



Universidad  
Señor de Sipán

# **FACULTAD DE INGENIERÍA, ARQUITECTURA Y URBANISMO**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**

**TRABAJO DE INVESTIGACIÓN**

**Análisis del mejoramiento de las propiedades  
físicas y mecánicas del concreto estructural  
incorporando cal**

**PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE  
BACHILLER EN INGENIERÍA CIVIL**

## **Autores**

Chapoñan Inoñan José Jhonattan

<https://orcid.org/0000-0001-7053-2692>

Delgado Fernández Eloy

<https://orcid.org/0009-0005-9437-9289>

## **Asesor**

Ing. Sócrates Pedro Muñoz Pérez

<https://orcid.org/0000-0003-3182-8735>

## **Línea de Investigación**

**Tecnología e Innovación en el Desarrollo de la Construcción y  
la Industria en un Contexto de Sostenibilidad**

## **Sublínea de Investigación**

**Innovación y Tecnificación en Ciencias de los Materiales, Diseño e  
Infraestructura**

**Pimentel – Perú**

**2024**

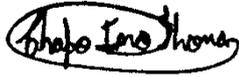
**DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD**

Quienes suscriben la DECLARACIÓN JURADA, somos **estudiantes** del Programa de Estudios de **Ingeniería Civil** de la Universidad Señor de Sipán S.A.C, declaramos bajo juramento que somos autores del trabajo titulado:

**ANÁLISIS DEL MEJORAMIENTO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS  
DEL CONCRETO ESTRUCTURAL INCORPORANDO CAL**

El texto de mi trabajo de investigación responde y respeta lo indicado en el Código de Ética del Comité Institucional de Ética en Investigación de la Universidad Señor de Sipán (CIEI USS), conforme a los principios y lineamientos detallados en dicho documento, en relación a las citas y referencias bibliográficas, respetando al derecho de propiedad intelectual, por lo cual informo que la investigación cumple con ser inédito, original y auténtico.

En virtud de lo antes mencionado, firman:

|                                |               |   |
|--------------------------------|---------------|---|
| Chapoñan Inoñan José Jhonattan | DNI: 72297171 |  |
| Delgado Fernández Eloy         | DNI: 47739405 |  |

Pimentel, 26 de agosto de 2024.

PAPER NAME

**Chapoñan\_Delgado\_Trabajo de Investigación**

AUTHOR

-

WORD COUNT

**7407 Words**

CHARACTER COUNT

**38508 Characters**

PAGE COUNT

**37 Pages**

FILE SIZE

**45.9KB**

SUBMISSION DATE

**Sep 24, 2024 10:09 PM GMT-5**

REPORT DATE

**Sep 24, 2024 10:09 PM GMT-5**

● **11% Overall Similarity**

The combined total of all matches, including overlapping sources, for each database.

- 9% Internet database
- 6% Submitted Works database
- 0% Publications database

## **Dedicatoria**

Agradezco a Dios por brindarme salud, sabiduría y la oportunidad de alcanzar mis metas. Estoy profundamente agradecido con mis padres por su apoyo incondicional y con mis hermanos por su constante respaldo en el cumplimiento de este desafío.

Delgado Fernández Eloy

Dedico mi gratitud a Dios por protegerme y brindarme salud, así como por guiar e iluminar mi camino a lo largo de mi proyecto. Agradezco a mis padres y hermanos por su apoyo tanto moral como económico, lo cual ha sido crucial para alcanzar las metas establecidas.

Chapoñan Inoñan José Jhonattan

## **Agradecimiento**

A la Universidad Señor de Sipán por ofrecerme una formación académica de alta calidad, respaldada por un equipo de docentes excepcionales que se dedicaron a impartirnos lo mejor de sus conocimientos.

Delgado Fernández Eloy

Agradezco a la Universidad Señor de Sipán y a todos mis profesores por su orientación y apoyo a través de sus enseñanzas.

Chapoñan Inoñan José Jhonattan

## Índice

|   |    |
|---|----|
| Dedicatoria.....                        | 4  |
| Agradecimiento .....                    | 5  |
| Resumen.....                            | 7  |
| Abstract.....                           | 8  |
| I. INTRODUCCIÓN.....                    | 9  |
| 1.1. Realidad Problemática .....        | 9  |
| 1.2. Formulación del problema .....     | 20 |
| 1.3. Hipótesis.....                     | 21 |
| 1.4. Objetivos.....                     | 21 |
| 1.5. Teorías relacionadas al tema ..... | 22 |
| II. MÉTODO DE INVESTIGACIÓN .....       | 24 |
| III. RESULTADOS.....                    | 25 |
| IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES .....      | 28 |
| V. REFERENCIAS.....                     | 31 |

## Resumen

El uso de cal ha experimentado un notable incremento en los últimos años, lo cual ha generado un fuerte impacto ambiental. Por ello, muchas industrias de la construcción han optado como una alternativa sostenible económicamente y con el medio ambiente para producir concreto estructural. El objetivo del presente documento es efectuar una revisión sistemática de analizar el efecto de la adición de cal en el concreto estructural para mejorar sus propiedades físico – mecánicas y de esta manera poder identificar el proceso de hidratación del cemento y cal. Determinando así, la cantidad óptima de cal requerida y delimitando los beneficios económicos en diferentes construcciones. Para ello, se revisaron investigaciones registradas en 55 artículos indexados en las bases de datos de Scopus, Science Direc y repositorios institucionales entre los últimos 5 años. En los resultados se evidenció que la cal en la elaboración con el concreto estructural, mejoran la calidad de la mezcla, optimizan la resistencia a la compresión y flexión, presentan características mecánicas especialmente cuando se considera la orientación de las cargas aplicadas. En conclusión, se determinó el uso de cal como una alternativa sostenible en el concreto que contribuye de manera ecológica y económica en el sector de la construcción.

**Palabras Clave:** Concreto, cal, hidratación, impacto ambiental.

## **Abstract**

The use of lime has experienced a remarkable increase in recent years, which has generated a strong environmental impact. Therefore, many construction industries have opted as an economically and environmentally sustainable alternative to produce structural concrete. The objective of this paper is to carry out a systematic review to analyze the effect of lime addition in structural concrete to improve its physical-mechanical properties and thus to identify the hydration process of cement and lime. Thus, determining the optimum amount of lime required and delimiting the economic benefits in different constructions. For this purpose, researches registered in 54 articles indexed in the databases of Scopus, Science Direc and institutional repositories in the last 5 years were reviewed. In the results it was evidenced that lime in the elaboration with structural concrete, improve the quality of the mixture, optimize the compressive and flexural strength, present mechanical characteristics especially when considering the orientation of the applied loads. In conclusion, the use of lime was determined as a sustainable alternative in concrete that contributes ecologically and economically in the construction sector.

**Keywords:** Concrete, lime, hydration, environmental impact.

## I. INTRODUCCIÓN

### 1.1. Realidad Problemática

Actualmente la cal ha desempeñado un papel significativo en la construcción a lo largo de la historia, siendo los romanos los pioneros en su amplio uso; sin embargo, desarrollaron métodos de fabricación y técnicas de construcción basadas en el cementante natural de cal. Por lo que, en República Checa tienen muchos años de práctica en las tecnologías progresivas, destinadas a evitar el acceso de sustancias agresivas, no solo en las capas superficiales del concreto, sino también dentro de la estructura, donde reduce el deterioro de las armaduras en estructuras de concreto y afecta la durabilidad del concreto. Por ende, el uso de aditivos de cristalización en morteros elaborados con cemento polímero y cal como sustituto parcial del cemento ha demostrado ser eficaz para optimizar las propiedades (físico – mecánicas) del mortero [1].

A escala mundial, los estudios en China han demostrado que el uso de lodos rojos como materiales de lechada es eficaz para la prevención de desastres y en la ingeniería subterránea. Se ha establecido que la producción de materiales para la construcción civil genera una considerable cantidad de residuos sólidos, los cuales, si no se gestionan adecuadamente, pueden ocasionar problemas ambientales como la propagación de enfermedades y la degradación del entorno urbano [2].

De la misma manera se desarrolla un concreto de agua de mar y arena de ultra alto rendimiento (UHPSSC) ecológico mediante la incorporación de un sistema de aglomerante ternario (LC3) como primera etapa. En el cual, muestran que el UHPSSC mezclado con LC3 exhibió menor resistencia a la compresión a época temprana, pero una mayor resistencia a largo plazo debido a la reacción puzolánica de MK y la reacción sinérgica entre LS, MK y cemento. Sin embargo, el pico exotérmico principal y el calor de hidratación total normalizado por peso de aglutinante disminuyeron con el aumento del nivel de contenido de MK [3].

Por otro lado, Da Silva et al. [4], en Brasil analizaron el uso de cal hidratada en

concretos con árido reciclado y cenizas volantes para aumentar su resistencia y durabilidad; además, el concreto es crucial para el desarrollo socioeconómico donde su producción tiene un impacto negativo en el entorno y agota los recursos naturales debido a la extracción de grandes cantidades de materiales. Así mismo, la elaboración emite un aumento significativo de calentamiento global. En comparación a Irak, ya que analiza las propiedades físicas y térmicas de los revestimientos de techo y suelo a base de cal, destacando su durabilidad, flexibilidad y resistencia al calor. Sin embargo, se producen muchas influencias ya sea por condiciones climáticas u otros factores, donde este conocimiento se debe de predecir para su rendimiento hacia un futuro [5].

En Reino Unido se examina la concentración de CO<sub>2</sub> y la estabilidad de la exposición en la carbonatación, el contenido alcalino y el pH del concreto; sin embargo, el medio ambiente y la duración de la exposición son dos factores principales que afectan la carbonatación de concreto activado con álcalis (AAC) y la corrosión resultante del refuerzo que afecta el desempeño estructural del AAC reforzado con acero [6]. Además, un estudio ejecutado en Sudáfrica nos fundamenta que el uso de una mezcla de cemento sostenible llamada LC3 en la impresión 3D de concreto, se reemplazaron el 50 % del cemento Portland ordinario por piedra caliza y arcilla calcinada (LC2). Así mismo, la industria de la construcción tiene una huella de carbono muy grande en el medio ambiente lo que puede afectar al desarrollo de la población, tanto para su salud y economía. Sin embargo, se estableció que LC3 es prometedor como reemplazo parcial del OPC en el concreto digital, siempre y cuando se cumplan ciertos requisitos de fluidez y reología [7].

Una investigación realizada en Corea del Sur en el año 2023 estudió la adición de biocarbón en el cemento LC3 con el objetivo de optimizar su rendimiento y comprimir las emisiones de carbono. No obstante, la adición de biocarbón retrasa la hidratación del cemento, aumenta los productos de hidratación y reduce ligeramente la resistencia a la compresión. Por lo que, la combinación de biocarbón y LC3 puede mejorar los beneficios ambientales del cemento y promover su producción ecológica [8]; sin

embargo, los morteros de cal se han utilizado considerablemente en la construcción de edificios y estructuras. Por ello, Justus et al. [9], hace referencia a Kenia, donde sugiere el análisis potencial de una mezcla de cal y ceniza de jacinto de agua como aglutinantes en la elaboración de bloques de tierra comprimida con capacidad de absorción acústica para la construcción. En el que, la reacción de cenizas con productos de hidratación del cemento Portland es lenta, retrasando el desarrollo de la fuerza a una edad temprana.

Investigaciones realizadas en España han encontrado que el uso de la añadidura de cal en diferentes propiedades de los revoques de cal y yeso, pueden afectar la resistencia de estos materiales, pero se pueden diseñar materiales compatibles con propiedades similares a los enlucidos históricos. Por ello, las adiciones de cal mejoraron significativamente la resistencia a la intemperie, lo que permite su uso en aplicaciones exteriores y una posible alternativa a los materiales de construcción actuales con mayores huellas de carbono [10]. Por ende, en la búsqueda de una mezcla sostenible y adecuada para la impresión 3D, interviene la mezcla de cemento Portland ordinario (OPC) que es perjudicial para el medio ambiente. Por lo que, es crucial identificar alternativas para aquellos recursos naturales que están siendo fuertemente explotados. Por ello, se propone la mezcla de piedra caliza y arcilla calcinada, conocida como LC3, como una alternativa sostenible que puede reemplazar al OPC en gran medida [11].

Desde otra perspectiva en el año 2023 se publica desde Grecia, un trabajo en el que se evidencia un análisis sobre el uso de dos productos secundarios (D1S y D1C) derivados del proceso industrial de la perlita, como sustitutos de la puzolana natural en la elaboración de morteros y lechadas en base de cal. Determinando así, que la minería de perlita puede tener una baja carga ambiental, sin embargo, es importante considerar cuidadosamente cómo se manejan los productos secundarios y los residuos generados durante el proceso industrial. Esto puede incluir medidas como la ejecución de métodos de control de polvo y el tratamiento adecuado de los desechos químicos para minimizar el impacto ambiental [12].

Para analizar al detalle en Italia se enfoca en la evaluación del efecto de la

maduración del material de construcción bio-basado "cal de cáñamo". Donde se establece que deben soportar diferentes cambios climáticos en diferentes condiciones por cada edificación. Por ello, la cal de cáñamo se elabora mezclando un aglutinante a base de cal con astilleros de cáñamo. Por lo que, los resultados muestran que las propiedades higrotérmicas mejoran con la maduración debido a la carbonatación del aglutinante y la reducción de la humedad inicial [13].

La cal tiene un papel importante en la reducción de la contaminación en diferentes sectores industriales. Su uso en el sector ambiental se encuentra en constante desarrollo debido a sus propiedades químicas y su efectividad en el tratamiento de diversos tipos de contaminación. Sai y Mayakrishnan [14], nos manifiesta que, en la India sugieren utilizar desechos industriales en la construcción para beneficios económicos y ambientales. Sin embargo, tienen sus ventajas y desventajas en el ámbito constructivo y económico; ya que, es importante considerar cuidadosamente las necesidades y requisitos de cada proyecto de construcción antes de decidir qué material utilizar. Así mismo, demostraron que la cal influyó significativamente en la formación de una estructura estable y densa de la superficie o suelo de algodón negro estabilizado con ceniza de bagazo.

Esta investigación comprende evaluar cómo la adición de cal puede mejorar la resistencia del concreto cuando se expone directamente al fuego. Por ello, para minimizar los problemas de fisuración, es esencial considerar factores como el diseño estructural, la calidad de los materiales y la preparación adecuada de la superficie. Asimismo, es importante controlar cuidadosamente la humedad y la temperatura durante el proceso de curado. Además, indica que el reemplazo de cal por cemento en un 5 %, 10 % y 15 % se pudo comprobar que, a los 28 días, la resistencia a la compresión tuvo un aumento significativo. Por lo tanto, el 5 % de reemplazo produjo la mayor resistencia a la compresión [15]. Es por ello que analizar las características del adoquín para peatones, con ceniza de leña de eucalipto y cal. Nos trae un principal problema asociado con los adoquines es su tendencia a desplazarse y deformarse con

el tiempo debido a la falta de una base adecuada y el tráfico pesado [16].

Desde un punto de vista medioambiental, Rosado [17], en su investigación tiene como objetivo determinar cómo varían las propiedades del concreto hidráulico modificado con microsilice y cal en Puno. Donde nos determina que el principal problema del concreto hidráulico es que puede sufrir agrietamiento y fisuración debido a la variación de las condiciones ambientales, especialmente en zonas de climas extremos. Estas fisuras pueden reducir la vida útil del concreto y permitir la penetración de humedad y agentes agresivos, lo que puede acelerar su deterioro y afectar la resistencia estructural. De tal forma que para Espitia [18], se ha centrado en la mampostería de arcilla cocida asentada sobre morteros de cal y arena en el cual es un material habitual en las construcciones patrimoniales de Europa y otros países. Dicha mampostería es vulnerable a daños estructurales debido a fenómenos naturales o intervenciones humanas. Por ello, se han realizado estudios para evaluar su vulnerabilidad y tomar medidas de reparación y refuerzo.

Este estudio reflejó que la utilización de la cal hidratada como adición en la producción de concreto y su impacto en el comportamiento físico - mecánico del material. Establecen diferentes proporciones de cal como sustituto parcial del cemento (5, 10 y 15%) para reducir los costos. Además, puede haber factores relacionados con la calidad y el diseño de los materiales que afecten en la construcción de los diferentes puntos geográficos de la zona. Por lo cual, se investiga cómo la cal hidratada influye en la resistencia y la capacidad de absorción de agua del concreto en diversas etapas. Ya que, el objetivo es encontrar la proporción óptima de cal hidratada para su uso en la producción de concreto y diseño de mezclas [19].

Además, la investigación en el sector de Buenos Aires en Trujillo, se enfrentan problemas de asentamientos diferenciales en edificaciones debido a la composición del suelo. Así mismo, se buscó mejorar los aspectos físicos y mecánicos del suelo mediante la adición de una mezcla compuesta por diferentes proporciones de ceniza de cascarilla de cebada y cal [20].

Para Pastapure et al. [21], examina las características de las cenizas de fondo incineradas y su limitado uso como materia prima. Donde, se propone el uso de cal como agente estabilizador para superar estas limitaciones. Por lo que, la cal puede experimentar un proceso de retracción durante su fraguado, lo que puede provocar la formación de grietas en el material o en las juntas. Sin embargo, los resultados indicaron una mejora significativa en las propiedades de resistencia, especialmente con un mayor contenido de cal.

Esta investigación experimenta cómo la cal hidratada y la cal viva afectan las propiedades de diferentes tipologías de suelos en la Prolongación Navarro Cauper en Iquitos. Asimismo, es posible que el clima y los contextos geográficos de la zona, que incluyen la presencia de ríos y humedad constante, estén afectando la durabilidad de los pavimentos. Por lo que, los suelos son tratados con diferentes dosis de cal (hidratada – viva) y se examinan las variables dependientes, tales como la plasticidad, la densidad máxima en estado seco, la capacidad de soporte con CBR y la expansión. Donde, muestran que la cal viva tiene un impacto beneficioso en la resistencia, limita la expansión y disminuye ligeramente la densidad y la plasticidad. En contraste, no se encontraron mejoras significativas al utilizar cal hidratada [22].

La importancia actual del uso de la cal en la India como material de construcción, especialmente en la conservación de estructuras patrimoniales. Se discute la diferencia entre los morteros de cal y los de cemento y como la cal puede ser utilizada como una forma de reducir el CO<sub>2</sub>. Por lo que, se examina el uso de diferentes aditivos para acelerar la reacción de absorción de CO<sub>2</sub> y se analiza cómo el proceso de curado con carbono afecta las propiedades de los morteros de cal donde se observa que a medida que la T° aumenta, La capacidad de disolución del CO<sub>2</sub> en agua disminuye [23].

Sin embargo, en el año 2022 se publicó una investigación en donde se propone cómo estabilizar los residuos de bauxita (BR) para su uso en aplicaciones de ingeniería mediante la combinación de cal y óxido de grafeno en proporciones adecuadas. Determinando así, que la adición conjunta de cal y óxido de grafeno mejora

significativamente la resistencia y durabilidad de los BR, y reduce su comportamiento de dispersión. Por ende, la aplicación de BR mejorado puede ser una excelente opción para la construcción de carreteras en bases y sub-bases [24].

De la misma manera, la utilización de polvo de desecho cerámico como reemplazo del aglutinante en morteros de mampostería a base de cemento y cal ofrece una forma de reducir la huella de carbono de los materiales de construcción. Dicho esto, los estudios realizados en Irán revelaron que los morteros de cemento con polvo cerámico no presentaron efectos adversos significativos, mientras que la resistencia a (compresión – tracción) aumentaron en los niveles de sustitución del 10% al 20%. Por lo que, para los morteros de cal hidratada, las resistencias mejoraron de manera continua hasta un 70% de reemplazo de cal con polvo cerámico, lo que muestra su potencial como una alternativa sostenible en la construcción [25].

En esta investigación se determina que en Marruecos se llevaron a cabo experimentos para evaluar un nuevo biocompuesto (AWPL) hecho a partir de áridos de papel reciclado y cal, con el objetivo de valorizar los residuos de papel. Además, se prepararon cinco combinaciones de (AWP-Cal) con diferentes proporciones de cal en peso. Donde realizaron pruebas de caracterización mecánica, térmica y morfológica para evaluar la densidad aparente, la porosidad abierta, la absorción de agua, las resistencias a flexión y compresión. Por lo que, los resultados mostraron que AWPL tiene buenas propiedades mecánicas, una buena adherencia del vínculo AWP/Cal y una capacidad de aislamiento térmico adecuada para su uso como material estructural y de aislamiento térmico en edificios según la clasificación RILEM [26].

Para Mahmoodet al. [27], los suelos arcillosos en Australia son muy sensibles a la humedad y su resistencia puede verse afectada, lo que puede llevar a la inestabilidad y falla prematura del pavimento. Por lo que, para evitar costosos métodos de eliminación y reemplazo, se ha demostrado que la estabilización química con cal y cemento es una opción más sostenible. Aunque la estabilización combinada de dos etapas con cal y cemento ha sido efectiva, no existen pautas para el diseño óptimo de las mezclas. Por

ello, se ha desarrollado un programa de pruebas de laboratorio para encontrar las combinaciones óptimas para diferentes suelos, dando a conocer que un suelo arcilloso de plasticidad media, con cal y baja cantidad de cemento aumenta la resistencia y disminuye la plasticidad.

Es por ello, que actualmente se está investigando en la India examinar el efecto de agregar polvo de piedra al suelo tratado con cal para mejorar el desempeño del pavimento flexible en un corredor de construcción. Donde, se varió el porcentaje de polvo de piedra del 5 % al 30 % y se midió el CBR y UCS como indicadores de rendimiento. Por lo que, los resultados demostraron que el óptimo contenido de polvo de piedra es del 30 % con 10 % de cal para lograr una mejora significativa en el CBR y UCS [28].

Así mismo, en Brasil, se ha llevado a cabo un estudio que se enfoca en estabilizar la base de los pavimentos mediante la adición de cemento y la reacción puzolánica en áridos reciclados, provenientes de residuos de construcción y demolición. En el cual, se ha propuesto una combinación de cemento reciclado, áridos cerámicos rojos y cal hidratada, con el objetivo de mejorar la reactividad puzolánica y las propiedades mecánicas del material. Además, indican que esta mezcla logra niveles de resistencia y módulo resiliente similares a los obtenidos con el uso de cemento Portland en la estabilización de la base de pavimentos [29].

A menudo, el suelo arcilloso, que es ampliamente utilizado en la ingeniería civil, ha sido objeto de investigación para su estabilización. Se ha explorado la estabilización del suelo arcilloso utilizando diferentes porcentajes de cal rápida, con el propósito de que sus propiedades mejoren la construcción de subrasantes. Además, se han realizado pruebas como la densidad seca máxima, la relación de carga de California y análisis microscópicos para evaluar los cambios en el suelo. Determinando que agregar un 5 % de cal proporciona el mejor resultado en términos de estabilidad y economía [30].

De la misma manera, China por medio de Luo et al. [31], examinó la preparación de hidráulica natural con cal (NHL) a partir de relaves de calcita calcinados y digeridos.

Donde, mostraron que el NHL preparado cumplía con los requisitos del estándar NHL5 cal mortero. Además, se demostró que la carbonatación del mortero NHL5 refinó el tamaño de poro y mejoró su resistencia a la compresión, lo que lo convierte en un material cementoso respetuoso con el medio ambiente que utiliza residuos y tiene un consumo de energía relativamente menor.

Por consiguiente, un estudio en Irak examinó un nuevo material de construcción sostenible utilizando paja de trigo y cal como aglutinante base. Por ende, se utilizaron nuevas técnicas de secuencia de mezcla y se estudiaron la orientación de la carga aplicada y la relación de aspecto del espécimen. Además, la proporción de mezcla fue 4:1:1 y se obtuvo una resistencia a compresión de entre 1,8 MPa y 3,8 MPa. Entonces, las características físicas y de resistencia del concreto de paja mejoraron con las técnicas de secuencia de mezcla y la orientación de la carga aplicada [32].

De acuerdo con Zhang et al. [33], manifiesta que debemos entender la relación entre los componentes y las propiedades mecánicas de la mezcla de mortero de cáscaras de cal, ya que es un material de construcción común en edificios antiguos en zonas costeras de China. Por ello, las pruebas de laboratorio se centraron en la influencia de la relación agua - cal, la relación arena - cal, la edad de curado y la adición de arroz glutinoso en las propiedades del mortero. Proporcionando como resultados que el componente hidráulico  $\beta$  - CS se puede generar en la cáscara de cal calcinada. Las relaciones agua - cal y arena - cal tienen un impacto significativo en la resistencia del mortero de cáscara de cal donde puede ser mejorada mediante la adición de arroz glutinoso.

Por lo que, a partir del 2018 se establecieron en Eslovenia los métodos destructivos y no destructivos empleados para evaluar la capacidad de carga, y se presenta un estudio que examina la variación de las propiedades mecánicas del hormigón tras su exposición a diferentes temperaturas. Además, el concreto es un material de construcción ampliamente utilizado debido a su resistencia, durabilidad y bajo costo. La elección del agregado es importante, ya que representa la mayor parte

del volumen total de concreto. Sin embargo, los estudios indican que el concreto de piedra caliza tiene mejores propiedades mecánicas después de la exposición al fuego en comparación con el concreto de silicato [34].

A diferencia de Drougkas et al. [35], en Italia analizaron sobre los materiales inteligentes para monitorear y mejorar la salud estructural de edificios históricos. Por lo cual, se experimentaron morteros de cal hidráulica natural modificados con micro y nanorrellenos eléctricamente conductores como grafito, nanotubos de carbono y microfibras de carbono. Determinado así, que los rellenos mejoran las propiedades mecánicas del material de intervención y su piezorresistividad sin comprometer la compatibilidad mecánica y química con la estructura original.

Además, el estudio publicado en el año 2022 hace referencia a la India donde se examinó cómo las altas temperaturas afectan las propiedades del mortero de lodos de cal químicamente activada (CALS). Se encontró que la capacidad de soporte de carga del concreto disminuye después de la exposición a altas temperaturas, lo que se refleja en la disminución de su resistencia. Además, otras propiedades del concreto, como la densidad, el peso seco, la porosidad y la absorción de agua, también se ven afectadas. Sin embargo, se señala que el uso de lodos de cal como sustituto del agregado fino puede ser una solución más sostenible y rentable para la producción de concreto [36].

De la búsqueda a nivel nacional se procede a mencionar que Pinto [37], resalta que el estudio en cuestión se centra en la tecnología del concreto, la cual ha tenido un gran impacto en la ingeniería y en la construcción de estructuras civiles. Además, nos manifiesta que la cal es un mineral de bajo costo que se encuentra en abundancia en la región Ayacucho, por lo que su uso controlado en la elaboración de concreto normal puede ser beneficioso. Sin embargo, no se ha investigado cómo afecta la sustitución de una parte del cemento por cal en la resistencia del concreto fresco. Por lo que, propone una alternativa de uso de la cal en el concreto para reducir costos y mejorar sus características, y se utilizará la resistencia a la compresión como factor para el análisis

estructural de un edificio de 10 niveles en Ayacucho.

Casa y Tapia [38], nos indica que han realizado un estudio que examina las propiedades de un suelo arcilloso tratado con un 10% de cal y la adición de sal de maras en porcentajes del 10%, 12% y 14% y así evaluar su uso como subrasante en Cusco. Además, se llevaron a cabo ensayos para analizar la granulometría, los límites de Atterberg y el valor soporte del suelo (CBR). Por lo que, la adición de sal de maras al 12% mejoró la capacidad de carga del suelo arcilloso en un promedio del 49.66%.

Sin embargo, la tesis de Villca [39], busca determinar una alternativa sostenible para la construcción utilizando morteros mixtos de cal y puzolana - geopolímero obtenidos a partir de residuos. Además, se estudiaron diferentes tipos de residuos y puzolanas naturales, así como activadores alcalinos para el geopolímero. Por ello, la adición de pequeñas cantidades de geopolímero mejoró significativamente la resistencia mecánica de los morteros, y la sustitución del silicato comercial por otros residuos como fuente de sílice mejoró su desempeño. Por lo que, para solucionar este problema, se han creado morteros mixtos de cal y geopolímero derivado de residuos, que han demostrado tener una mayor resistencia mecánica.

En cuanto, a la investigación realizada en el 2019 se centró en el suelo volcánico de Moquegua, el cual tiene un mal comportamiento geotécnico debido a su fragilidad y baja densidad. Por ello, se realizaron ensayos para caracterizar el suelo y encontrar la mejor dosificación de cemento y cal para mejorar sus parámetros geotécnicos. Por lo que, los resultados mostraron un aumento significativo en el ángulo de fricción y los esfuerzos de resistencia al corte en comparación con el suelo natural, tanto para un curado de 3 como de 7 días [40].

Amat [41], afirma que el propósito de su artículo es determinar las propiedades del concreto que contiene ceniza de chala de maíz y cal en pavimentos rígidos en Cusco. Sin embargo, el proceso de obtención de materiales se vio limitado por la dificultad de quemar la chala de maíz para obtener la ceniza, de esta manera se realizaron ensayos en laboratorio para evaluar la trabajabilidad, el contenido de aire y la resistencia

(compresión -flexión). En el cual, los resultados muestran que la combinación de 5 % de cal y 10 % de ceniza de chala de maíz es idónea para los concretos  $f'c=210$  kg/cm<sup>2</sup> porque produce resultados favorables.

En el mismo año dos científicos nos fundamentan que el objetivo de su investigación fue mejorar las propiedades de las mezclas asfálticas en caliente mediante la adición de cal hidratada en la Av. San Diego – Lima. Donde, se utilizó un diseño experimental y se evaluó el comportamiento de diferentes porcentajes de cal hidratada en la mezcla con ensayos de Marshall y de inmersión - compresión. Dándonos como resultado que el % óptimo de cal hidratada es del 1 %, lo que mejoró la densidad, estabilidad, flujo y resistencia a la deformación, cumpliendo con los estándares del manual de E.G -2013 MTC [42].

En el año 2021 se llevó a cabo un estudio en Perú para investigar la estabilización de subrasantes mediante el uso de CBCA y cal. Para ello, tenemos un diseño no experimental transversal y en efecto mostraron que la adición del 20 % de CBCA aumentó el Índice de Soporte California (CBR) en más del 30 %, mientras que la adición del 4 % de cal lo incrementó en más del 8 %. Por lo que, se recomendó el uso óptimo de entre el 4 % y el 6 % de cal y entre el 15 % y el 20% de CBCA para estabilizar subrasantes de tipo CL según SUCS [43].

Además, en ese mismo año se evaluaron las propiedades de una subrasante de suelo arcilloso estabilizada con cal viva en el AA. HH Las Colinas, para su uso en la construcción de asfaltos. De esta manera, se recolectaron muestras y se llevaron a cabo ensayos de laboratorio, tanto en el suelo natural como en el estabilizado con diferentes proporciones de cal viva. Por ello, los resultados resaltan que la adición de cal viva mejoró significativamente la resistencia y la capacidad de soporte de la subrasante, obteniendo valores de CBR de 11.20 % para la proporción del 1 %, 17.60 % para el 3 % y 19.30 % para el 5 % [44].

## 1.2. Formulación del problema

¿Cuál es la cantidad óptima de cal que se debe agregar al concreto para mejorar

sus propiedades físicas y mecánicas?

### 1.3. Hipótesis

A nivel mundial y en Latinoamérica se presentan diferentes cantidades óptimas de cal que se debe agregar al concreto para mejorar sus propiedades completamente dichas, ya que puede variar dependiendo de varios componentes, como el tipo de concreto, los materiales disponibles y los requisitos específicos del proyecto. Sin embargo, generalmente se recomienda agregar entre un 5 % y un 15 % de cal en relación al peso total de los otros materiales cementantes en el concreto.

### 1.4. Objetivos

#### **Objetivo General**

Analizar el efecto de la adición de cal en el concreto estructural para mejorar sus propiedades físico - mecánicas.

#### **Objetivos Específicos**

Identificar el proceso de hidratación del cemento y cal, así como su efecto en las propiedades del concreto.

Determinar la cantidad óptima de cal requerida para lograr las mejores características físicas y mecánicas.

Delimitar los beneficios económicos de cal frente al uso de concreto en diferentes construcciones.

De esta manera, el concreto estructural se destaca como uno de los materiales más frecuentemente empleados en la construcción de distintas estructuras, como edificios, puentes y carreteras. Sin embargo, su resistencia y durabilidad pueden verse afectadas por diversos factores, como la calidad de los materiales, su proporción, la humedad, entre otros. Una posible solución para mejorar las propiedades del concreto estructural es la inclusión de cal como aditivo. La cal, al ser agregada al concreto, puede incrementar su resistencia (compresión - tracción - flexión), y tener una mejora en su durabilidad.

### 1.5. Teorías relacionadas al tema

En la naturaleza, es poco frecuente encontrar cal en un estado de pureza química, ya que suele estar acompañada de otros materiales como carbonato de magnesio, arcilla, hierro, azufre, álcalis, etc. Esta mezcla de componentes da lugar a una clasificación basada en el grado de pureza y la proporción de los materiales presentes en la cal.

Por ende, tenemos que la cal se produce al calentar rocas calizas a temperaturas elevadas, normalmente entre 900 y 1200 °C. Este proceso se lleva a cabo durante varios días, dependiendo del tipo de piedra caliza, en un horno rotatorio o en un horno tradicional. Durante la calcinación, se evita alcanzar la  $T^\circ$  de descomposición del óxido de calcio para garantizar la obtención de cal [45]. También tenemos la cal viva, que se produce de la incineración de la caliza, lo cual provoca la liberación de dióxido de carbono y la conversión del carbonato de calcio en óxido de calcio. Además, tiene la capacidad de reaccionar con el agua para convertirse en hidróxido de calcio, y una vez que se ha apagado (hidratado), se utiliza en aplicaciones de construcción [46].

De la misma manera tenemos que la cal hidratada está compuesta principalmente por hidróxido de calcio, que es una base fuerte que consiste en la combinación del metal calcio con dos grupos hidróxido. Así mismo, en el ámbito de la construcción, su uso principal se encuentra en la estabilización de suelos para la construcción de caminos, presas de tierra, aeropuertos y cimientos de edificios [47].

Seguidamente, la resistencia a la compresión es un factor importante en los suelos estabilizados con cal y depende en gran medida del tipo de suelo. Mientras que en algunos casos no se observa un aumento significativo en la resistencia, en otros se pueden alcanzar valores similares a los requeridos a los 7 días de edad en suelos estabilizados con cemento para la construcción de explanadas, en un plazo de aproximadamente 6 meses [48]. En este sentido, la resistencia a la acción del agua es

un factor relevante en los suelos tratados con cal, ya que su susceptibilidad al agua disminuye debido a los efectos de mejora inmediata y estabilización a largo plazo. Esto resulta en un mejor comportamiento de las capas tratadas en comparación con las capas de materiales no tratados en condiciones de servicio similares [49].

La evolución de la permeabilidad en los suelos arcillosos tratados con cal se divide en dos etapas distintas. Inmediatamente después de la mezcla y durante el proceso de modificación, el suelo experimenta una transformación de arcilloso a arenoso, lo que resulta en un aumento de la permeabilidad. Posteriormente, el suelo tratado con cal alcanza un nivel de impermeabilidad igual o incluso mayor que el suelo original, dependiendo del grado de estabilización logrado mediante el tratamiento [50]. De igual manera, la estabilización de suelos implica mejorar las propiedades físicas del suelo mediante métodos mecánicos y la adición de productos químicos, ya sean naturales o sintéticos. Este proceso se utiliza principalmente en suelos de subrasante deficientes o de baja calidad, y se conoce como estabilización con suelo - cemento, suelo - cal, y otros productos similares [51].

En la aplicación de la lechada de cal, se sigue un procedimiento en el que se escarifica el suelo y luego se distribuye la lechada utilizando camiones especializados. Debido a que la lechada de cal tiene una concentración menor que la cal en estado seco, a menudo se requieren dos o más pasadas para lograr la cantidad específica de sólidos de cal necesarios. Para evitar la pérdida y asegurar una distribución uniforme de la cal, se mezcla la lechada con el suelo inmediatamente después de cada pasada [52].

## II. MÉTODO DE INVESTIGACIÓN

Se realizó una revisión en diferentes artículos y tesis con el objetivo de analizar y comparar cada una de las investigaciones realizadas sobre el mejoramiento de las propiedades físico - mecánicas del concreto estructural con cal añadida. La búsqueda de los diferentes artículos ha sido en base de datos Scopus, Science Direct y también repositorios institucionales, donde se precisa la distribución de acuerdo al periodo de publicación y la base de datos ya mencionada.

Por lo que en la Tabla 1 tenemos un total de 55 artículos, distribuidos con 38 artículos en Scopus, donde se encontró 19 artículos en el año 2023 con el mayor porcentaje de revisión que se realizó. Para la base de datos Science Direct se obtuvo 1 artículo del año 2023. Además, 16 artículos en repositorios institucionales, obteniendo la mayor relación en el año 2021. Se utilizaron las siguientes palabras claves para buscar artículos en español e inglés: lime properties, structural concrete, addition of lime in buildings, analysis of lime in civil engineering.

Tabla 1. Artículos distribuidos según la base de datos y año de publicación.

| BASE DE DATOS           | AÑO DE PUBLICACIÓN |      |      |      |      |      | TOTAL |
|-------------------------|--------------------|------|------|------|------|------|-------|
|                         | 2018               | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 |       |
| Scopus                  | 1                  | 8    | 6    |      | 4    | 19   | 38    |
| Science Direct          |                    |      |      |      |      | 1    | 1     |
| Sitio web especializado | 2                  | 3    |      | 6    | 5    |      | 16    |
| <b>TOTAL</b>            | 3                  | 11   | 6    | 6    | 9    | 20   | 55    |

### III. RESULTADOS

A continuación, para una mejor referencia en la Tabla 2 se muestran las propiedades generales de la cal, es decir la composición de la misma puede ser de utilidad para visualizar los componentes químicos y detallar sus características.

Tabla 2. Propiedades de la cal.

| COMPONENTE                     | VALOR                  |
|--------------------------------|------------------------|
| CaO                            | 96.83 %                |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 1.17 %                 |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.27 %                 |
| MgO                            | 1.28 %                 |
| SiO <sub>2</sub>               | 1.26 %                 |
| Co <sub>2</sub>                | < 1 %                  |
| Residual CO <sub>2</sub>       | < 2 %                  |
| Reactivity T60                 | < 2 min                |
| Bulk density                   | 0.78 g/cm <sup>3</sup> |
| Specific gravity               | 2.6 g/cm <sup>3</sup>  |

Adaptado de Himouri [53], 2021.

La cal es un término que se utiliza para describir diferentes formas físicas de óxido de calcio (CaO) y óxido de calcio y magnesio (CaMgO<sub>2</sub>), también conocidos como cal viva y dolomía calcinada. Estos productos se obtienen al someter rocas como la caliza y la dolomía al proceso de calcinación. Además, tiene un color blanco con una densidad específica de 3,37 kg/m<sup>3</sup> y posee una forma cristalina donde muy pocas veces tiene un tinte amarillo debido a las impurezas que este posee.

De la misma manera, tenemos la Tabla 3 donde se identifican las diferentes características de la cal donde su proceso se realiza en hornos a elevadas temperaturas. Sin embargo, es importante tener en cuenta que las características y las unidades de medida pueden variar ligeramente dependiendo del contexto y la normativa específica de cada país.

Tabla 3. Características generales de la cal.

| <b>Características</b> | <b>Resultado</b>                                    |
|------------------------|---|
| Aspecto físico         | Polvo blanco, seco y sin color                      |
| Punto de fusión        | 2845 k  |
| Punto de ebullición    | 3123 k  |
| Peso específico        | 2,24 g/cm <sup>3</sup>                              |
| Densidad               | 3,30 g/cm <sup>3</sup>                              |
| Densidad a granel      | entre 300 kg/m <sup>3</sup> y 600 kg/m <sup>3</sup> |
| Dureza mecánica        | 2 - 3 Mohs  |
| Solubilidad en agua    | 1,19 g/L a 25 C                                     |

Adaptado de Varas [54], 2018.

La piedra caliza se utiliza como material de relleno y la cal hidratada como aditivo para mejorar la calidad del concreto, utilizadas principalmente en diferentes capas superficiales en la construcción. Así mismo, industrialmente se realiza en hornos verticales y horizontales. Por ende, tiene una capacidad de adherencia, mayor capacidad de trabajabilidad, ayuda a la retención de agua, prevención de fisuras y posee consistencia a las mezclas.

Para la selección de información de la cantidad óptima de cal que se debe agregar al concreto para obtener las mejoras, se consideraron criterios de inclusión de actualidad, procedencia, viabilidad y fiabilidad. Por lo que, la información seleccionada fue estructurada y organizada mediante la Tabla 4 donde se analizaron diferentes porcentajes de cada investigación.

Tabla 4. Comparación del porcentaje de la cal en cada análisis realizado.

| <b>REFERENCIA</b> | <b>MATERIAL ADICIONAL</b>                 | <b>PORCENTAJE A REEMPLAZAR</b> |
|-------------------|---|--------------------------------|
| [19]              | Cal hidratada                             | 5 %                            |
| [17]              | Microsilice y cal                         | 10 % - 5 %                     |
| [15]              | Cal                                       | 5 %                            |
| [25]              | Polvo de desecho cerámico y cal hidratada | 10 % - 20 %                    |
| [28]              | Polvo de piedra y cal                     | 30 % - 10 %                    |

|      |                               |             |
|------|-------------------------------|-------------|
| [41] | Ceniza de chala de maíz y cal | 10 % - 5 %  |
| [38] | Cal y cloruro de sodio        | 10 % - 12 % |
| [43] | CBCA y cal                    | 15 % - 4 %  |
| [42] | Cal hidratada                 | 1 %         |
| [44] | Cal viva                      | 3 %         |

---

Se encontró que la adición de un 7 % de cal promedio es óptima para obtener un concreto de buena calidad. Las propiedades físico - mecánicas del concreto mejoraron significativamente, con resultados favorables en términos de durabilidad y resistencia. También se encontró que la adición de cal en porcentajes específicos (1% - 20 %) mejoró la capacidad portante del suelo. Determinando así, que la cal demostró ser un aditivo eficaz para mejorar las propiedades del suelo estabilizado y del concreto.

## IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

### DISCUSIÓN

Frente al objetivo que es analizar el efecto de adición de cal en el concreto estructural para mejorar sus propiedades, se encuentra que la incorporación de cal en el concreto presenta beneficios notables en sus propiedades físico – mecánicas. En primer lugar, mejora la trabajabilidad al actuar como plastificante y reducir la viscosidad del concreto fresco, lo que facilita su colocación y compactación. En efecto tiene una gran similitud con lo que nos dice Jatoliya et al. [24], donde la cal contribuye a aumentar la durabilidad del concreto al reaccionar con compuestos de sulfato, mejorando su resistencia a ataques químicos y su durabilidad en entornos agresivos. Así mismo, otro efecto positivo es la reducción de la retracción durante el fraguado y endurecimiento, lo que ayuda a prevenir la formación de grietas superficiales.

De la misma manera podemos identificar el proceso de hidratación del cemento y cal, así como su efecto en las propiedades del concreto. Determinando así, que el proceso de hidratación del cemento es una reacción química que ocurre cuando el cemento se mezcla con agua, durante este proceso tiene una reacción que libera calor y provoca el endurecimiento y fraguado del concreto. Sin embargo, Li et al. [55], tiene en parte una gran similitud en sus resultados ya que comenta que la hidratación de la cal es un proceso químico en el que la cal reacciona con el agua para formar hidróxido de calcio y liberar calor. Por lo tanto, Segura et al. [47], mencionan que la hidratación del cemento como la hidratación de la cal son procesos químicos importantes en la formación y desarrollo del concreto. Estos procesos tienen efectos significativos en las propiedades del concreto, incluyendo su resistencia mecánica, durabilidad, trabajabilidad y capacidad de reducir la retracción.

Así mismo, tenemos que determinar la cantidad óptima de cal requerida para lograr mejorar sus propiedades. Por lo que, la cantidad óptima de cal que se debe agregar al concreto depende de varios componentes, como el tipo de cemento utilizado,

las características del agregado, las condiciones climáticas y los requisitos específicos del proyecto. Por ende, Abanto y Salinas [43], guardan gran similitud con su investigación realizada, ya que se recomienda realizar pruebas y ensayos de laboratorio para evaluar el desempeño del concreto con diferentes porcentajes de adición de cal. Además, es importante tener en cuenta que la cantidad óptima de cal puede variar según las especificaciones y requisitos del proyecto. Determinado así, que la adición óptima de cal es de 7 % ya que contribuye al aumento de la resistencia a la compresión del concreto y ayuda a reducir la retracción durante el proceso de fraguado y endurecimiento (Tabla 4).

Respecto a los beneficios económicos de cal frente al uso de concreto en diferentes obras, nos ofrece beneficios económicos notables, Sin embargo, Sai y Mayakrishnan [14], nos indica que la cal en general reduce los costos de materiales al ser un sustituto más económico del cemento. Así mismo, mejora la trabajabilidad del concreto, facilitando su colocación y compactación, lo que resulta en un mejor rendimiento y menores costos laborales. En consecuencia, de los resultados que hemos visto podemos deducir que los autores recomiendan el uso de la cal, ya que aumenta la durabilidad del concreto en ambientes agresivos, reduciendo los gastos de mantenimiento y reparación a largo plazo. Por lo tanto, el uso de cal en construcciones ofrece ventajas económicas como reducción de costos, mejor trabajabilidad y mayor durabilidad del concreto.

## **CONCLUSIONES**

La incorporación de cal en la mezcla del concreto, mejora sus propiedades físico - mecánicas si se emplea un porcentaje adecuado, pero a medida que se aumenta la cantidad de cal, la trabajabilidad del concreto puede disminuir, lo que dificulta su colocación y compactación.

La incorporación óptima para añadir en la elaboración del concreto estructural según las diversas investigaciones analizadas es en el rango de 5% al 7% de cal, logrando así mejorar sus propiedades mecánicas y físicas del concreto.

Los procesos de hidratación del cemento y la cal son esenciales para el desarrollo de las propiedades del concreto y su rendimiento en diversas aplicaciones de construcción. Gestionar adecuadamente estos procesos es clave para obtener un concreto de calidad y cumplir con los requisitos específicos de cada proyecto.

Los tipos de cal que se están empleando como adición al concreto brindan beneficios económicos en términos de costos de materiales, mano de obra y menor necesidad de mantenimiento. Sin embargo, es importante tener en cuenta los requisitos estructurales, las normas técnicas y las condiciones del proyecto específico para garantizar la seguridad y la calidad de la construcción.

## V. REFERENCIAS

- [1] J. Hodul, N. Žižková, R. Drochytka and R. Borg, "Influence of Crystallization Admixture on Mechanical Parameters and Microstructure of Polymer-Cement Mortars with Waste Limestone," *In Solid State Phenomena*, vol. 296, pp. 27-34, 2019.
- [2] C. Lin, M. Wang, X. Liu, Z. Li, J. Zhang and Y. Gao, "Working performance of red mud-based grouting materials mixed with ultrafine limestone and quartz," *Construction and Building Materials*, vol. 383, 2023.
- [3] J. Wang and Y. Huang, "Mechanical properties and hydration of ultra-high-performance seawater sea-sand concrete (UHPSSC) with limestone calcined clay cement (LC3)," *Construction and Building Materials*, vol. 376, 2023.
- [4] S. Da Silva, J. de Brito and J. de Oliveira Andrade, "Synergic effect of recycled aggregate, fly ash, and hydrated lime in concrete production," *Journal of Building Engineering*, vol. 70, 2023.
- [5] Y. Rahimzadeh, S. Mohammed and A. Barzinjy, "Effect of temperature on the internal components including portlandite, weight loss, and compression stress-strain behavior of lime-based roof and screed paste," *Journal of Building Engineering*, vol. 69, 2023.
- [6] O. Ojedokun and S. Mangat, "Chemical composition and physico-mechanical properties of carbonated alkali activated concrete and mortar," *Journal of Building Engineering*,, 2023.
- [7] K. Ibrahim, v. Z. G. and A. & Babafemi, "Influence of limestone calcined clay cement on properties of 3D printed concrete for sustainable construction," *Journal of Building Engineering*, vol. 296, pp. 27-34, 2023.
- [8] Y. Wang and X. Wang, "Multi-characterizations of the hydration,

- microstructure, and mechanical properties of a biochar–limestone calcined clay cement (LC3) mixture," *Journal of Materials Research and Technology*, 2023.
- [9] O. Justus, O. Nicholas, O. Erick, A. Mercy, F. ZEA, M. Maxwel and O. Andrew, "Acoustical properties of compressed earth blocks: Effect of compaction pressure, water hyacinth ash and lime," 2023.
- [10] K. Elert, R. Alaminos, C. Benavides and M. Burgos, "The effect of lime addition on weathering resistance and mechanical strength of gypsum plasters and renders," *Cement and Concrete Composites*, vol. 139, 2023.
- [11] Y. Al-Noaimat, M. Chougan, M. Al-kheetan, O. Al-Mandhari, W. Al-Saidi, M. Al-Maqbali and S. Ghaffar, "3D printing of limestone-calcined clay cement: A review of its potential implementation in the construction industry," *Results in Engineering*, 2023.
- [12] M. Stefanidou, V. Pachta and G. Konstantinidis, "Exploitation of waste perlite products in lime-based mortars and grouts," *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, vol. 32, 2023.
- [13] C. Moletti, P. Aversa, A. Losini, G. Dotelli, M. Woloszyn and V. Luprano, "Hygrothermal behaviour of hemp-lime walls: the effect of binder carbonation over time," *Building and Environment*, vol. 233, 2023.
- [14] P. Sai Pradeep and M. Mayakrishnan, "Microstructural characterization of lime modified bagasse ash blended expansive clays using digital image analysis," *Environmental Earth Sciences*, vol. 82, 2023.
- [15] F. Paredes and L. Lavado, "Influencia de la cal en el concreto y su aporte a la resistencia a la compresión, ante la acción de fuego directo, Moyobamba, 2019," 2019.
- [16] J. Saavedra, "Influencia de ceniza de leña de eucalipto y cal en las propiedades físico-mecánicas de adoquín peatonal, Ancash-2022," 2022.

- [17] A. Rosado, "Propiedades físicas y mecánicas de concreto hidráulico modificado con microsilice y cal en revestimiento de canales, Puno 2022," 2022.
- [18] A. Espitia, "Caracterización de mezclas de mortero de cal y arena, compatibles con morteros patrimoniales y su incidencia en las propiedades mecánicas de la mampostería de arcilla cocida, en edificaciones históricas," 2018.
- [19] E. Oblitas, "Evaluación del concreto para edificaciones adicionando cal hidratada, Bambamarca," 2020.
- [20] J. Silva, "Influencia de la adición de la mezcla ceniza volante de cascarilla de cebada con cal en las propiedades físicas y mecánicas en el suelo de Buenos aires distrito de Victor Larco Herrera-Trujillo-La Libertad-2018.," 2019.
- [21] V. Pastapure, D. Singh and S. Kumar, "Engineering behavior of municipal solid waste incinerated bottom ash with the addition of lime," *Materials Today: Proceedings*, vol. 80, pp. 48-53, 2023.
- [22] M. Angulo and C. Zavaleta, "Estabilización de suelos arcillosos con cal para el mejoramiento de las propiedades físico-mecánicas como capa de rodadura en la prolongación Navarro Cauper, Distrito San Juan-Maynas-Iquitos, 2019," 2021.
- [23] V. Athira and S. Manohar, "Carbonation of air lime mortars under natural and accelerated conditions—A systematic review. *Materials Today: Proceedings*," 2023.
- [24] A. Jatoliya, S. Saha, B. Pratap, S. Mondal and B. Rao, "Assessment of bauxite residue stabilized with lime and graphene oxide as a geomaterial for road applications," *Soils and Rocks*, vol. 46, 25 Octubre 2022.
- [25] M. Ebrahimi, A. Eslami, I. Hajirasouliha, M. Ramezanpour and K. Pilakoutas, "Effect of ceramic waste powder as a binder replacement on the properties of cement-and lime-based mortars," *Construction and Building Materials*, vol. 379, 2023.
- [26] B. Mandili, M. Taqi, A. El Bouari and M. Errouaiti, "Experimental study of a

new ecological building material for a thermal insulation based on waste paper and lime," *Construction and Building Materials*, vol. 228, 2019.

- [27] A. Mahmood, R. Hassan and A. Fouad, "Effect of Lime, Cement, and Lime-Cement Stabilisation on Low to Medium Plasticity Clayey Soil," *In 2019 IEEE Asia-Pacific Conference on Computer Science and Data Engineering (CSDE)*, pp. 1-7, 2019.
- [28] M. Peter, "Effects of Stone Dust on Lime Stabilized Granular Soil," *In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 1110, no. 1, p. 012024, 2023.
- [29] P. Silva, S. Ângulo, R. Motta and L. Bernucci, "Pozzolanic Reaction of Recycled Cementitious and Red Ceramic-Waste Aggregates with Hydrated Lime for Pavement Base Layer," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 35, 2023.
- [30] M. Chauhan, S. Kalra y H. Singh, «Stabilization of clayey soil using lime and plastic fiber in sub grades,» *Int. J. Innov. Technol. Explor. Eng*, vol. 8, 2019.
- [31] K. Luo, J. Li, K. Peng, Z. Lu, L. Hou and J. Jiang, "Properties of Natural Hydraulic Lime Prepared from Calcite Tailings," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 34, no. 2, 2023.
- [32] S. Zemam and M. Abed, "Structural characteristics of developed sustainable lime-straw composite," *Civil Engineering Journal*, vol. 5, no. 12, pp. 2587-2597, 2019.
- [33] Z. Zhang, J. Liu, B. Li, G. Yu and L. Li, "Experimental study on factors affecting the physical and mechanical properties of shell lime mortar," *Construction and Building Materials*, vol. 228, 2019.
- [34] U. Dolinar, G. Trtnik and T. Hozjan, "Determination of mechanical properties of normal strength limestone concrete after exposure to elevated temperatures," *In Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1107, no. 3, p. 032018, 2016.
- [35] A. Drougkas, V. Sarhosis, M. Basheer, A. D'Alessandro and F. Ubertini,

- "Design of a smart lime mortar with conductive micro and nano fillers for structural health monitoring," *Construction and Building Materials*, vol. 367, 2023.
- [36] C. Sharma and R. Kumar, "Influence of Dry Lime Sludge on the Physico-mechanical and Microstructural Properties of Low Carbon Cementitious Composites Exposed at Elevated Temperature," *In Recent Advances in Materials, Mechanics and Structures: Select Proceedings of ICMMS 2022*, pp. 333 - 346, 2022.
- [37] E. Pinto, "Efecto del uso de cal en la elaboración del concreto, caso: Edificio de diez niveles, Ayacucho 2021," 2021.
- [38] D. Casa and J. Tapia, "Análisis comparativo de las propiedades físico mecánicas de un suelo arcilloso adicionado con óxido de calcio (cal) al 10% y cloruro de sodio (sal de maras) al 10%, 12% y 14% para subrasante de la vía Urbana Colectora," *Programada en la Comunidad Campesina Pillao Matao-San Jeronimo-Cusco*, 2022.
- [39] A. Villca, "Utilización de geopolímero para la mejora de las propiedades en morteros cal-puzolana y su empleo en países en desarrollo (Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de València)," 2021.
- [40] R. Vera and C. Dávila, "Análisis experimental de los suelos volcánicos con adiciones de cal y cemento con fines de evaluar su comportamiento geotécnico para la región de Moquegua del distrito de Omate," 2020.
- [41] E. Amat, "Propiedades físicas y mecánicas del concreto adicionando cenizas de chala de maíz y cal para pavimentos rígidos, Cusco 2022," 2022.
- [42] J. Ramos and R. Zamudio, "Estudio del comportamiento físico y mecánico del diseño de mezcla asfáltica en caliente adicionando cal hidratada, Av. San Diego, 2021," 2022.
- [43] L. Abanto and E. Salinas, "Análisis de la estabilización de subrasantes con uso de ceniza de bagazo de caña de azúcar y cal en el Perú," 2021.

- [44] H. Ríos and B. Solano, "Estudio exploratorio de estabilización de una subrasante de suelo arcilloso con cal viva como material estabilizante en el AAHH Las Colinas, calle Lagunas - San Juan Bautista - 2021," 2019.
- [45] A. Pinheiro, N. Mesquita, J. Trovão, F. Soares, I. Tiago, C. Coelho and A. Portugal, "Limestone biodeterioration: A review on the Portuguese cultural heritage scenario," *Journal of cultural heritage*, vol. 36, pp. 275-285, 2019.
- [46] S. Pochwała, D. Makiola, S. Anweiler and M. Böhm, "The heat conductivity properties of hemp–lime composite material used in single-family buildings," *Materials*, vol. 13, no. 4, 2020.
- [47] J. Segura, D. Aponte, L. Pelà and P. Roca, "Influence of recycled limestone filler additions on the mechanical behaviour of commercial premixed hydraulic lime based mortars," *Construction and Building Materials*, vol. 238, 2020.
- [48] D. Zhang, J. Zhao, D. Wang, Y. Wang and X. Ma, "Influence of pozzolanic materials on the properties of natural hydraulic lime based mortars," *Construction and Building Materials*, vol. 244, 2020.
- [49] J. Feijoo, M. Alvarez, R. Fort, E. Arce and D. Ergenç, "Effects of paraffin additives, as phase change materials, on the behavior of a traditional lime mortar," *Construction and Building Materials*, vol. 361, 2022.
- [50] I. Torres, G. Matias and P. Faria, "Natural hydraulic lime mortars-The effect of ceramic residues on physical and mechanical behaviour," *Journal of Building Engineering*, vol. 32, 2020.
- [51] M. Frigione, M. Lettieri, A. Sarcinella and J. de Aguiar, "Sustainable polymer-based phase change materials for energy efficiency in buildings and their application in aerial lime mortars," *Construction and Building Materials*, vol. 231, 2020.
- [52] L. Moretti, M. Conficconi, S. Natali and A. D'Andrea, "Statistical analyses of SEM-EDS results to predict the quantity of added quicklime in a treated clayey soil,"

*Construction and Building Materials*, vol. 253, 2020.

- [53] K. Himouri, A. Hamouine and L. Guettatfi, "Effects of portland cement and quicklime on physical and mechanical characteristics of earth concrete," *Jordan J. Civ. Eng.*, vol. 15, no. 4, pp. 597-610, 2021.
- [54] G. Varas, "Influencia de los tipos de cal y proporción en morteros para la conservación sobre la compresión, contracción, densidad, absorción y fraguado, Trujillo 2018.," 2018.
- [55] Z. Li, Y. Zhang, H. Zhao, H. Chen and R. He, "Structure characteristics and composition of hydration products of coal gasification slag mixed cement and lime," *Construction and Building Materials*, vol. 213, pp. 265-274, 2019.