bastnasita y monacita son principalmente ricos en ETRL, con una mayor concentración de ETRP en la monacita [8]. En contraste, la xenotima es la principal fuente de ETRP en el mundo y se encuentran como partes, ya sean menores o mayores, de ciertos minerales. Además, pueden hallarse como depósitos en arcillas iónicas adsorbentes [5] donde los componentes comúnmente presentes incluyen caolinita, halosita y mica, con una composición típica de aproximadamente un 70% de SiO₂, un 15% de Al₂O₃, un 3-5% de K₂O, un 2-3% de Fe₂O₃ y menos del 0.5% de CaO, MgO y otros elementos [9]. En Chile, estos minerales están asociados con yacimientos de óxidos de hierro-cobre-oro y magnetita-apatito, presentes en fases como

apatito, monacita, allanita, xenotima y fluorocarbonatos [5].

2. Usos de arcilla en mortero

En la siguiente sección, se aborda el tema de la arcilla como sustituto de cemento en lugar de los elementos de tierras raras, ya que hay una investigación limitada que explora el uso de los elementos de tierras raras como sustitutos del cemento.

El alto valor de los recursos de desechos de ladrillos de arcilla está llevando a muchos países a reutilizarlos en diversas aplicaciones de construcción [10]. Algunos estudios [11], [12] han determinado que el Polvo de Ladrillo de Arcilla (PLA) es un material puzolánico debido a que la forma semioval y la superficie semilisa del grano de PLA consisten en partículas morfológicamente irregulares, predominantemente cuarzo y feldespato, componentes esenciales para la actividad puzolánica.

Se ha informado que la incorporación de PLA como aditivo al cemento mejoró la resistencia a la compresión del mortero. La actividad puzolánica de este PLA puede contribuir a las mayores resistencias iniciales y finales observadas en los morteros que los contienen [13]. Además, la resistencia a la compresión del mortero aumenta tanto con la edad como con la finura del PLA. Partículas de PLA más finas resultan en una microestructura más densa de la matriz de pasta y, consecuentemente, conducen a mayores resistencias a la compresión en las pastas. [14], [15].

Autores como Turanli et al. [16] mostraron que la adición de PLA para reemplazar parcialmente el cemento es una forma efectiva de suprimir la reacción álcali-sílice. Del mismo modo, Liu et al. [17] exploraron el potencial de utilizar hormigón viejo molido y ladrillos de arcilla molidos como suplementos puzolánicos para el cemento. Kirgiz [18] incluso intentó utilizar polvo de mármol ultrafino y de ladrillo de arcilla para fabricar cemento. Sin embargo, Ge et al. [19] encontraron que agregar ladrillos de arcilla molidos como reemplazo de cemento reducía sustancialmente la resistencia del mortero/hormigón producido, especialmente cuando el contenido de ladrillos de arcilla molidos es relativamente alto. Por lo tanto, hay un cierto límite en la cantidad permitida de residuos de ladrillos de arcilla que se puede agregar como reemplazo de cemento. Ge et al. [20] utilizaron ladrillos de arcilla triturados como agregado fino para producir mortero que contenía tereftalato de polietileno reciclado y estudiaron su resistencia, durabilidad y microestructura. Boukour y Benmalek [21] agregaron residuos de caucho y ladrillos de arcilla para reemplazar parcialmente la arena natural en el mortero y encontraron que la reducción de resistencia causada por la adición de residuos de caucho podría compensarse con la adición de residuos

de ladrillos de arcilla. Uddin et al. [22] utilizaron ladrillos de arcilla triturados como agregado grueso e investigaron los efectos del tamaño máximo de dicho agregado sobre las propiedades mecánicas del hormigón.

Ortega et al. [12] reveló que la actividad puzolánica tuvo un impacto más significativo en los morteros con un 10% de PLA en comparación con aquellos con un 20% de adición. Esta diferencia puede atribuirse a que los primeros contienen más clínker; por lo tanto, se esperaba que se formara una mayor cantidad de portlandita en las muestras con un 10% de PLA en comparación con las que tenían un 20%. Mientras tanto, según el estudio de Liu et al. [23] comentan que el índice de sustitución indicado por el cambio de intensidad no debe exceder el 15%. Además, la sustitución de altas proporciones de PLA disminuirá significativamente la resistencia a la compresión del mortero.

Aunque la sustitución de PLA en el mortero condujo a una reducción en la resistencia a la compresión, estudios realizados por Ortega et al. [12] demostraron que la incorporación de PLA no comprometió la resistencia a la compresión de los morteros, cumpliendo con los requisitos de las normas relevantes. Esto ilustra el impacto ventajoso de la actividad puzolánica y el efecto de llenado del PLA en el rendimiento del mortero. La resistencia a la compresión de todos los morteros investigados aumentó con el tiempo de curado, con los especímenes con un 10% de polvo de ladrillo exhibiendo valores ligeramente más altos que las muestras con un cemento Portland ordinario comercial a los 400 días. Además, durante el período de 400 días, los morteros con PLA mostraron una resistencia a la flexión ligeramente mayor en comparación con aquellos con muestras con un cemento Portland ordinario comercial. Similarmente, Boukour y Benmalek [21] encontraron que los rellenos de PLA resultaron solo en una reducción marginal en la resistencia a la flexión y a la compresión en varios niveles (2.5%, 5.0%, 7.5% y 10%) de uso. La rigidez de la fracción de arena natural reemplazada podría haber compensado la actividad puzolánica ofrecida por la fracción fina del relleno de PLA. Además, Toledo Filho et al. [14] observó que la adición de PLA tuvo un impacto mínimo en la resistencia a la compresión y el módulo elástico hasta una razón de reemplazo de cemento del 20%. Sin embargo, con ratios altos de agua a cemento, la resistencia y el módulo elástico del mortero disminuyeron con el aumento del contenido de PLA.

1.2. Caolinita en la construcción

La utilización de la caolinita en la industria de la construcción es bastante versátil. Este material puede

servir como componente principal para ladrillos, baldosas cerámicas, aparatos sanitarios, pellets y baldosas de porcelana, o con fines medicinales y estéticos. Además, se emplea como aditivo mineral en formulaciones de mortero. [24]

El principal problema de usar arcilla en materiales a base de cemento, como los morteros, es que su estructura química y mineralógica inestable, combinada con la alta actividad superficial de las partículas de arcilla en presencia de agua, a menudo conduce a problemas patológicos.

La utilización de materiales cementicios en la producción de cementos ecoeficientes se centra en los residuos industriales. Los estudios de investigación sobre minerales de arcilla, como la caolinita, están siendo monitoreados de cerca tanto por la comunidad científica como por la industria del cemento. [25], [26], [27]. Es bien sabido que estos minerales requieren un proceso de activación para convertir la caolinita en metacaolinita, que califica como una sustancia altamente puzolánica según las regulaciones de la Comunidad Europea. [28].

En general, la arcilla quemada puede no mostrar propiedades puzolánicas. La arcilla comprende una cantidad significativa de cuarzo y feldespato, que son minerales cristalinos y no generan compuestos activos. En consecuencia, la arcilla no puede clasificarse como una puzolana. Sin embargo, cuando la arcilla se somete a temperaturas que van de 600 a 1000°C, la estructura cristalina del silicato se transforma con frecuencia en un compuesto amorfo, capaz de reaccionar con la cal a temperaturas ambiente [29]. La evaluación de la actividad puzolánica generalmente se basa en un índice de actividad de resistencia delineado en ASTM C618, que estipula que la cantidad combinada de óxidos de silicio, hierro y aluminio debe ser al menos del 70% para que los materiales sean considerados puzolanas. [30]. Numerosos estudios han demostrado que los óxidos presentes en el Polvo de Ladrillo de Arcilla (PLA) superan este umbral y muestran una significativa actividad puzolánica [13], [21], [31], [32].

1.3. RRE Chile y procesamiento

La creciente importancia de los ETR como recursos industriales y tecnológicos ha acelerado el aumento en la minería mundial de tierras raras. [33], [34]. La minería a menudo se asocia con un mayor riesgo de que haya un exceso de ETR que entre en varios medios ambientales, especialmente en sistemas de suelo. [35].

Chile reconoce un interesante potencial geológico para las tierras raras, concentrado en la Cordillera de la Costa tanto en el norte (Región III) como en el sur (Región VII), que debería ser explorado más a fondo. El Proyecto Minero El Cabrito, ubicado en la comuna

de Penco, Cordillera de la Costa, Región VIII, es la iniciativa de ETR más avanzada en Chile, correspondiendo a un depósito de arcillas adsorbentes que también cuenta con una planta piloto de procesamiento [5]. El Proyecto es una iniciativa única, no solo en la región y el país, sino que también tiene como objetivo convertirse en el primer actor en Chile en desarrollar el mercado de tierras raras, a través de un proceso de innovación diseñado específicamente para la explotación de lantánidos, el cual ha sido desarrollado en colaboración con universidades, investigadores y especialistas de la Región del Biobío, teniendo como enfoque principal del proceso el respeto por el medio ambiente y la comunidad, optimizando el uso del agua y aditivos necesarios para su operación.



Figura 3. Ubicación de proyecto minero El Cabrito, Penco, Chile [36].

La implementación de proyectos de tierras raras en Chile representa oportunidades para el país, como la diversificación de la minería al expandir el portafolio de productos, y también permite el desarrollo de proyectos mineros en regiones que tradicionalmente no están enfocadas en la minería. Además, este tipo de proyectos son importantes para promover la minería a escala media. Entre los desafíos que enfrentan los inversionistas en proyectos de tierras raras en Chile, se identifican los requisitos ambientales actuales, la inversión necesaria, el bajo grado de los depósitos en comparación con los explotados en China, y la experiencia limitada de profesionales en geología, extracción y procesamiento de tierras raras. Esto se agrava por el hecho de que las tierras raras están experimentando actualmente una baja en los precios, afectadas de manera similar a la mayoría de las materias primas [5].

El procesamiento de tierras raras es significativamente más complejo que los procesos mejor conocidos en Chile para el cobre, donde pocos minerales concentran todo el mineral (por ejemplo, la calcopirita), y solo estos minerales necesitan ser

separados para obtener un concentrado y, en última instancia, el metal a partir de él. En el caso de las tierras raras, los depósitos pueden contener varios minerales con elementos de este grupo, y, a su vez, los minerales en los concentrados pueden contener múltiples elementos de interés. Estos elementos deben ser separados individualmente a través de cientos de procesos químicos.

Aún no existen estudios que estimen el potencial en Chile para explotar estos elementos, sin embargo, se tienen antecedentes de la presencia de estos en concentraciones anómalas que es necesario analizar. Es por eso que en este estudio se utiliza una cantidad de tierras raras de un depósito provenientes de Penco, Región del Biobío Chile, para reemplazarlas como sustituto en porcentajes desde el 5 al 50% con respecto al cemento, usando áridos finos y gruesos, buscando un uso más estructural al material Si tiene éxito en la sustitución, demostraría el potencial para transformar la caolinita en metacaolinita y utilizarla como reemplazo de cemento en mortero.

3. Materiales

Los materiales utilizados en este estudio son cemento, agregados finos y gruesos, y arcillas de tierras raras. La Figura 4 muestra la distribución del tamaño de las partículas de las arcillas de tierras raras, cemento, y de los agregados finos y gruesos utilizados. Como se puede observar, la distribución del tamaño de las partículas de las arcillas de tierras raras entra en un rango similar al de agregado fino.

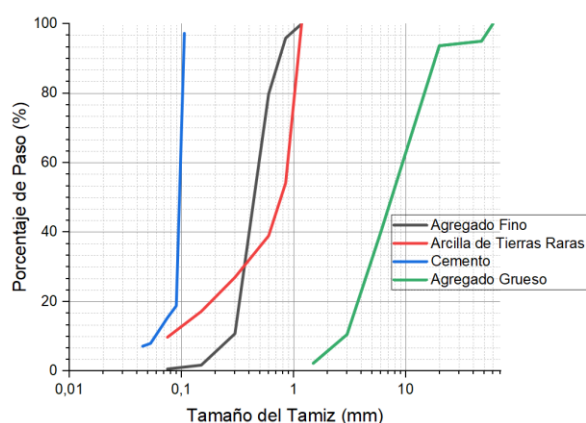


Figura 4. Distribución granulométrica de los materiales. Fuente: elaboración propia.

3.1. Cemento

Se utilizó un cemento de clase puzolánica basado en su composición y resistencia [37]. Los resultados de un análisis de espectroscopía de energía dispersiva (EDS) proporcionan información sobre la composición elemental del cemento. En general, los hallazgos de EDS para el cemento revelan la

presencia abundante de calcio, silicio, aluminio y hierro en forma de óxidos, los cuales son responsables de proporcionar características de resistencia y unión al cemento a partir de las reacciones de hidratación y los procesos durante el fraguado. La Figura 5 muestra las morfologías del cemento observadas con un microscopio electrónico de barrido (SEM) a escalas de 250 y 5 μm , donde se puede ver que está compuesto de partículas con un amplio rango de tamaños y con morfologías irregulares, aunque con pequeñas partículas esféricas de puzolana.

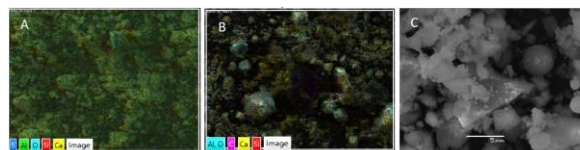


Figura 5. SEM del cemento puzolánico (A, B: Escala de 250 μm (Mapping), y C: Escala de 5 μm)

La Figura 6 muestra la concentración ponderada de elementos en el cemento puzolánico. Los resultados del EDS especifican principalmente la composición química de los materiales presentes en el cemento puzolánico. El oxígeno (O) fue el elemento más abundante, representando el 54.46% del peso total, seguido por el calcio (Ca) con un 10.51%, respectivamente. La sílice y la alúmina, también abundantes, tienen en general un impacto positivo en el cemento debido a sus potenciales propiedades puzolánicas y semi-cementicias. Dependiendo de la ubicación de la dispersión de alto contenido, las propiedades químicas y mecánicas del mortero se fortalecerán, indicando claramente una buena formación de C-S-H en la mezcla. Esto influye directamente en el aumento de la actividad puzolánica durante el proceso de hidratación.

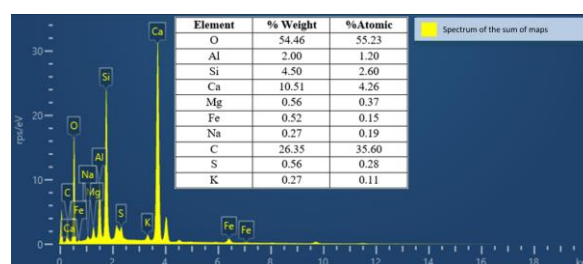


Figura 6. EDS del cemento puzolánico.

La Tabla 1 muestra las fases minerales presentes en el cemento utilizado, determinadas a partir del análisis de difracción de rayos X. En orden de abundancia, aparecen Hatrurita, Cuarzo, Plagioclasa y Akermanita. Tanto la Hatrurita (Ca_3SiO_5) como la Akermanita ($\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$) confieren propiedades cementicias al material. Esta mineralogía es consistente con el calcio abundante observado a través del análisis EDS, así

como con el resto de los elementos determinados. El solapamiento de los picos de difracción de los componentes principales en el rango de $2\theta = 3^\circ$ a 70° también se puede observar en la Figura 4.

Tabla 1. Resultados de la Semi- Cuantificación del del cemento.

Muestra	Mineralogía Semi- Cuantitativa (%)			
	Plagioclasa	Cuarzo	Hatrurita	Akermanita
Cemento (%)	10.2	14.5	68.7	6.6

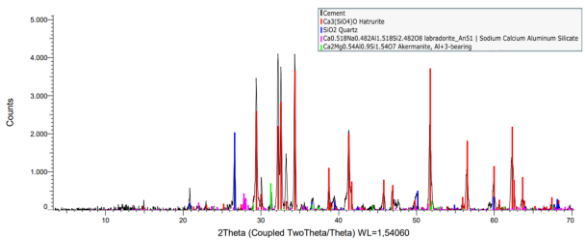


Figura 7. Difracción de rayos x del cemento

3.2. Agregado fino y grueso

Los agregados finos y gruesos tienen una densidad de 2.76 y 2.77 g/cm³ respectivamente, valores obtenidos utilizando picnometría [38]. La Figura 8 muestra la concentración ponderada de elementos en los agregados. Los resultados de SEM/EDS especifican principalmente la composición química de los materiales, siendo el oxígeno (O) el elemento más abundante, representando más del 70% del peso total, seguido por el silicio (Si) con aproximadamente el 10% y el aluminio (Al) con aproximadamente el 6%. Además, hay una alta presencia de otros elementos como Ca y Fe y silicio, además del contenido orgánico de la muestra.

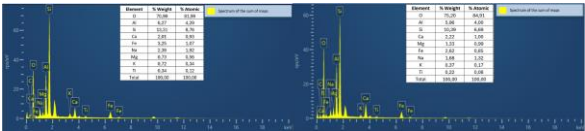


Figura 8. EDS de agregado fino (izq.) y el agregado grueso (derecha).

Además, la muestra las morfologías SEM de los agregados gruesos y finos a escalas entre 500 μm y 5 μm . Se puede observar la morfología irregular de la superficie de los granos y su angularidad, así como la gradación en el tamaño de sus partículas. Los agregados finos (A) tienen un coeficiente de uniformidad más alto que los agregados gruesos

(D). Según la escala de redondez de Powers [39], las partículas son subredondeadas y con baja esfericidad. Estas características, junto con la composición mineralógica mencionada anteriormente, apuntan a un origen volcánico de la roca fuente de ambos tipos de agregados, los cuales han sido fragmentados, transportados y acumulados naturalmente por corrientes de agua.

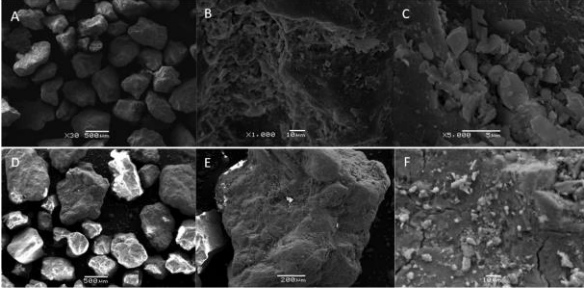


Figura 9. SEM del agregado fino y grueso (Fino - A,B,C: Escala de 500 μm , 10 μm , 5 μm respectivamente. Grueso - D, E, F: Escala de 500 μm , 200 μm y 10 μm respectivamente.)

La muestra cinco tipos de componentes de la composición: Piroxeno, Cuarzo, Plagioclasa y Olivino. El solapamiento de los picos de difracción de los componentes principales en el rango de $2\theta = 3^\circ$ a 70° también se puede observar en la

Tabla 3. Resultados de la Semi- Cuantificación del agregado fino y grueso.

Muestra	Mineralogía Semi- Cuantitativa (%)				
	Plagioclasa	Cuarzo	Piroxeno	Olivino	Garnetita
Agregado Fino (%)	64.9	11.8	13.0	8.5	1.7
Agregado Grueso (%)	64.9	11.8	13.1	8.5	1.7

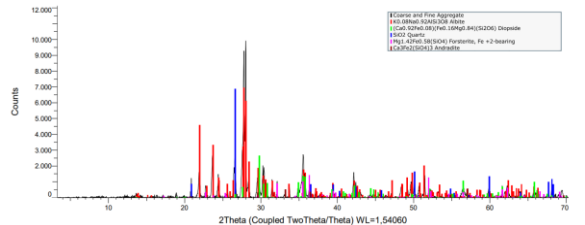


Figura 10. Difracción de rayos x del agregado fino y grueso.

3.3. Arcilla de Tierras Raras

Como se mencionó anteriormente, las arcillas iónicas con elementos de tierras raras provienen de Penco, región del Biobío. Cuando se encuentran en arcillas, las tierras raras de Penco pueden procesarse de manera sencilla; no requieren trituración, molienda ni el uso de explosivos para reducir el tamaño del material de procesamiento. Estas arcillas tienen una densidad de 2.86 g/cm^3 obtenida mediante picnometría, una metodología extraída de ASTM D854-02 [38].

La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestra la morfología de las arcillas, donde al igual que en el caso de los áridos, muestra una morfología irregular de la superficie de los granos y su angularidad, así como la gradación en el tamaño de sus partículas.

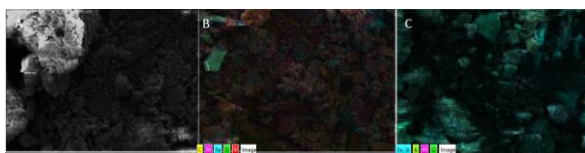


Figura 11. SEM de la arcilla de tierras raras. B- C; Mapping.

La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestra la concentración ponderada de los elementos de las arcillas, destacando al oxígeno (O) como el elemento más abundante, seguido por el silicio y el aluminio. El carbono no se considera en este análisis, ya que la muestra se recubre con este elemento para la realización del ensayo, lo que lo excluye de la composición de la muestra. Además, se identifican otros elementos como el manganeso (Mn) y el titanio (Ti).

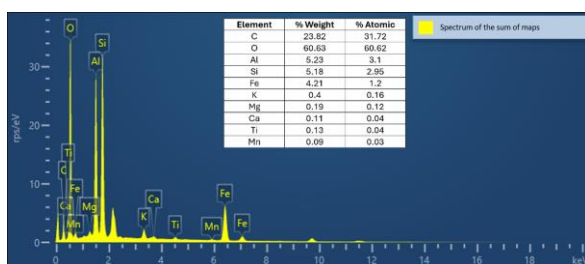


Figura 12. EDS de las arcillas de tierras raras.

Dado que en el análisis EDS no se registraron los Lantánidos, se optó por realizar un análisis ICP-OES. La Espectroscopia de Emisión Óptica con Plasma Acoplado Inductivamente (ICP-OES) es una técnica de análisis multi-elemental capaz de identificar y cuantificar la mayoría de los elementos de la tabla periódica, excluyendo C, N, O, H, F, gases nobles, algunas tierras raras y otros elementos poco frecuentes. Puede realizar estas determinaciones en concentraciones que van desde porcentajes hasta partes por mil millones ($\mu\text{g/L}$) [40]. Para este análisis, es necesario primero obtener una muestra húmeda de

carbonatos de tierras raras. La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestra un esquema general del proceso para obtener una muestra húmeda de carbonato de tierras raras, donde el verde indica el insumo, el azul el líquido y el naranja el sólido.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se observan algunos de los procedimientos que se hicieron para obtener la una muestra de carbonatos de tierras raras en húmedo mediante un proceso de extracción predefinido, donde uno de los pasos es formar la solución de sulfato de amonio y regular a pH 2,95 – 3,00 agregando ácido sulfúrico concentrado.



Figura 13. Esquema general para obtención de carbonato húmedo de tierras raras.



Figura 14. Procedimientos para la obtención de carbonatos de tierra rara.

Se observa en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** el resultado que se obtuvo a partir del ipc, donde la cantidad de elementos es mayor en las tierras raras con tamaño sobre las 300 μm y bajo las 600 μm en comparación con las tierras raras sin tamizar.

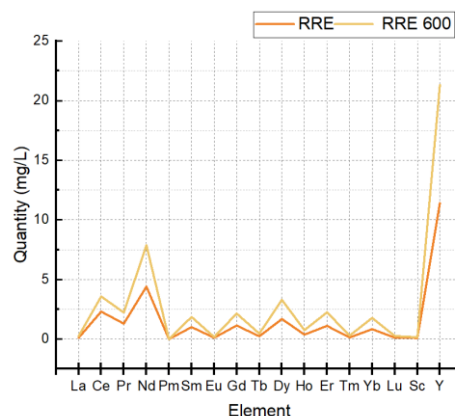


Figura 15. Cantidad de lantánidos en las arcillas.

La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestra cuatro tipos de componentes de composición: Cuarzo, Mica, Clorita, Alófono y Caolinita. La superposición de picos de difracción de los componentes principales en el rango de $2\theta = 3^\circ$ a 70° .

Tabla 4. Resultados de la Semi- Cuantificación de las arcillas de tierras raras.

Muestra	Mineralogía Semi- Cuantitativa (%)				
	Cuarzo	Mica	Clorita	Alófono	Caolinita
Arcilla de tierras raras (%)	73.9	11.4	3.5	9.7	1.5

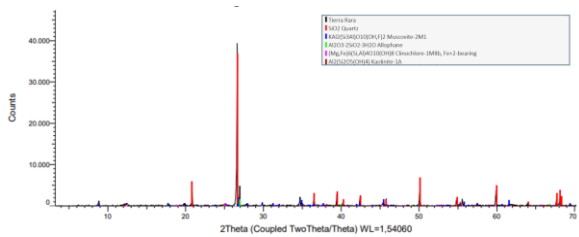


Figura 16. Difracción de rayos x de las arcillas de tierras raras.

4. Muestras

Se utilizaron moldes de acero para la colocación de muestras de mortero. Estos moldes tienen dimensiones de $50 \times 50 \times 50 \text{ mm}^3$ para cubos, $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ para prismas (Figura 17). Se prepararon un total de 288 muestras de mortero (incluido el control) con diferentes dosificaciones correspondientes al reemplazo del 5% (RC5TR) al 50% (RC50TR) del cemento con arcillas de tierras raras con árido fino, y la misma dosificación para árido grueso.

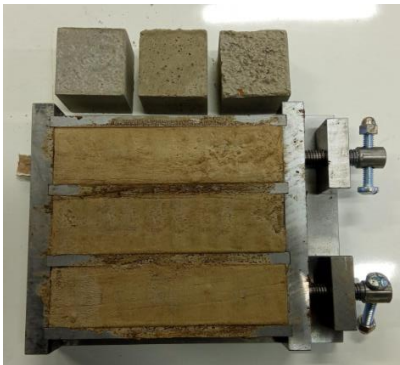


Figura 17. Muestras cúbicas y prismáticas.

5. Ensayo de fluidez

El proceso de mezclado utilizado sigue el procedimiento descrito en la norma NCh 158, sección 6.3 [41]. Comienza con una mezcladora en la posición de inicio, vertiendo agua en un recipiente y agregando continuamente cemento. Una vez que la mezcla está preparada, se llevó a cabo el ensayo de fluidez, siguiendo la norma ASTM C1437 [42]. Comienza introduciendo una capa de aproximadamente 25 mm de la mezcla en el cono y compactándola con 20 golpes. Los resultados obtenidos se analizan utilizando la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

Tabla 5. Dosificaciones para las distintas muestras con agregados finos y gruesos.

Muestra	Cemento	Arcilla de tierra rara	Agua	A/C	Arena
Patrón	990	0	602	0.85	2400
RC05TR	940.5	49.5			
RC10TR	891	99			
RC15TR	841.5	148.5			
RC20TR	792	198			
RC25TR	742.5	247.5			
RC30TR	693	297			
RC35TR	643.5	346.5			
RC40TR	594	396			
RC45TR	544.5	445.5			
RC50TR	495	495			

Tabla 6. Consistencia de los morteros.

% Flujo	0 – 20%	20 – 60%	60 – 100%	100 – 120%	120 – 150%
Consistencia	Seco	Rígido	Plástico	Húmedo	Aguado



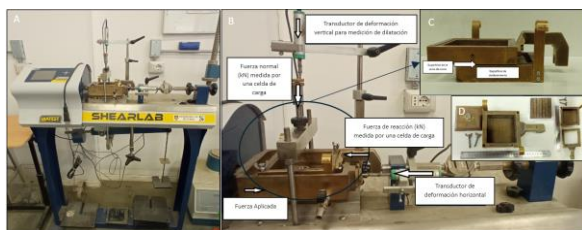
Figura 18. Equipo utilizado para el ensayo.

Después de completar la prueba de fluidez, la mezcla se vierte en moldes de acero. Luego de fraguar durante 24 horas, las muestras se desmoldan y se curan durante 7 y 28 días para cubos y prismas. Después del período de curado, las muestras se secan a una temperatura de 110°C durante 24 horas [43]. Una vez completado el secado, las muestras se enfrían a temperatura ambiente para realizar las pruebas mecánicas.

6. Ensayo de corte

La muestra de arcilla de tierra rara se somete a un ensayo llamado ensayo de corte, donde la muestra se coloca en un aparato conocido como caja de corte (¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.A), que consta de dos placas metálicas, dos tornillos, un disco de sujeción (base debajo de la caja) y una tapa de carga donde se aplica el esfuerzo normal (¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.D). La caja de corte, que puede ser de forma circular o cuadrada, restringe la deformación horizontal de la muestra, pero permite el corte en un plano horizontal donde se encuentran las dos placas metálicas.

Inicialmente, se aplica una presión normal directa en la parte superior de la muestra mediante un peso de palanca o mediante un sistema neumático. Esta fase se conoce como la etapa de consolidación y avanza de manera incremental, de manera similar a una prueba de consolidación típica. En esta etapa, las placas metálicas se atornillan juntas. Antes de que comience la etapa de corte, se levanta ligeramente una placa metálica para garantizar la separación de las dos mitades del aparato y asegurar que la carga normal y de corte se transmitan solo a través de la muestra. Después, se aplica un esfuerzo cortante a lo largo del plano horizontal predefinido hasta que la muestra falle (¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.C,D). El dispositivo de corte aplica una velocidad de desplazamiento constante con una tolerancia del 5% de precisión. Esta velocidad depende de las características del suelo y debe ser relativamente pequeña para evitar la acumulación de presión en los poros, proporcionando así un drenaje suficiente.



7. Resultados y discusión

7.1. Ensayo de fluidez

La ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. muestra la prueba de fluidez de diferentes muestras y la ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. muestra su clasificación de trabajabilidad. De todas las muestras, solo las

muestras desde RC30 a RC50 para agregado fino entraron en el rango de trabajabilidad húmeda y plástica, definido en la ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia., lo cual es útil para el posible uso de concreto lanzado, ayudando a prevenir una posible segregación en caso de estar demasiado seco o húmedo. Todas las muestras de agregado grueso se mantuvieron en una trabajabilidad aguada (¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.).

La trabajabilidad, definida como la facilidad de transporte, colocación, compactación y acabado de la mezcla, es una propiedad importante de las mezclas frescas de mortero o concreto [44]. Las propiedades físicas de las arcillas tienen un impacto significativo en este parámetro [45]. Dado que la plasticidad y la cohesión son difíciles de medir, la consistencia se utiliza frecuentemente como una medida de la trabajabilidad [46].

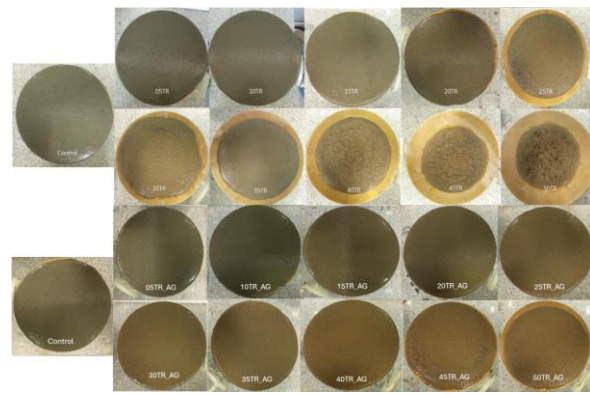


Figura 20. Fluidez de las muestras (AG indica agregado grueso)

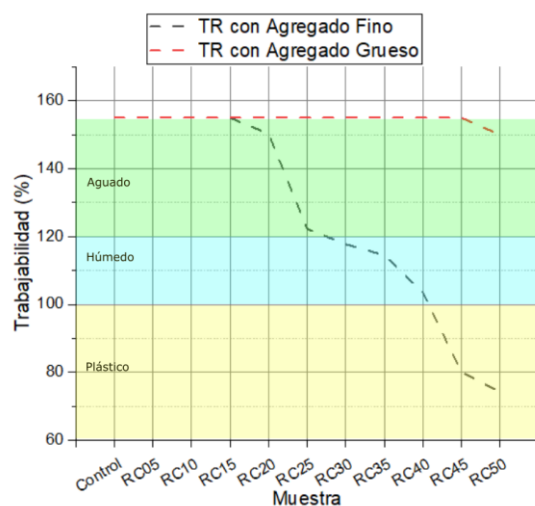


Figura 21. Rangos de trabajabilidad.

Analizando la trabajabilidad de los morteros con dosificaciones de agregados finos (¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.), se puede ver

que las mezclas pierden fluidez a medida que aumenta el porcentaje de arcilla de tierras raras. Parthasarathi et al. [47] en un estudio en el que utilizaron relaves de minas de oro para hacer un mortero, determinaron que la trabajabilidad de la mezcla disminuye cuanto mayor es el porcentaje de relaves utilizado, lo cual se puede atribuir a la presencia de partículas muy finas en los relaves, y en este caso de las arcillas de tierras raras.

Comparando los resultados de las muestras preparadas con agregados finos y gruesos, se puede ver que las finas se comportan de manera más viscosa. Considerando que las proporciones de cemento, agua, agregados y tierras raras son iguales, esto solo puede deberse a la fricción que se genera entre las partículas de agregado en la mezcla, que debería ser mayor en las finas. Los agregados finos tienen una mayor superficie específica que los agregados gruesos, por lo que, para la misma proporción en la mezcla, las partículas más grandes tendrán menos puntos de contacto entre sí, reduciendo así la fricción. Esta menor fricción entre agregados gruesos se traduce en una menor viscosidad del mortero. Otros estudios también identifican una menor trabajabilidad del mortero cuando tiene agregados finos en comparación con los gruesos [46].

7.2. Ensayo de corte

La resistencia máxima incluye tanto la fricción como la cohesión interna del material. Antes del corte, las partículas del suelo o material están en su disposición más estructurada, proporcionando la máxima resistencia. Después del corte, el material ha experimentado una redistribución interna, y la estructura inicial ha sido alterada. La resistencia residual es menor porque el material ha perdido parte de su cohesión inicial y la disposición de las partículas ya no proporciona la misma resistencia.

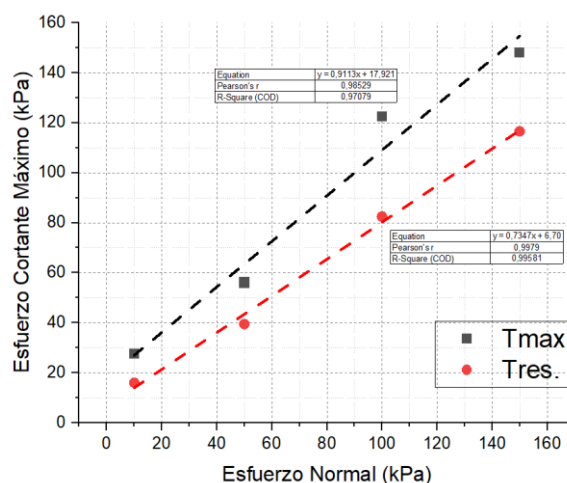


Figura 22. Resultado del ensayo de corte.

Tabla 7. Valores para c y f.

Parámetros	Valores Máximos	Valores Residuales
c (kPa)	17,921	6,707
f (°)	42,342	36,306

Estos resultados son cruciales para el diseño de cimentaciones, taludes y otras estructuras geotécnicas, ya que permiten predecir la capacidad de carga y la estabilidad del suelo o material en diferentes condiciones de esfuerzo.

7.3. Resistencia a la compresión

La figura muestra los resultados de compresión a 7 y 28 días de curado para las muestras control, RC05TR a RC50TR, con agregados finos y gruesos. El valor más alto corresponde a la muestra RC05TR, seguida por RC15TR, ambas con agregado fino y siendo las únicas que superan a la muestra control. En el resto de las muestras, al aumentar el reemplazo de cemento por tierra rara, la resistencia disminuye.

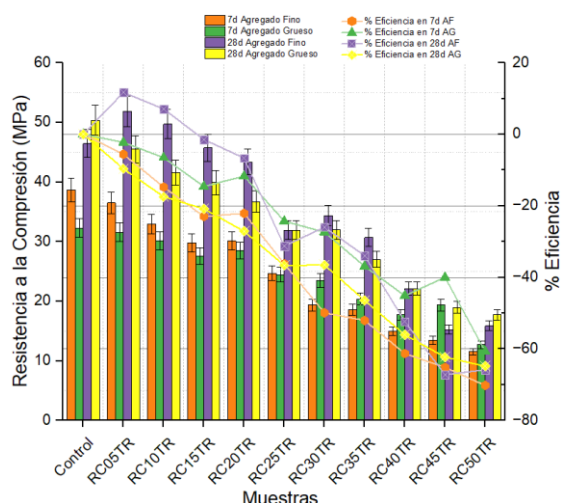


Figura 23. Resultados resistencia a la compresión.

Los resultados de resistencia a la compresión de todas las muestras se muestran graficados en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, donde 7d y 28d corresponden a los 7 y 28 días de curado respectivamente. El porcentaje de eficiencia representa cuánto mejora la resistencia en comparación con la muestra control, en porcentaje. El control superó a todos los morteros con reemplazo de tierras raras durante la primera semana de hidratación, por lo que el reemplazo utilizado no puede compensar la pérdida de cemento en esta etapa. Sin embargo, se observan mejores resultados en la evolución de la acción puzolánica posteriormente. Cuando la sustitución de cemento por tierras raras es del 5% utilizando agregado fino, la resistencia del mortero fue mayor que la del control, seguida por la muestra del 10%, mientras que la muestra del 15% no mostró mejoría significativa.

Es posible que una pequeña dosis de arcilla de tierra rara aproveche completamente la sílice amorfa disponible de la arcilla para formar compuestos cementicios adicionales, predominando el C-S-H puzolánico. Se ha observado [48], [49] que en presencia de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, la solubilidad de SiO_2 aumenta notablemente, lo que indica que a medida que avanza la hidratación, mayores cantidades de sílice soluble se liberan de las partículas de arcilla reaccionadas en la matriz [50]. Esto explica las pocas mejoras en las resistencias de arcilla observadas en edades posteriores.

Si se tiene un porcentaje de mejora en la resistencia a la compresión utilizando las arcillas de tierras raras sin tratar, debería ser aun mejor la resistencia si la arcilla de rara se calcinara. En la literatura se comenta que la arcilla de montmorillonita calcinada (Söğüt) mostró buena reactividad puzolánica en todas las temperaturas de calcinación utilizadas, las cuales fueron 600, 700 y 800 °C. [51]. A los 7 días, casi

todos los valores de resistencia a la compresión seguían siendo más bajos que los valores de resistencia a la compresión del mortero de referencia, excepto para el nivel de reemplazo de cemento del 10% que logró resultados comparables al mortero de referencia. Sin embargo, los resultados indicaron que la reactividad puzolánica se volvió más significativa que a los tres días, lo cual se puede observar por la evolución de la resistencia a diferentes temperaturas de calcinación y niveles de reemplazo. Según Alujas et al. [52], el efecto de relleno de la arcilla calcinada es la principal contribución al proceso de hidratación en las primeras edades. Los mejores resultados de cemento mezclado fueron para los morteros reemplazados en un 10% a todas las temperaturas. Trümer et al. [53] investigaron el efecto de reemplazar el 30% del cemento con bentonita calcinada (que contiene un 90% de montmorillonita) en las propiedades de resistencia de los morteros en diferentes edades de prueba. Encontraron que la arcilla calcinada actuaba como un relleno inerte durante los primeros dos días. En cambio, se observó una notable reacción puzolánica a los 7 días y en adelante después de que cierta cantidad se disolviera en la solución alcalina de los poros del mortero de cemento. Por otro lado, se informaron hallazgos opuestos a este estudio de Danner et al. en [54], donde encontraron que aumentar la temperatura de calcinación a 800 °C mejoraba la reactividad puzolánica de la arcilla de montmorillonita, logrando alrededor de un 20% más de resistencia que la muestra de referencia, mientras que aumentar la temperatura de calcinación disminuía la reactividad de la arcilla.

7.4. Resistencia a la flexión

La figura muestra los resultados de flexión, donde las muestras corresponden a 7 y 28 días de curado, exhibiendo un comportamiento similar a la prueba de compresión, en el cual al 10% de reemplazo recae la resistencia, y luego aumenta en la mayoría de las muestras, pero no superan al control.

La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestra los resultados del ensayo de flexión a los 7 y 28 días de curado para las muestras con agregado fino y grueso. En general, la resistencia a la flexión del mortero de control es mayor que la de los morteros que contienen arcilla de tierra rara, a excepción de la muestra RC05TR, lo que indica que la sustitución del 5% del cemento con arcilla de tierra rara aumenta la resistencia a la flexión del mortero con agregado fino. Naceri y Hamina [55] también encontraron que la resistencia a la flexión del mortero curado disminuye con el aumento del contenido de ladrillos de arcilla a los 7 y 28 días, pero a diferencia de este estudio encontró que para morteros que

contienen hasta un 10% de residuos de ladrillos, la resistencia a la flexión a los 90 días puede alcanzar un valor comparable al de un mortero de control a debido a la variación en el contenido de SiO₂ y Al₂O₃.

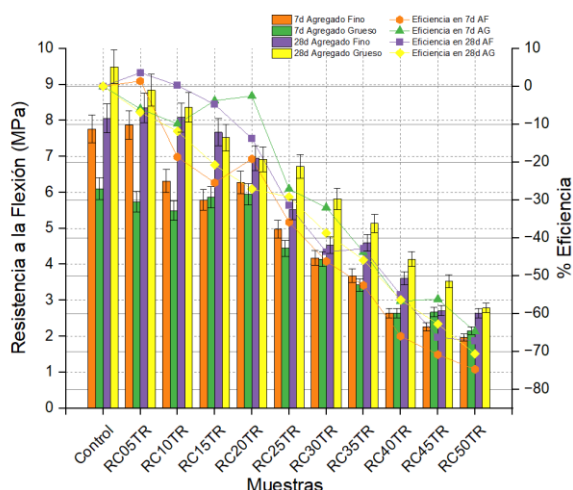


Figura 24. Resultado resistencia a la flexión.

8. Conclusiones

Este estudio se logró exitosamente sustituir el cemento por arcillas de tierras raras. Se realizó un análisis experimental considerando reemplazar entre el 5% y el 50% del peso total de las muestras. Los ensayos mecánicos de compresión y flexión mostraron una mejoría significativa de hasta un 10% de reemplazo, lo que sugiere que las arcillas tienen un gran potencial como sustituto del cemento. A futuro, se plantea un proceso de calcinación para mejorar aún más la resistencia de estas mezclas.

9. Referencias

[1] C. K. Gupta and N. (Nagaiyar) Krishnamurthy, *Extractive metallurgy of rare earths*. CRC Press, 2005.

[2] V. Balaram, "Rare earth elements: A review of applications, occurrence, exploration, analysis, recycling, and environmental impact," *Geoscience Frontiers*, vol. 10, no. 4, pp. 1285–1303, Jul. 2019, doi: 10.1016/j.gsf.2018.12.005.

[3] Universidad de la Rioja, "Nomenclatura química y normas de la IUPAC en español," 2022.

[4] R. Ganguli and D. Cook, "Rare earths: A review of the landscape," *MRS Energy & Sustainability*, vol. 5, Jun. 2018, doi: 10.1557/mre.2018.7.

[5] Cochilco. Ministerio de Minería., "Situación actual del mercado de tierras raras y su potencial en Chile," 2016. [Online]. Available:

<https://www.cochilco.cl/Listado%20Temtico/Tierras%20Raras%20final.pdf>

[6] S. A. Cotton, *Lanthanide and Actinide Chemistry*, Editorial Board. 2006.

[7] P. Kim, A. Anderko, A. Navrotsky, and R. E. Riman, "Trends in structure and thermodynamic properties of normal rare earth carbonates and rare earth hydroxycarbonates," *Minerals*, vol. 8, no. 3. MDPI AG, Mar. 07, 2018, doi: 10.3390/min8030106.

[8] Y. Kanazawa and M. Kamitani, "Rare earth minerals and resources in the world," in *Journal of Alloys and Compounds*, Feb. 2006, pp. 1339–1343, doi: 10.1016/j.jallcom.2005.04.033.

[9] V. G. Papangelakis and G. Moldoveanu, "RECOVERY OF RARE EARTH ELEMENTS FROM CLAY MINERALS."

[10] L. Zhu and Z. Zhu, "Reuse of Clay Brick Waste in Mortar and Concrete," *Advances in Materials Science and Engineering*, vol. 2020. Hindawi Limited, 2020, doi: 10.1155/2020/6326178.

[11] V. Letelier, J. M. Ortega, P. Muñoz, E. Tarela, and G. Moriconi, "Influence of Waste brick powder in the mechanical properties of recycled aggregate concrete," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 10, no. 4, Mar. 2018, doi: 10.3390/su10041037.

[12] J. Ortega, V. Letelier G., C. Solas, G. Moriconi, M. Climent, and I. Sánchez, "Long-term effects of waste brick powder addition in the microstructure and service properties of mortars," *Constr Build Mater*, vol. 182, pp. 691–702, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.06.161.

[13] M. S. Kirgiz, "Strength gain mechanisms of blended-cements containing marble powder and brick powder," *KSCE Journal of Civil Engineering*, vol. 19, no. 1, pp. 165–172, Jan. 2015, doi: 10.1007/s12205-014-0557-4.

[14] R. D. Toledo Filho, J. P. Gonçalves, B. B. Americano, and E. M. R. Fairbairn, "Potential for use of crushed waste calcined-clay brick as a supplementary cementitious material in Brazil," *Cem Concr Res*, vol. 37, no. 9, pp. 1357–1365, Sep. 2007, doi: 10.1016/j.cemconres.2007.06.005.

[15] M. O'Farrell, S. Wild, and B. B. Sabir, "Pore size distribution and compressive strength of waste clay brick mortar," *Cem Concr Compos*, vol. 23, no. 1, pp. 81–91, 2001, doi: [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(00\)00070-6](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00070-6).

[16] L. Turanli, F. Bektas, and P. J. M. Monteiro, "Use of ground clay brick as a pozzolanic material to reduce the alkali-silica reaction," *Cem Concr Res*, vol. 33, no. 10, pp. 1539–1542, 2003.

[17] Qiong Liu, Teng Tong, Shuhua Liu, Dezhi Yang, and Qiang Yu, "Investigation of using hybrid recycled powder from demolished concrete solids and clay bricks as a pozzolanic supplement for cement," *Constr Build Mater*, vol. 73, pp. 754–763, 2014.

[18] Mehmet S. Kirgiz, "Use of ultrafine marble and brick particles as raw materials in cement

manufacturing,” *Materials and Structures*, vol. 48, pp. 2929–2941, 2015.

[19] Zhi Ge, Yuanyuan Wang, Renjuan Sun, Xinsheng Wu, and Yanhua Guan, “Influence of ground waste clay brick on properties of fresh and hardened concrete,” *Constr Build Mater*, vol. 98, pp. 128–136, 2015.

[20] Zhi Ge, Hongya Yue, and Renjuan Sun, “Properties of mortar produced with recycled clay brick aggregate and PET,” *Constr Build Mater*, vol. 93, pp. 851–856, 2015.

[21] B. Salima and M. Benmalek, “Performance evaluation of a resinous cement mortar modified with crushed clay brick and tire rubber aggregate,” *Constr Build Mater*, vol. 120, pp. 473–481, Sep. 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.05.119.

[22] Mohammed Tarek Uddin, Aziz Hasan Mahmood, Md. Rubayet Ibna Kamal, S.M. Yashin, and Zia Uddin Ahmed Zihan, “Effects of maximum size of brick aggregate on properties of concrete,” *Constr Build Mater*, pp. 713–726, 2017.

[23] S. Liu, R. Dai, K. Cao, and Z. Gao, “The role of sintered clay brick powder during the hydration process of cement pastes,” *Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Civil Engineering*, vol. 41, no. 2, pp. 159–165, Jun. 2017, doi: 10.1007/s40996-017-0049-0.

[24] D. Medeiros De Morais and R. M. Spoto, “Propriedades Tecnológicas e Mineralógicas das Argilas e suas Influências na Qualidade de Blocos Cerâmicos de Vedação que Abastecem o Mercado do Distrito Federal,” *Cerâmica Industrial*.

[25] E. Vejmelková et al., “High performance concrete with Czech metakaolin: Experimental analysis of strength, toughness and durability characteristics,” *Construction and Building Materials - CONSTR BUILD MATER*, vol. 24, pp. 1404–1411, Aug. 2010, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.01.017.

[26] I. Janotka, F. Puertas, M. Palacios, M. Kuliffayová, and C. Varga, “Metakaolin sand-blended-cement pastes: Rheology, hydration process and mechanical properties,” *Constr Build Mater*, vol. 24, pp. 791–802, May 2010, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2009.10.028.

[27] R. García, R. Vigil de la Villa Mencía, V. Rubio Fernandez, and M. Frías, “The Transformation of Coal-Mining Waste Minerals in the Pozzolan Reactions of Cements,” *Minerals*, vol. 6, p. 64, Jun. 2016, doi: 10.3390/min6030064.

[28] Normalización Española, “UNE-EN 197. Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes.”

[29] P. Kumar Mehta and Paulo J. M. Monteiro, *Concrete. Microstructure, Properties and Materiales*, Third Edition. 2006. doi: 10.1036/0071462899.

[30] A. A. Aliabdo, A. E. M. Abd-Elmoaty, and H. H. Hassan, “Utilization of crushed clay brick in concrete industry,” *Alexandria Engineering Journal*,

vol. 53, no. 1, pp. 151–168, 2014, doi: 10.1016/j.aej.2013.12.003.

[31] N. Rakhimova and R. Rakhimov, “Alkali-activated cements and mortars based on blast furnace slag and red clay brick waste,” *Mater Des*, vol. 85, pp. 324–332, Nov. 2015, doi: 10.1016/j.matdes.2015.06.182.

[32] J. P. Gonçalves, L. M. Tavares, R. D. Toledo Filho, and E. M. R. Fairbairn, “Performance evaluation of cement mortars modified with metakaolin or ground brick,” *Constr Build Mater*, vol. 23, no. 5, pp. 1971–1979, May 2009, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2008.08.027.

[33] Z. Chen, “Global Rare Earth Resources and Scenarios of Future Rare Earth Industry,” *Journal of Rare Earths - J RARE EARTH*, vol. 29, pp. 1–6, Jan. 2011, doi: 10.1016/S1002-0721(10)60401-2.

[34] F. Zhou, Y. Xiao, M. Guo, Y.-T. Tang, W. Zhang, and R. Qiu, “Selective Leaching of Rare Earth Elements from Ion-Adsorption Rare Earth Tailings: A Synergy between CeO₂ Reduction and Fe/Mn Stabilization,” *Environ Sci Technol*, Jul. 2021, doi: 10.1021/acs.est.1c03106.

[35] L. Wang and T. Liang, “Geochemical fractions of rare earth elements in soil around a mine tailing in Baotou, China,” *Sci Rep*, vol. 5, p. 12483, Jul. 2015, doi: 10.1038/srep12483.

[36] Arturo Albornoz Wegertseder, “Declaración de Impacto Ambiental. ‘PROYECTO MINERO EL CABRITO’.” Accessed: Jan. 16, 2024. [Online]. Available:

<https://infofirma.sea.gob.cl/DocumentosSEA/MostrarDocumento?docId=c4/a3/42705941252a3dc1d148b03613154f30ccf2>

[37] IS:3812 (Part-1), “Pulverized fuel ash — specification. Part 1: For use as Pozzolana in cement, Cement Mortar and Concrete (Second Revision),” Bureau of Indian Standards, New Delhi, India, no. October, pp. 1–14, 2013.

[38] ASTM D-854, “Métodos de Prueba estándar para Gravedad específica de los sólidos del suelo por picnómetro de Agua,” 2014.

[39] M. C. Powers, “A NEW ROUNDNESS SCALE FOR SEDIMENTARY PARTICLES,” *Journal of Sedimentary Particles*, pp. 117–119, 1953.

[40] INSTITUTO DE CATÁLISIS Y PETROLEOQUÍMICA, “ESPECTROSCOPIA DE EMISIÓN ATÓMICA ICP-OES.” Accessed: Jan. 23, 2024. [Online]. Available:

https://icp.csic.es/archivos/uapoyo/2020/Descripcion%20ICP_02.pdf

[41] División de Normas del Instituto Nacional de Normalización, “NCh 158 - Cementos - Ensayo de flexión y compresión de morteros de cemento.”

[42] ASTM International, “ASTM C1437-20. Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar.” Accessed: Jan. 24, 2024. [Online]. Available: <https://www.astm.org/c1437-20.html>

- [43] “Método de prueba estándar para densidad, absorción y huecos en concreto endurecido.” Accessed: Feb. 23, 2024. [Online]. Available: <https://tienda.aenor.com/norma-astm-c642-13-083729>
- [44] A. K. Saha, M. N. N. Khan, and P. K. Sarker, “Value added utilization of by-product electric furnace ferronickel slag as construction materials: A review,” *Resour Conserv Recycl*, pp. 10–24, 2018.
- [45] M. Gou, L. Zhou, and N. W. Y. Then, “Utilization of tailings in cement and concrete: A review,” *Science and Engineering of Composite Materials*, pp. 449–464, 2019.
- [46] V. G. Haach, G. Vasconcelos, and P. B. Lourenço, “Influence of aggregates grading and water/cement ratio in workability and hardened properties of mortars,” *Constr Build Mater*, pp. 2980–2987, 2011.
- [47] N. Parthasarathi, K. S. Satyanarayanan, and B. R. Reddy, “Effect on workability of concrete due to partial replacement of natural sand with gold mine tailings,” *Indian J Sci Technol*, 2016.
- [48] Mohammad Tahir Shah, “Physicochemical study of bagasse and bagasse ash from the sugar industries of NWFP Pakistan and its recycling in cement manufacturing,” *Journal of the chemical society of pakistan*, pp. 375–378, 2009.
- [49] Xiaolu Guo, Huisheng Shi, and Warren A. Dick, “Compressive strength and microstructural characteristics of class C fly ash geopolymers,” *Cem Concr Compos*, pp. 142–147, 2010.
- [50] Aaron R. Sakulich, Edward Anderson, Caroline Schauer, and Michel W. Barsoum, “Mechanical and microstructural characterization of an alkali-activated slag/limestone fine aggregate concrete,” *Constr Build Mater*, pp. 2951–2957, 2009.
- [51] Yazeed A. Al-Noaimat and Tolga Akis, “Influence of Cement Replacement by Calcinated Kaolinitic and Montmorillonite Clays on the Properties of Mortars,” *Arab J Sci Eng*, pp. 14043–14057, 2023.
- [52] A. Alujas, R. Fernandez, R. Quintana, K. L. Scrivener, and F. Martierna, “Pozzolanic reactivity of low grade kaolinitic clays: influence of calcination temperature and impact of calcination products on OPC hydration,” *Appl. Clay Sci*, pp. 94–101, 2015.
- [53] A. Trümer, H.-M. Ludwig, M. Schellhorn, and R. Diedel, “Effect of a calcined Westerwald bentonite as supplementary cementitious material on the long-term performance of concrete,” *Appl. Clay Sci.*, pp. 36–42, 2019.
- [54] T. Danner, G. Norden, and H. Justnes, “Characterisation of calcined raw clays suitable as supplementary cementitious materials,” *Appl. Clay Sci.*, pp. 391–402, 2018.
- [55] A. Naceri and M. C. Hamina, “Use of waste brick as a partial replacement of cement in mortar,” *Waste Management*, pp. 2378–2384, 2009.