

UCLV
Universidad Central
"Marta Abreu" de Las Villas



FC
Facultad de
Construcciones

Departamento de Ingeniería Civil

Trabajo de Diploma

Aumento del contenido de caolinita de una arcilla mediante técnicas de separación mecánica.

Autora: Ledianna Cabrera Sierra.

Tutora: Lic. Karina Duverger Escobar

Santa Clara, noviembre, 2023

Copyright©UCLV

UCLV
Universidad Central
"Marta Abreu" de Las Villas



FC
Facultad de
Construcciones

Academic Department of Civil Engineering

Diploma Thesis

Increasing the kaolinite content of a clay through
mechanical separation techniques

Autor: Ledianna Cabrera Sierra.

Tutora: Lic. Karina Duverger Escobar

Santa Clara, november, 2023

Copyright©UCLV

Este documento es Propiedad Patrimonial de la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, y se encuentra depositado en los fondos de la Biblioteca Universitaria "Chiqui Gómez Lubian" subordinada a la Dirección de Información Científico Técnica de la mencionada casa de altos estudios.

Se autoriza su utilización bajo la licencia siguiente:

Atribución- No Comercial- Compartir Igual



Para cualquier información contacte con:

Dirección de Información Científico Técnica. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Carretera a Camajuaní. Km 5½. Santa Clara. Villa Clara. Cuba. CP. 54 830

Teléfonos.: +53 01 42281503-1419



ACTA DE CONFORMIDAD PARA ESTUDIANTES DE PREGRADO

Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas

Por una parte: Ledianna Cabrera Sierra estudiante de la carrera de: Ingeniería Civil en la facultad de: Construcciones en lo adelante **EL ESTUDIANTE**. Con número de identidad permanente: 01070570498 o pasaporte: - Y por otra parte Armando J Velázquez Rangel, jefe del Departamento Docente de: Ingeniería Civil en la ya mencionada facultad, en lo adelante **EL JEFE DE DEPARTAMENTO**, y Lic. Karina Duverger Escobar profesor encargado de tutorar el Trabajo de Diploma **DEL ESTUDIANTE**, en lo adelante **EL TUTOR**.

Reconocen que:

- I. A **EL ESTUDIANTE** se le ha aprobado como tema de investigación para su Trabajo de Diploma titulado: Aumento del contenido de caolinita de una arcilla mediante técnicas de separación mecánica.
- II. **EL ESTUDIANTE** no divulgará información concerniente a la investigación, tanto durante el desarrollo como tras la culminación de esta sin la debida autorización **DEL TUTOR** o **EL JEFE DE DEPARTAMENTO**.
- III. Que el Trabajo de Diploma fruto de la labor investigativa de **EL ESTUDIANTE** y la asesoría de **EL TUTOR**, resulta de **TITULARIDAD EXCLUSIVA** de la Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas.
- IV. **EL ESTUDIANTE** una vez aprobada su tesis para la defensa, depositará una copia electrónica de la misma en el Repositorio Digital Institucional de la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
- V. A partir de la defensa y aprobación del Trabajo de Diploma, la publicación total, parcial o la elaboración de cualquier obra que se derive de esta investigación por parte de **EL ESTUDIANTE**, contará con la coautoría de **EL TUTOR** y viceversa, resultando de referencia obligada esta obra en cualquier otra que se elabore. El incumplimiento de esta cláusula, puede llevar consigo el inicio de procesos de plagio. Todo lo anterior de acuerdo a la normativa de Derecho de Autor vigente en Cuba.

Y para que así conste se firma la presente en la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, a los 27 días del mes de noviembre del año 2023

EL ESTUDIANTE

JEFE DE DEPARTAMENTO

TUTOR

CONSULTANTE

CITA

“La ciencia es el gran antídoto contra el veneno del entusiasmo y la superstición.”

Adam Smith.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo de diploma a la estrella más linda y brillante que tiene el cielo “Mi abuelita querida “pues fuiste siempre el motor impulsor para lograr esta gran meta y porque sé que donde quiera que estés estarías orgullosa de tu niña.

Agradecimientos

Primero que todo agradecer a mis padres, por su amor y dedicación, por ayudarme a cumplir mis sueños sin importar el momento, el lugar ni el tiempo, por siempre estar a mi lado y guiarme en este momento de mi vida.

A toda mi familia en general por cada momento de apoyo y preocupación, por darme siempre la mano cuando los necesite.

A las amigas que me regalo esta etapa de mi vida: Leidy, Dariana y Klenia mis compañeras en los momentos de felicidad y alegría, pero también en los de incertidumbre y tristezas. Gracias por los momentos inolvidables que me han regalado estos últimos años, pero tengan por seguro que, aunque la vida nos lleve por caminos diferentes las querré siempre.

A Yelenny y Aniel por su apoyo incondicional durante estos cuatro años de carrera, por su paciencia, dedicación y ánimo para cada examen.

A Alejandro Fernández por ser ese amigo que llega en el momento preciso y te ayuda a superar los obstáculos que creías que nunca superarías. Gracias por tu paciencia y perseverancia, por esa gota de aliento cada vez que la necesite.

A todos los profesores que contribuyeron a mi formación como profesional por brindarme todos sus conocimientos.

A mi tutora Karina Duverger por dedicarme su tiempo y apoyarme en esta etapa tan difícil, por brindarme su sabiduría y conocimientos.

A la Universidad Central Marta Abreu de Las Villas por ofrecerme la oportunidad de ser una profesional y por regalarme los años más espectaculares de mi vida.

En general a todo aquel que en algún momento estuvo presente en esta etapa e hicieron posible que lograra esta gran meta.

Resumen

En el presente trabajo se desarrollan formulaciones de cementos ternarios con bajo contenido de carbono, donde están compuestos por 50% de Cemento Portland Ordinario (CPO), 30% de arcilla calcinada, 15% de piedra caliza y un 5% de yeso para el ajuste del contenido de sulfatos. Las arcillas utilizadas fueron las arcillas de Zimbabue, la cual fue caracterizada por diferentes métodos tales como: Florescencia de rayos X, Difracción de rayos X, Análisis termogravimétrico y Distribución del tamaño de partícula. Las fracciones arcillosas fueron activadas térmicamente a temperaturas que oscilaron entre los 700 y 800 °C. Para la evaluación de la reactividad puzolánica se realizarán ensayos de resistencia a la compresión en morteros de estas formulaciones y el protocolo R3.

Palabras claves: formulaciones, arcillas, temperatura, reactividad, puzolánica, resistencia.

Abstract

In the present work, formulations of ternary cements with low carbon content are developed, where they are composed of 50% Ordinary Portland Cement (CPO), 30% calcined clay, 15% limestone and 5% gypsum for adjustment. of sulfate content. The clays used were Zimbabwe clays, which were characterized by different methods such as: X-ray florescence, X-ray diffraction, Thermogravimetric analysis and Particle size distribution. The clay fractions were thermally activated at temperatures ranging between 700 and 800 °C. To evaluate pozzolanic reactivity, compressive strength tests will be carried out on mortars of these formulations, while the R3 protocol will be used for rheological behavior.

Keywords: formulations, clays, temperature, reactivity, pozzolanic, endurance.

INDICE

Introducción:	11
CAPÍTULO 1: Las arcillas calcinadas como fuente de cementos ternarios.	15
1.1 Generalidades del cemento Portland. Contexto actual.	15
1.2 Influencia de las producciones de cemento al medio ambiente.	16
1.2.1 Medidas para prevenir el impacto ambiental.	17
1.3 Las puzolanas como fuente de materiales cementicios.	18
1.4 Las arcillas calcinadas. Empleo en las producciones de cementos.	19
1.5 Influencia de la calcinación en propiedades de las arcillas calcinadas. ..	21
1.6 Evaluación de la reactividad puzolánica.	22
1.6.1 R3	22
1.6.2 Resistencia mecánica.	23
1.7 Actualidad de las arcillas en las producciones industriales.	23
Conclusiones parciales:	24
Capítulo 2: Técnicas y métodos empleados en la caracterización de las arcillas.	26
2.1 Características de las arcillas.	26
2.1.1 Arcillas de Zimbabue.	27
2.2 Métodos empleados. Características.	27
2.2.1 Florescencia de rayos X.	27
2.2.2 Difracción de rayos X.	28
2.2.3 Análisis termogravimétrico.	29
2.3 Procesamiento de la muestra.	31
2.3.1 Separación de fracciones mediante tamizado mecánico.	31
2.3.2 Activación térmica.	31
2.4 Reactividad puzolánica. Métodos.	32
2.4.1 Protocolo R3.	33
2.4.2 Resistencia mecánica.	33
Capítulo 3: Caracterización de las arcillas y evaluación de la reactividad puzolánica.	35
3.1 Caracterización mineralógica.	35
3.2 Composición mineralógica de la arcilla.	36
3.3 Evaluación de la reactividad puzolánica	37
Conclusiones parciales:	40
Recomendaciones:	41
Bibliografía	42

Introducción:

Las construcciones en el mundo son un fenómeno que ha moldeado la historia de la humanidad y ha dejado una marca indeleble en nuestro entorno. Desde las antiguas pirámides de Egipto hasta los modernos rascacielos de Dubái, las construcciones han sido testigos del ingenio, la creatividad y el progreso de la civilización. Estas estructuras emblemáticas, ya sean monumentales o funcionales, han sido el resultado de la combinación de habilidades técnicas, recursos disponibles, influencias culturales y avances tecnológicos. En la creación de estructuras duraderas y funcionales los materiales de construcción desempeñan un rol importante debido a que son los principales elementos componentes de las misas, adaptándolos a las características geográficas, climáticas y culturales de las distintas regiones del mundo.

El Cemento Portland Ordinario (CPO) debido a sus buenas prestaciones, su flexibilidad y amplia disponibilidad es considerado el material más usado en la industria de la construcción y uno de los principales contribuidores del continuo crecimiento de la sociedad (Moya, 2022). El cemento tiene varias propiedades importantes que lo hacen adecuado para la construcción, es un material aglutinante, lo que significa que tiene la capacidad de unir otros materiales, como arena, grava y agregados, para formar una masa sólida y resistente. Además, el cemento es resistente a la compresión, lo que lo hace adecuado para soportar cargas pesadas. También es duradero y puede resistir la exposición a condiciones climáticas adversas y al paso del tiempo. Sin embargo, la producción de cemento tiene un alto impacto ambiental debido a las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) durante el proceso de calcinación del clinker. La producción de cemento es responsable de aproximadamente el 8 % de las emisiones globales de CO₂, lo que contribuye al cambio climático. En respuesta a esto, se han desarrollado variantes más sostenibles de cemento, como el cemento de bajo contenido de carbono, que utiliza menos clinker en su producción, y el cemento geopolimérico, que utiliza materiales alternativos en lugar de clinker.

El cemento LC3 es una variante de cemento que ha ganado atención en la industria de la construcción debido a su potencial para reducir las emisiones de CO₂ en comparación con el cemento Portland convencional. LC3 es el acrónimo de "Limestone Calcined Clay Cement" en inglés, que se traduce como "Cemento de Caliza y Arcilla Calcada" en español. Se caracteriza por utilizar un mayor porcentaje de arcilla calcinada y una menor cantidad de clinker en su composición, lo que lo hace más sostenible en términos de emisiones de CO₂. El proceso de fabricación del cemento LC3 implica la calcinación de

arcilla y piedra caliza a temperaturas más bajas en comparación con la producción de cemento Portland convencional, lo que resulta en una reducción significativa de las emisiones de CO₂. Además, la arcilla utilizada en el proceso de fabricación del LC3 es una arcilla no tradicional que suele tener un menor contenido de carbonato de calcio, lo que también contribuye a la reducción de emisiones de CO₂.

LC3 ofrece propiedades mecánicas equivalentes en comparación con el cemento Portland, al tiempo que mejora otros aspectos como la durabilidad y la disminución de la huella de carbono del hormigón en al menos un 30% en comparación con el cemento normal (Scrivener, et al., 2018). Estudios anteriores han demostrado que la cantidad de caolinita en el la fracción de arcilla calcinada es el factor principal que controla la resistencia de Cementos LC3. Además, se ha establecido que alrededor del 40% se requiere un contenido de caolinita para lograr el mismo rendimiento que el cemento Portland normal a los 7 días (Avet & Scrivener, 2018). En algunas regiones, la cantidad de caolinita en las arcillas disponibles es en general menor y se presentan entremezclados con otras arcillas 2:1 menos reactivas (como montmorillonita e illita) y minerales asociados (Fernandez, et al., 2011). Por lo tanto, su posible idoneidad para su uso en mezclas de alto rendimiento cementos está comprometido (Zunino & Scrivener, 2020).

El cemento LC3 utiliza arcillas calcinadas como uno de sus principales ingredientes. Estas arcillas son una mezcla de arcillas naturales que se extraen de canteras y luego son sometidas a un proceso de calcinación, que implica la cocción a altas temperaturas (aproximadamente entre 800°C y 900°C) en hornos especiales. Durante la calcinación, las arcillas experimentan una serie de transformaciones químicas y físicas que las convierten en un material adecuado para la fabricación de cemento. Estas suelen ser arcillas de baja calidad o marginales, que generalmente no son aptas para la fabricación de cemento Portland convencional, las mismas pueden contener impurezas, como óxidos de hierro, carbonato de calcio y otros minerales, que les dan características especiales después de la calcinación.

La producción de cemento que contiene arcillas calcinadas requiere arcillas caoliníticas de composición heterogénea cuyo contenido de caolinita sea superior al 40%, de no ser así es interés del productor aumentar el contenido de caolinita mediante técnicas de separación para extraer posibles fases, sin afectar la reactividad de la arcilla calcinada al final del proceso. Dependiendo de su origen, las arcillas pueden tener diferentes composiciones mineralógicas que incluyen no solo arcillas del grupo del caolín sino también otros componentes: como arcillas 2:1, cuarzos y otros.

Uno de los tipos de arcilla más comunes utilizados en el cemento LC3 es la arcilla caolinítica, esta es marginal y de baja calidad. Las fases caoliníticas de la arcilla se vuelven muy activa después de la calcinación, lo que significa que tiene una alta capacidad para reaccionar con otros compuestos y formar las fases cementicias del LC3, que son las responsables de las propiedades de endurecimiento y resistencia del cemento.

Las arcillas caoliníticas tienen la ventaja de ser muy abundantes en todo el planeta, pero ocurre especialmente en la faja tropical del planeta, debido a su origen geológico, que es exactamente dónde está la principal producción de cementos (Escobar, 2018). Otro aspecto positivo es que se pueden aprovechar minas existentes de caolín que han sido explotadas en el pasado, por ejemplo, para la producción de porcelanas o para la producción de algunos tipos de cerámicas. Esto constituye una oportunidad de poder dar vida a minas abandonadas, las cuales pueden retomar su explotación, y disminuir el impacto ambiental de los desechos de la explotación minera (Maria S, 2016). Sin embargo, una buena parte de las arcillas caoliníticas están en depósitos originarios con estructuras muy heterogéneas, por lo que necesitan ser mejor estudiados (Casales Hernandez, 2017).

En Cuba existe un Centro de Investigación y Desarrollo de Estructuras y Materiales (CIDEM) ubicado en la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, en la provincia de Villa Clara, dicho centro ha realizado estudios sobre la utilización de arcillas como fuente de materiales cementicios suplementarios para la producción de cementos de bajo carbono, cuyo propósito es reducir la cantidad de emisiones de CO₂ en la producción del cemento. Sin embargo, el estudio sobre el contenido de caolinita que poseen las arcillas de diferente distribución geográfica, resulta de aparente necesidad para llevar a cabo la producción del LC3 con una mayor eficacia y sustentabilidad.

En consecuencia, se plantea el siguiente **problema científico**: ¿Cómo aumentar el contenido de caolinita de una arcilla mediante técnicas de separación mecánica?

Objeto de investigación: Arcillas de un yacimiento de Zimbabue.

Campo de acción: Comportamiento de la reactividad puzolánicas de las arcillas calcinadas provenientes de un yacimiento en Zimbabue.

Objetivo General: Evaluar la reactividad puzolánica de las fracciones de arcilla calcinada obtenidas por tamizado mecánico.

Objetivos específicos:

- Caracterizar las arcillas naturales provenientes de un yacimiento de Zimbabue.
- Separar por fracciones la arcilla calcinada utilizando tamizado mecánico.

- Evaluar la reactividad puzolánica de las fracciones de arcilla calcinada obtenidas por tamizado mecánico.

Hipótesis: Las distintas fracciones de una arcilla obtenidas mediante tamizado mecánico poseen diferente reactividad puzolánica influenciado por la composición química de dicha fracción.

Novedad científica: Se basa esencialmente en el estrecho vínculo con la política estratégica trazada por el MICONS para el estudio y evaluación de diferentes materias primas, como fuentes de materiales cementicios suplementarios y contribuir a la reducción del contenido de clinker en los cementos. Con ello se logra de cierta manera favorecer el ahorro de recursos económicos y energéticos, así como satisfacer la alta demanda de dicho material. Desarrollar tecnologías, estudios y procesos que garanticen una utilización adecuada de las materias primas y recursos naturales en nuestro país, potenciar el uso de materiales que contribuyan a mitigar los impactos ambientales y fortalecer el desarrollo de la industria de materiales de la construcción, constituyen sectores estratégicos definidos en el Plan Nacional de Desarrollo Económico y Social hasta el 2030.

Aportes prácticos: en esta investigación se destaca que el estudio realizado permite elevar el grado de conocimiento sobre el impacto de la calcinación en las propiedades de las arcillas de Zimbabue con el fin de obtener cementos de altas prestaciones, con un bajo impacto ambiental. Además, con los resultados de este trabajo, se amplían los conocimientos relativos al efecto de las condiciones de calcinación en la reactividad puzolánica de los productos de calcinación y, de esta forma, diseñar estrategias que permitan obtener la máxima reactividad puzolánica de dichos productos.

CAPÍTULO 1: Las arcillas calcinadas como fuente de cementos ternarios.

Las arcillas están ampliamente distribuidas como constituyente esencial de los suelos y sedimentos, debido a que son mayoritariamente los productos finales de los distintos procesos de degradación de los aluminosilicatos formados a mayores presiones y temperaturas y que constituyen más del 70 % de la corteza terrestre. Cuando están presentes en gran cantidad se presentan bajo la forma de rocas arcillosa (Casales Hernandez, 2017).

Las arcillas calcinadas pueden ser una fuente valiosa de material suplementario para la producción de cementos ternarios, los cuales ofrecen una serie de beneficios en comparación con el cemento Portland convencional. Por ejemplo, pueden mejorar la resistencia a largo plazo del cemento, reducir la permeabilidad y la retracción, y mejorar la durabilidad en general. Además, como se utilizan menos materiales cementantes convencionales, los cementos ternarios pueden reducir significativamente las emisiones de dióxido de carbono asociadas con la producción de cemento.

1.1 Generalidades del cemento Portland. Contexto actual.

El cemento Portland (CPO) se encuentra entre los materiales más empleados y con mayor nivel de producción a nivel mundial (más de 2500 millones de toneladas en el 2006). A pesar de sus relativamente bajos consumos energéticos por tonelada de material en comparación con otros materiales de construcción, sus altos volúmenes de producción lo hacen responsable de cerca del 7% de las emisiones de CO₂ de origen antropogénico a nivel mundial y del 5% del consumo de energía en el sector industrial. Sus demostradas ventajas como material de construcción y su necesaria demanda para el desarrollo socioeconómico contrastan con su negativo impacto medioambiental (Alujas, 2010).

En la elaboración del CPO, la producción de clínquer representa el mayor consumo de energía y es responsable también de los mayores volúmenes de emisiones de CO₂, ya que más del 50% del CO₂ liberado se debe a la descomposición de la caliza durante el proceso de fabricación del clínquer. Mientras la implementación de procesos y tecnologías más eficientes ha logrado reducir parcialmente el resto de las emisiones, correspondientes principalmente a la quema del combustible, la contribución asociada a la fabricación del clínquer ha mantenido un crecimiento constante, paralelo al incremento en la producción de CPO, con el consiguiente impacto ambiental. El reemplazo de una porción de clínquer con materiales cementicios suplementarios está reconocida como la manera más efectiva de reducir las emisiones de CO₂ y disminuir los gastos energéticos asociados a la producción del cemento, al mismo tiempo que

puede mejorarse o mantenerse la resistencia mecánica y la durabilidad del hormigón (Alujas, 2010).

1.2 Influencia de las producciones de cemento al medio ambiente.

La producción de CPO lleva asociada una huella ecológica inherente a sus procesos de obtención. La mayor contribución se debe a la generación de dióxido de carbono (CO_2), asociado a la descarbonatación de las materias primas utilizadas en el proceso de fabricación del cemento y el uso de combustibles fósiles como fuentes de energía directa e indirecta (Vizcaino Andrés , 2014)

La producción de cemento trae consigo varios impactos ambientales negativos, entre los que incluyen los siguientes:

1-Emisiones de gases de efecto invernadero: la producción de cemento es una de las principales fuentes de emisiones de dióxido de carbono (CO_2) en todo el mundo. El proceso de producción de cemento implica la liberación de grandes cantidades de CO_2 a la atmósfera debido a la combustión de combustibles fósiles como el carbón y el petróleo para alimentar los hornos de cemento.

2-Consumo de energía y recursos naturales: la producción de cemento requiere grandes cantidades de energía y recursos naturales, como la piedra caliza y la arcilla, que se extraen de canteras y minas. Esta extracción puede tener un impacto negativo en los ecosistemas locales y puede causar la pérdida de hábitats naturales y la degradación del suelo.

3-Emisiones de otros gases de efecto invernadero: además del CO_2 , la producción de cemento también puede liberar otros gases de efecto invernadero, como el óxido nitroso y el metano, que contribuyen al calentamiento global.

4-Contaminación del aire: la producción de cemento también puede contribuir a la contaminación del aire mediante la emisión de partículas en suspensión y gases nocivos, como el dióxido de azufre y el óxido de nitrógeno.

5-Contaminación del agua: la producción de cemento también puede tener un impacto negativo en la calidad del agua mediante la liberación de productos químicos y otros contaminantes en los cuerpos de agua cercanos.

6-Generación de residuos: la producción de cemento también puede generar grandes cantidades de residuos, como cenizas volantes y lodos de depuración, que pueden ser difíciles de gestionar y pueden tener un impacto negativo en el medio ambiente.

En resumen, la producción de cemento puede tener varios impactos ambientales negativos, incluyendo la emisión de gases de efecto invernadero, la contaminación del aire y del agua, la generación de residuos y la extracción de recursos naturales. Se están desarrollando diversas estrategias para reducir el impacto ambiental de la producción de cemento, incluyendo el uso de materiales suplementarios como las arcillas calcinadas y la adopción de tecnologías más eficientes y sostenibles

1.2.1 Medidas para prevenir el impacto ambiental.

Debido a la gran influencia negativa que tienen las producciones de cementos se han propuesto medidas para contrarrestar dichos efectos en las que podemos mencionar las siguientes:

1-Uso de materiales suplementarios: el uso de materiales suplementarios como las arcillas calcinadas puede reducir la cantidad de clínker necesario para producir cemento, lo que a su vez reduce las emisiones de dióxido de carbono y la extracción de recursos naturales.

2-Mejoras en la eficiencia energética: se están desarrollando tecnologías más eficientes para la producción de cemento, como el uso de hornos de cemento más eficientes y la recuperación de calor residual para generar energía adicional.

3-Uso de combustibles alternativos: en lugar de utilizar combustibles fósiles como el carbón y el petróleo, se están utilizando combustibles alternativos como residuos de madera, neumáticos y aceites usados.

4-Reciclaje de residuos: se están desarrollando tecnologías para reciclar los residuos generados durante la producción de cemento, como las cenizas volantes y los lodos de depuración.

5-Reducción de emisiones de gases de efecto invernadero: se están desarrollando tecnologías para capturar y almacenar el dióxido de carbono generado durante la producción de cemento, lo que puede reducir significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero.

6-Mejoras en la gestión de residuos: se están desarrollando tecnologías para gestionar de manera más efectiva los residuos generados durante la producción de cemento, como el uso de técnicas de reciclaje y la eliminación segura de residuos peligrosos.

En resumen, se están tomando diversas medidas para reducir los impactos ambientales de la producción de cemento, incluyendo el uso de materiales suplementarios, mejoras en la eficiencia energética, el uso de combustibles alternativos, el reciclaje de residuos,

la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y mejoras en la gestión de residuos.

1.3 Las puzolanas como fuente de materiales cementicios.

Debido a la gran contaminación ambiental y a los gastos económicos que genera la producción del cemento se ha hecho necesaria la implementación y uso de materiales suplementarios. Los materiales cementicios suplementarios (MCS) son compuestos que contribuyen en las propiedades de una mezcla cementicia a través de la actividad hidráulica, puzolánica o ambas. Se conoce como material hidráulico a aquellos que reaccionan directamente con agua y forman hidratos con propiedades cementantes (Moya, 2022). Los materiales puzolánicos son una subcategoría dentro de los MCS, de acuerdo con la norma ASTM C618-03 se define como puzolanas a aquellos productos naturales o artificiales, silíceos o aluminosilíceos que, por sí mismos, poseen poca o ninguna propiedad aglomerante, pero que, finamente molidos y en presencia de agua, reaccionan químicamente con el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ a temperatura ambiente para formar compuestos con propiedades cementantes. Bajo esta definición se engloban materiales de muy diferente naturaleza, que van desde rocas y sedimentos a residuos industriales o agrícolas y arcillas calcinadas (Alujas, 2010).

De acuerdo a las especificaciones de la norma ASTM C618-03 para cenizas volantes y puzolanas naturales o artificiales y su empleo en hormigones, la composición química debe ser tal que la suma de los óxidos de Si, Al y Fe expresados como por ciento en masa, sea superior al 70%. Este requerimiento es seguido por otras especificaciones de las propiedades físicas que deben presentar los morteros con sustitución puzolánica (Alujas, 2010).

Las puzolanas naturales más comunes son las cenizas volcánicas, tobas zeolíticas y tierras de diatomeas (Betancourt, 1997). A pesar de presentar una gran variedad, las puzolanas naturales pasan por el problema de la disponibilidad, ya que no se encuentran distribuidas de manera uniforme sobre la corteza terrestre (Moya, 2022)

En el grupo de puzolanas artificiales se encuentran las pizarras, arcillas calcinadas, los residuos de productos cerámicos, así como las cenizas provenientes de procesos agrícolas como las de cáscara de arroz y las de bagazo de caña (Betancourt, 1997). También incluye los subproductos o desechos de procesos industriales como son las cenizas volantes pulverizadas (PFA, por sus siglas en inglés), las escorias granuladas de alto horno (GBFS), y el humo de sílice (SF) (Casales Hernandez, 2017).

El uso de puzolanas en la producción de cementos trae consigo ciertos beneficios como:

1-Reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero: La reducción de la cantidad de clinker necesario para producir cemento mediante el uso de puzolanas puede llevar a una reducción en las emisiones de gases de efecto invernadero, especialmente dióxido de carbono. Además, el uso de puzolanas puede reducir la cantidad de energía necesaria para producir cemento, lo que también puede disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero.

2-Disminución de la generación de desechos: El uso de puzolanas como material suplementario en la producción de cemento puede disminuir la cantidad de desechos generados durante la producción de clinker, lo que puede ser beneficioso para el medio ambiente.

3-Reducción de la cantidad de clinker necesario: El uso de puzolanas como sustituto parcial del clinker puede reducir la cantidad de clinker necesario para producir cemento. Esto es beneficioso porque la producción de clinker es una fuente importante de emisiones de gases de efecto invernadero, especialmente dióxido de carbono (CO₂).

4-Mejora de las propiedades del cemento: Las puzolanas pueden mejorar las propiedades del cemento, como la resistencia a la compresión, la durabilidad y la resistencia química. Esto puede hacer que el cemento sea más adecuado para ciertas aplicaciones y mejorar su vida útil.

5-Reducción de la energía necesaria para producir cemento: El uso de puzolanas puede reducir la cantidad de energía necesaria para producir cemento. Esto se debe a que las puzolanas tienen una menor cantidad de cal que el clinker, lo que significa que es necesaria menos energía para su producción.

1.4 Las arcillas calcinadas. Empleo en las producciones de cementos.

Actualmente, uno de los materiales cementicios suplementarios más estudiados y usados lo constituyen las arcillas calcinadas en forma de metacaolín (MK), que se utiliza en la producción de cemento como sustituto parcial del clinker. Las arcillas calcinadas son arcillas naturales que se someten a un proceso de calcinación en un horno a altas temperaturas (generalmente entre 700 y 900 grados Celsius) para eliminar la materia orgánica y producir un material con un alto contenido de aluminato y silicato.

Las arcillas calcinadas se comportan como puzolanas en presencia de agua, reaccionan con el hidróxido de calcio procedente de la hidratación del cemento Portland (CPO) a temperatura ambiente, dando lugar a compuestos insolubles y estables que actúan como conglomerantes hidráulicos (Tironi, 2013).

Luego de la calcinación, las arcillas se han reconocido como muy buenas puzolanas, ya que estas generan un incremento en la durabilidad y en la resistencia a compresión en morteros y hormigones. Sin embargo, los datos reportados por diferentes autores muestran una diversidad tan amplia que hace complejo su modelación. La evidencia muestra que el proceso térmico modifica todas las características del material crudo, generando una amplia variabilidad en la respuesta de las arcillas calcinadas; impidiendo que esta pueda ser atribuida solamente al contenido inicial de caolinita (Moya, 2022).

Las arcillas caolinitas son un tipo de arcilla natural que se utiliza como material suplementario en la producción de cemento. Estas arcillas tienen una estructura cristalina en capas y suelen tener un color blanco o amarillento. Al someter las arcillas caolinitas a un proceso de calcinación a altas temperaturas, se produce una arcilla calcinada que se utiliza como sustituto parcial del clínker en la producción de cemento. La arcilla calcinada a partir de arcillas caolinitas se conoce como metacaolín.

El metacaolín producido a partir de la calcinación de arcillas con alto contenido de caolinita y bajo niveles de impurezas, ha constituido otra de las alternativas valoradas como MCS a escala industrial, con prestaciones similares o superiores a las del humo de sílice, las cenizas volantes y la mayoría de las puzolanas naturales (AMBROISE, 1992) Un aspecto negativo del uso del metacaolín es la necesidad de disponer de arcillas puras en mineral caolín como materia prima para su producción, además de los elevados costos de combustible que se necesita en el proceso de producción durante la calcinación. Una buena forma de disminuir estas desventajas sería utilizar arcillas de menor pureza, unido a un eficiente proceso energético de producción durante su calcinación (CASTILLO LARA, 2011) Por tanto, de prestarse una detallada atención a los depósitos con contenidos bajos o moderados de caolinitas; las cuales no pueden ser aprovechadas en las aplicaciones industriales tradicionales, pero sí pueden ser empleadas en la obtención de materiales puzolánicos de bajo costo (Alujas, 2010).

Investigaciones recientes han demostrado que los productos de calcinación de las arcillas, con contenidos de caolinita no inferiores al 40 %, como sustituyentes parciales del clínker es una alternativa viable para obtener un material reactivo similar al metacaolín comercial (Almenares, 2017). Sin embargo, los volúmenes de sustitución del clínker por la arcilla calcinada utilizada no deben superar el 30 %, debido a que establece una competencia entre la generación de Portlandita por parte del clínker y su consumo en la reacción puzolánica de la arcilla calcinada (WBCSD/IEA/CSI, 2018)

La eliminación de algunos de los minerales que acompañan la arcilla podría eventualmente ayudar a enriquecer la caolinita, siempre que esté en una fracción de diferente tamaño. El enriquecimiento mineral es una herramienta clásica en minería

para aplicaciones industriales. Para arcillas muy heterogéneas, donde la caolinita va acompañada de muchas otras fases minerales, eventualmente podría ser una opción aumentar el contenido de caolinita mediante la eliminación de otras fases menos deseadas, como el cuarzo y los minerales arcillosos 2:1 (Alujas, et al., 2022)

Hay referencias de estudios en los que una arcilla con un contenido de caolinita de alrededor del 30% puede enriquecerse mediante separación por aire. Los resultados de este estudio muestran que, durante el proceso de separación del aire, una cantidad significativa de caolinita permaneció en la fracción rechazada (gruesa) después del procesamiento debido a la aglomeración del polvo. Además, la separación del aire debe realizarse con un material seco, y la arcilla normalmente tiene entre un 15 y un 20 % de contenido de humedad en su estado actual, por lo que es necesario secarla. La sedimentación produce un lodo con una proporción de agua a sólido de alrededor de 0,4-0,6, y el material debe secarse según la tecnología de calcinación que se utilizará. En ambos casos se necesita energía para sacar el agua, lo que repercute en el coste del producto calcinado (Alujas, et al., 2022).

La separación por fracciones después de la calcinación de la arcilla es una opción para eliminar las fases poco reactivas y mejorar la calidad de producto final. Una forma de llevar a cabo esta separación es mediante el uso de aire. Ajustando la velocidad de los ventiladores en el proceso de enfriamiento, es posible separar las diferentes fracciones según densidad y tamaño. Las partículas más pesadas tienden a caer más rápidamente, mientras que las partículas ligeras pueden ser arrastradas por el aire, siendo posible separar las fracciones indeseadas y obtener un material deseado. Este método es una opción rentable, ya que no requiere el uso de equipos costosos o productos químicos adicionales.

1.5 Influencia de la calcinación en propiedades de las arcillas calcinadas.

La activación térmica de las arcillas es un proceso clave para mejorar sus propiedades y rendimiento en los materiales de construcción. A través de altas temperaturas, se pueden activar los componentes de las arcillas, lo que resulta en una mayor capacidad de adhesión y resistencia en los materiales finales.

La calcinación es un proceso térmico que se utiliza para transformar las arcillas en una forma de arcilla más reactiva conocida como "metacaolín". Durante la calcinación, la arcilla se somete a altas temperaturas (normalmente entre 600 y 800 grados Celsius)

en un horno. Este proceso provoca cambios en la estructura cristalina de la arcilla, lo que la hace más reactiva y mejora sus propiedades.

La calcinación de las arcillas puede mejorar sus propiedades físicas y químicas, incluyendo:

1-Aumento de la reactividad: La calcinación aumenta la reactividad de la arcilla, lo que significa que puede reaccionar más fácilmente con otros materiales en la mezcla de cemento para producir compuestos cementicios. Esto puede mejorar la resistencia mecánica y la durabilidad del cemento.

2-Reducción de la porosidad: La calcinación puede reducir la porosidad de la arcilla, lo que mejora su capacidad para retener agua y reduce su susceptibilidad a la carbonatación.

3-Mejora de la blancura: La calcinación también puede mejorar la blancura de la arcilla, lo que puede ser importante en algunas aplicaciones.

4-Eliminación de la materia orgánica: Durante la calcinación, se quema la materia orgánica presente en la arcilla, lo que reduce el contenido de carbono orgánico y mejora la estabilidad térmica de la arcilla.

En resumen, la calcinación de las arcillas puede mejorar significativamente sus propiedades, lo que las convierte en una materia prima valiosa para su uso en la producción de cemento y otros materiales de construcción.

1.6 Evaluación de la reactividad puzolánica.

Existen diversos métodos para evaluar la reactividad puzolánica, casi todos basados en la medición durante un intervalo de tiempo más o menos largo de distintas propiedades físicas o químicas directamente relacionadas con la reacción puzolánica. En dependencia de las propiedades a evaluar o de los tiempos de ensayo requeridos, pueden ser empleados sistemas CPO-Puzolana, o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Puzolana, bajo la forma de pastas, morteros u hormigones (Alujas, 2010).

1.6.1 R3

Los ensayos de R3 tienen como objetivo la determinación del agua químicamente ligada en pastas compuestas de SCM, hidróxido de calcio, carbonato de calcio, sulfato de potasio e hidróxido de potasio como medida de la reactividad química del SCM. Este método de prueba se utiliza para evaluar la reactividad química (puzolánica o hidráulica) de los SCM durante un tiempo de curado de 7 días. Los resultados de este método de

prueba se pueden usar para estimar la contribución potencial de un SCM al desarrollo de resistencia u otras propiedades como una menor permeabilidad, cuando se usa con cemento Portland. Sin embargo, los resultados de las pruebas no sustituyen la medición directa de las mismas propiedades del concreto elaborado con ese SCM.

1.6.2 Resistencia mecánica.

Los ensayos de resistencia mecánica tienen como objetivo evaluar la capacidad de un material para soportar cargas o fuerzas sin deformarse o romperse. Estos ensayos son importantes para determinar la resistencia y la durabilidad de los materiales en diferentes aplicaciones y condiciones de uso.

Algunos ensayos comunes de resistencia mecánica incluyen la tracción, compresión, flexión y dureza. Estos ensayos generalmente implican la aplicación de una carga controlada a una muestra de material y la medición de las propiedades mecánicas resultantes, como la resistencia a la tracción, el módulo elástico y la elongación.

Los ensayos de resistencia mecánica son insustituibles, en tanto aportan valiosos datos directamente relacionados con el desempeño del material en la práctica y representan el aporte de todos los factores relacionados con la reacción puzolánica. Sin embargo, por sí solos ofrecen poca información sobre los procesos responsables de la reactividad puzolánica y no pueden ser utilizados como única vía para entender el comportamiento de nuevos materiales puzolánicos. Con este propósito, modernas técnicas de caracterización han ido ganando creciente importancia en el estudio de la reacción puzolánica (Alujas, 2010).

1.7 Actualidad de las arcillas en las producciones industriales.

La utilización de arcillas en las producciones industriales es amplia y diversa, ya que estas tienen propiedades únicas que las hacen ideales para una variedad de aplicaciones. Algunas de las áreas en las que las arcillas se utilizan actualmente son las siguientes:

Industria cerámica: Las arcillas son esenciales en la fabricación de productos cerámicos como ladrillos, tejas, azulejos y vajillas. Las arcillas proporcionan plasticidad al material, lo que facilita su conformado y moldeo, además de contribuir a la resistencia y durabilidad del producto final.

Industria del papel: Las arcillas se utilizan como agentes de carga en la fabricación de papel. Estas mejoran la opacidad, la blancura y la capacidad de impresión del papel, además de actuar como relleno para reducir el consumo de fibras vegetales.

Industria cosmética: Las arcillas se utilizan en la fabricación de productos cosméticos como mascarillas faciales y productos para el cuidado del cabello. Las propiedades absorbentes y purificantes de las arcillas las hacen ideales para eliminar impurezas y exceso de grasa de la piel y el cabello.

Industria farmacéutica: Las arcillas se emplean en la formulación de medicamentos, especialmente en productos tópicos como cremas y ungüentos. Las arcillas tienen propiedades desinfectantes y antiinflamatorias, lo que las hace útiles en el tratamiento de afecciones dermatológicas.

Industria de la construcción: Las arcillas se emplean en la producción de materiales de construcción como adhesivos, morteros y hormigones. Las arcillas expansivas se utilizan en la fabricación de suelos estabilizados para mejorar la resistencia y la compactación del terreno.

En el caso de los adhesivos, las arcillas se utilizan como componentes para mejorar la adherencia de los materiales de construcción, como baldosas y cerámicas, a las superficies. Las arcillas proporcionan propiedades de plasticidad y cohesión, lo que facilita la aplicación y adhesión del material.

En cuanto a los morteros, las arcillas se utilizan como componentes para mejorar la resistencia y la trabajabilidad del mortero. Las arcillas ayudan a mejorar la adhesión entre los componentes del mortero, como la arena y el cemento, lo que contribuye a la durabilidad y resistencia del material.

En el caso de los hormigones, las arcillas se utilizan como aditivos para mejorar las propiedades del hormigón, como la resistencia a la compresión y la durabilidad. Las arcillas actúan como agentes estabilizadores, mejorando la cohesión entre los componentes del hormigón y reduciendo la segregación y el agrietamiento.

Conclusiones parciales:

- La producción de cemento Portland tiene un impacto ambiental significativo debido a la emisión de grandes cantidades de dióxido de carbono durante su proceso de fabricación. Estas emisiones contribuyen al calentamiento global y al cambio climático.
- Las arcillas, por otro lado, pueden ser una alternativa más sostenible en la industria de la construcción. Al utilizar arcillas como aditivos en materiales de construcción, se puede reducir la cantidad de cemento Portland necesario, lo que a su vez reduce las emisiones de dióxido de carbono. Además, las arcillas

pueden tener un bajo contenido de caolinita, lo que las hace aún más sostenibles.

- La activación térmica de las arcillas es un proceso que permite mejorar sus propiedades y rendimiento en materiales de construcción. Este proceso implica someter las arcillas a altas temperaturas, lo que activa sus componentes y mejora su capacidad de adhesión y resistencia. Además, el tamaño de partícula de las arcillas también puede influir en su rendimiento, ya que partículas más finas pueden tener una mayor superficie de contacto y mejorar la cohesión del material final.

Capítulo 2: Técnicas y métodos empleados en la caracterización de las arcillas.

El estudio y caracterización de las arcillas es fundamental en diversos campos como la geología, la cerámica, la industria del petróleo y la ingeniería civil. Para comprender mejor las propiedades y el comportamiento de las arcillas, es necesario emplear diversas técnicas y métodos de análisis. Estas técnicas permiten determinar la composición mineralógica de las arcillas, su estructura cristalina, su capacidad de intercambio catiónico y sus propiedades físicas.

2.1 Características de las arcillas.

La caracterización de las arcillas consta de cuatro etapas:

1- Caracterización química y mineralógica de arcillas crudas: esta caracterización se realiza mediante Fluorescencia de Rayos X (XRF) y la cuantificación de las fases cristalinas se obtienen mediante difracción de rayos X asistida con refinamiento de Rietveld (Rietveld-XRD). Además, también se cuantifica el contenido de caolinita mediante el método del horno. Dependiendo de los resultados obtenidos se podrá concluir que la muestra de arcilla analizada cumple con los requisitos siempre y cuando tenga una suficiente reactividad puzolánica, pues $\% \text{Al}_2\text{O}_3 > 18$, $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2 > 0,3$, las pérdidas por ignición (LOI) a $950\text{ }^\circ\text{C}$ son superiores al 7 %, $(\% \text{Na}_2\text{O} + \% \text{K}_2\text{O}) < 3$ y además CaO, MgO y SO₃ se encuentran por debajo de los límites de referencia. Además, el contenido de caolinita tendrá que estar muy por encima 40 % indicando que esta arcilla tiene muy buenas propiedades para ser utilizada como Cemento Suplementario Material (SCM) una vez activado adecuadamente.

2- Calcinación: el ensayo de calcinación en el caso de las arcillas de Zimbabue se realizó en el laboratorio del CIAP de la Universidad Central de Las Villas y el grado de deshidroxilación fue evaluado por el método del horno, indicando que este material puede ser adecuadamente activado por tratamiento térmico ya que las arcillas pertenecientes al grupo del caolín eran casi completamente deshidroxilado.

3- Fabricación del LC2: se fabricó una adición mineral LC2 moliendo la arcilla calcinada obtenida junto con la piedra caliza y yeso en molino de bolas hasta una finura adecuada.

4- Evaluación de las propiedades mecánicas (resistencia a la compresión) en morteros normalizados: las propiedades mecánicas de los morteros preparados con esta adición de mineral se evaluaron mediante pruebas de resistencia a la compresión (Alujas, et al., 2022)

2.1.1 Arcillas de Zimbabue.

El yacimiento de arcilla de donde proviene la muestra se encuentra ocasionalmente atravesado por rocas ígneas ácidas, así como por intercapas de aglomerados de esquistos muy meteorizados con presencia de óxido de hierro.

Es un típico depósito primario de caolinita desarrollado sobre rocas ácidas que ha sido sometidos a un proceso de lixiviación a través de soluciones hidrotermales que ascendieron a la superficie a través una grieta actualmente rellena de cuarzo de aproximadamente 10-15 m de espesor. La mineralización caolinítica presenta las siguientes características:

- Color crema, gris blanco, gris claro y rosa blanco.
- Inclusiones con fragmentos de cuarzo y guijarros de cuarzo, estos indican un proceso de lixiviación a través de soluciones hidrotermales ácidas con temperaturas de hasta 300 °C a las que la madre roca fue sometida. También se reporta la presencia de alunita.

La información recopilada nos permite especular que estamos en presencia de una temperatura baja depósito arcilloso epitermal, con un sistema de fracturas bien desarrollado en el tiempo y el espacio, que permitió circulación de soluciones hidrotermales en las rocas ácidas de la zona, facilitando así la lixiviación y produciendo caolinización en la parte superior del corte, como lo indica la presencia de fases avanzadas Argílico, donde se encuentra la asociación mineralógica cuarzo + alunita + sericita + minerales arcillosos (caolín) producido. Morfológicamente la mineralización se presenta en vetas desde la superficie hasta la profundidad y en ocasiones, lentes aislados (Alujas Díaz, et al., 2018) (Alujas Díaz, et al., 2020)

2.2 Métodos empleados. Características.

2.2.1 Florescencia de rayos X.

La fluorescencia de rayos X es una técnica analítica utilizada para determinar la composición elemental de una muestra. Se basa en el principio de que cuando una muestra es irradiada con rayos X de alta energía, los átomos presentes en la muestra absorben esta energía y emiten rayos X de menor energía de manera característica.

A continuación, se describen las características y el procedimiento general de la fluorescencia de rayos X:

Características:

1. No destructiva: La técnica de fluorescencia de rayos X no daña la muestra, lo que permite su uso en muestras valiosas o frágiles.

2. Sensibilidad: La fluorescencia de rayos X puede detectar elementos presentes en concentraciones muy bajas, incluso en el rango de partes por millón.
3. Rango de elementos: La técnica puede detectar una amplia gama de elementos, desde el sodio hasta el uranio.
4. Rapidez: La medición de fluorescencia de rayos X puede realizarse en cuestión de minutos, lo que permite un análisis rápido y eficiente.

Procedimiento:

1. Preparación de la muestra: La muestra debe ser preparada adecuadamente para su análisis mediante fluorescencia de rayos X. Esto puede implicar la trituración y molienda de la muestra para obtener un polvo fino y homogéneo, o el montaje de la muestra en forma sólida o líquida, dependiendo del tipo de muestra.
2. Irradiación: La muestra preparada se coloca en un instrumento llamado espectrómetro de fluorescencia de rayos X. La muestra se expone a un haz de rayos X de alta energía generado por un tubo de rayos X. Los rayos X interactúan con los átomos presentes en la muestra, causando la excitación de los electrones de los átomos.
3. Emisión de rayos X: Cuando los electrones excitados vuelven a su estado fundamental, emiten rayos X de energía característica para cada elemento presente en la muestra. Estos rayos X emitidos son detectados por un detector de fluorescencia de rayos X, que registra la energía y la intensidad de los rayos X.
4. Análisis e interpretación de los datos: Los datos obtenidos del espectrómetro de fluorescencia de rayos X se analizan e interpretan utilizando software especializado. Se comparan las energías y las intensidades de los picos de fluorescencia con patrones de referencia para identificar los elementos presentes en la muestra y determinar sus concentraciones.

Es importante tener en cuenta que el procedimiento exacto puede variar dependiendo del instrumento utilizado y el tipo de muestra a analizar. Además, se requiere personal capacitado en la operación del equipo y la interpretación de los resultados para obtener mediciones precisas y confiables.

2.2.2 Difracción de rayos X.

La difracción de rayos X es otra técnica analítica utilizada para determinar la estructura cristalina de una muestra. Se basa en el principio de que cuando una muestra cristalina es irradiada con rayos X, los rayos X son dispersados por los átomos del cristal de manera característica, produciendo un patrón de difracción.

Características:

1. No destructiva: Al igual que la fluorescencia de rayos X, la difracción de rayos X no daña la muestra, lo que permite su uso en muestras valiosas o frágiles.
2. Sensibilidad: La difracción de rayos X puede detectar la presencia de átomos en la estructura cristalina de la muestra y determinar su posición relativa en el cristal.
3. Determinación de la estructura cristalina: La técnica permite determinar la estructura cristalina de la muestra, incluyendo la posición de los átomos en la red cristalina y las distancias entre ellos.
4. Identificación de fases: La difracción de rayos X puede utilizarse para identificar diferentes fases presentes en una muestra, como diferentes formas cristalinas de un compuesto o impurezas cristalinas.

Procedimiento:

1. Preparación de la muestra: Al igual que en la fluorescencia de rayos X, la muestra debe ser preparada adecuadamente para su análisis por difracción de rayos X. Esto puede implicar la trituración y molienda de la muestra para obtener un polvo fino y homogéneo, o el montaje de la muestra en forma sólida o líquida, dependiendo del tipo de muestra.
2. Irradiación: La muestra preparada se coloca en un instrumento llamado difractómetro de rayos X. La muestra se expone a un haz de rayos X que incide sobre el cristal en diferentes ángulos.
3. Difracción: Los rayos X incidentes son dispersados por los átomos en la estructura cristalina de la muestra, produciendo un patrón de difracción en forma de anillos o picos en un detector de rayos X. Estos patrones de difracción son característicos de la estructura cristalina de la muestra.
4. Análisis e interpretación de los datos: Los datos obtenidos del difractómetro de rayos X se analizan e interpretan utilizando software especializado. Se comparan los patrones de difracción obtenidos con patrones de referencia para identificar la estructura cristalina de la muestra y determinar los parámetros cristalográficos, como las distancias entre los átomos en la red cristalina.

2.2.3 Análisis termogravimétrico.

Características del análisis termogravimétrico (ATG):

1. Medición de cambios de masa: El ATG se basa en la medición de los cambios de masa de una muestra a medida que se somete a un programa de calentamiento controlado. Esto permite estudiar la descomposición térmica, la pérdida o ganancia de agua, la oxidación, la deshidratación y otros procesos relacionados con la temperatura.
2. Versatilidad en las muestras: El ATG puede utilizarse para analizar una amplia variedad de muestras, incluyendo sólidos, líquidos y gases. Además, es adecuado para muestras pequeñas o grandes, y puede analizar tanto materiales orgánicos como inorgánicos.
3. Determinación de propiedades térmicas: El ATG permite determinar propiedades térmicas importantes de una muestra, como la temperatura de descomposición, la estabilidad térmica, la entalpía de reacción y la cinética de descomposición.
4. Complementario a otras técnicas: El ATG es una técnica complementaria a otras técnicas analíticas, como la espectroscopia infrarroja (IR) y la espectrometría de masas (MS), ya que puede proporcionar información adicional sobre la composición y estructura molecular de una muestra.

Procedimiento del análisis termogravimétrico:

1. Preparación de la muestra: La muestra debe ser preparada adecuadamente para el análisis termogravimétrico. Esto puede implicar la trituración y molienda de la muestra para obtener un polvo fino y homogéneo, o el montaje de la muestra en forma sólida o líquida, dependiendo del tipo de muestra.
2. Programa de calentamiento: La muestra preparada se coloca en un instrumento llamado termobalanza, que es capaz de controlar y registrar la temperatura y la variación de masa de la muestra. Se establece un programa de calentamiento controlado, en el cual la muestra se calienta gradualmente desde una temperatura inicial hasta una temperatura final.
3. Registro de datos: Durante el programa de calentamiento, la termobalanza registra continuamente la temperatura y la variación de masa de la muestra. Esto permite obtener una curva termogravimétrica, que muestra los cambios de masa en función de la temperatura.
4. Análisis e interpretación de los datos: Los datos obtenidos del análisis termogravimétrico se analizan e interpretan utilizando software especializado. Se pueden identificar los diferentes eventos térmicos que ocurren en la muestra, como la

pérdida de agua, la descomposición térmica, la oxidación, etc. Además, se pueden calcular parámetros termodinámicos y cinéticos para caracterizar estos eventos.

Es importante tener en cuenta que el procedimiento exacto puede variar dependiendo del instrumento utilizado y el tipo de muestra a analizar. Además, se requiere personal capacitado en la operación del equipo y la interpretación de los resultados para obtener resultados precisos y confiables.

2.3 Procesamiento de la muestra.

El tratamiento térmico de la arcilla fue realizado en el laboratorio del CIAP utilizando una mufla de marca Nabertherm. Se calcinaron alrededor de cinco kilogramos de material a temperaturas entre los 750 y 800 °C durante una hora. Previo a la calcinación del material arcilloso en el laboratorio, este fue secado en una estufa a 200 °C durante 24 horas para la eliminación de la humedad natural. Posteriormente la muestra fue tamizada en un grupo de tamices de diferentes tamaños, tamiz 2,36, tamiz 1,00, tamiz 0,600, tamiz 0,300. Las muestras obtenidas en el retenido de cada tamiz fueron molidas en la Planta de Cemento de la UCLV, en un molino planetario con bolas de ágata MB-600 hasta alcanzar una finura aproximada de un 20 % de retenido en el tamiz de 45 µm.

2.3.1 Separación de fracciones mediante tamizado mecánico.

La distribución del tamaño de partícula es una característica importante en muchas industrias, como la farmacéutica, alimentaria, química y de materiales. El tamaño de partícula puede afectar las propiedades físicas y funcionales de los productos, como la solubilidad, la estabilidad, la reactividad y la apariencia. Además, puede existir una distribución uniforme, donde todas las partículas tienen el mismo tamaño, o una distribución más amplia, donde las partículas tienen diferentes tamaños.

Existen diferentes métodos para determinar la distribución del tamaño de partícula, tal es el caso del tamizado mecánico. Donde la muestra debe ser preparada adecuadamente antes del análisis, esto puede implicar la reducción del tamaño de las partículas mediante trituración o molienda, y la eliminación de impurezas o agregados. La muestra preparada se pasa a través de una serie de tamices con aberturas de tamaño graduado, y se pesa la cantidad de material retenido en cada tamiz. Los datos obtenidos del análisis se interpretan para determinar la distribución del tamaño de partícula. Esto puede implicar la construcción de un histograma o un gráfico de distribución acumulativa, que muestra la frecuencia o el porcentaje de partículas en cada rango de tamaño.

2.3.2 Activación térmica.

Los minerales arcillosos no pueden ser empleados como puzolanas en su estado natural. La presencia de estructuras cristalinas estables impide la liberación de sílice y

alúmina como especies químicas capaces de participar en la reacción puzolánica. Su estructura en forma de capas propensas al deslizamiento y al agrietamiento, y la capacidad para inmovilizar grandes cantidades de moléculas de agua en su superficie son factores que pueden afectar de forma negativa la resistencia mecánica y la reología en un material cementicio, mientras que su alta capacidad de adsorción de iones puede modificar la composición química de las soluciones acuosas, afectando las propiedades tecnológicas del hormigón (Muller, 2005). Por lo tanto, las arcillas deben modificarse estructuralmente para ser empleadas como materiales puzolánicos (Escobar, 2018).

La activación de un mineral arcilloso se refiere al proceso de lograr, a partir de la remoción de los OH^- estructurales, la ruptura de los enlaces químicos y la desestabilización resultante de la estructura cristalina, un material con una reactividad química tal que le permita ser empleado como puzolana. El proceso de activación puede hacerse a través de medios mecánicos, químicos o térmicos, dentro de los cuales es la activación térmica la forma más efectiva y empleada para modificar la estructura cristalina de las arcillas y alcanzar el máximo potencial de reactividad puzolánica (Shi, 2001) (Escobar, 2018).

La activación térmica después del tamizado de la arcilla es un paso crucial en el proceso de preparación de la arcilla, ya que mediante este proceso se garantiza que la arcilla tenga las propiedades necesarias para su uso en la producción de materiales de la construcción. Pues en este se elimina la humedad presente en las arcillas y mejora su estabilidad, se descomponen las materias orgánicas lo que puede mejorar la pureza del material arcilloso, se efectúan cambios en la estructura cristalina y aumenta la reactividad lo que las hace adecuadas para su uso en procesos químicos y catalíticos.

2.4 Reactividad puzolánica. Métodos.

La reactividad puzolánica se refiere a la capacidad de ciertos materiales, como: las cenizas volantes, la sílice amorfa, la metacaolinita, entre otros para reaccionar con el hidróxido de calcio en presencia de agua y formar compuestos con propiedades cementicias.

Existen diversos métodos para evaluar la reactividad puzolánica, casi todos basados en la medición durante un intervalo de tiempo más o menos largo de distintas propiedades físicas o químicas directamente relacionadas con la reacción puzolánica. En dependencia de las propiedades a evaluar o de los tiempos de ensayo requeridos, pueden ser empleados sistemas CPO-Puzolana, o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Puzolana, bajo la forma de pastas, morteros u hormigones (Alujas, 2010).

2.4.1 Protocolo R3.

En la realización de este método se utiliza una técnica alternativa basada en la determinación del agua ligada debido a que no todos los laboratorios están equipados con un calorímetro isométrico. Esta técnica se basa en la preparación de una pasta con la proporción de sólido/ líquido de 1: 1,2; donde el sólido se forma con una proporción de 1: 3 de arcilla e hidróxido de calcio y la muestra líquida con hidróxido de potasio y sulfato de potasio (para un litro de agua se le agregan 4g de hidróxido de potasio y 20g de sulfato de potasio). Luego de tener preparadas estas proporciones se mezclaron en un mezclador de alto cizallamiento a 1600 ± 50 r/min durante 2min para lograr una pasta homogénea. La mezcla obtenida fue colocada en recipientes con tapas de tal forma que quedaran herméticamente cerradas, se le realizaron a cada muestra dos réplicas y posteriormente fueron colocadas en una estufa a 40°C durante una semana. Al transcurrir este intervalo de tiempo fueron extraídas y pulverizadas para ser colocadas en una mufla a 200°C por dos horas. Se pesaron las muestras con una balanza analítica de 0.001g de precisión y se realizó otra medición de las mismas muestras a 400°C por dos horas.

Luego de las mediciones se calculó el contenido de agua químicamente ligada, en g por 100 g de pasta secada a 40°C , por la ecuación (ASTM C1897-20, 2020):

$$\text{H}_2\text{O}_{\text{ligada, seca}} = \frac{w_0 - w_h}{w_0 - w_c} \times 100$$

Donde:

w_0 : masa total de la muestra seca y el crisol.

w_c : masa del crisol vacío y enfriado.

w_h : masa total de la pasta calentada y en el crisol.

2.4.2 Resistencia mecánica.

En las arcillas calcinadas se evaluó la reactividad puzolánica mediante ensayos de resistencia a la compresión y la flexión en morteros de CP- Puzolana. En la preparación de los morteros se trabajó con un 50% de sustitución de CP por un 30% de arcillas calcinadas, un 15 % de caliza y un 5 % de yeso, sin usar ningún tipo de aditivo. Los morteros fueron elaborados pesando 225 g de cemento P – 35, 225 g de LC², 1350 g de arena normalizada y 225 ml de agua. Estos se mantuvieron en sus moldes durante 24 horas, luego de transcurrido ese intervalo de tiempo fueron desmoldadas y colocadas en una piscina de curado. La resistencia a la compresión se evaluó a las edades de 3, 7 y 28 días, empleando las normas cubanas (NC95:2011, 2011), (NC506:2013, 2013), (NC-TS527:2013, 2013), (NC-TS528:2013, 2013).

En el ensayo de flexión las probetas fueron colocadas en una prensa Caenao BCCCP (1975) que dispone de 3 cilindros de acero de 10 mm de diámetro, en dos de ellos

descansa la briqueta y el tercero, que está equidistante de estos dos, se apoyó sobre la cara opuesta de la probeta ejerciendo una carga P verticalmente y creciendo progresivamente. (Hernández González, 2015)

En el ensayo de compresión fueron utilizadas las mitades obtenidas del ensayo a flexión, en este se ejerció un esfuerzo a través de dos placas de acero sobre la sección de 40 x 40 mm de la probeta hasta que llegó a la deformación de esta. Se tomó, en ese momento, la carga de rotura. Luego de la rotura se calcularon los valores de resistencia por los parámetros de la norma según las ecuaciones y se tomaron los resultados medios de los valores alcanzados (Hernández González, 2015)

$$R_f = 0,0234 Q$$

$$R_c = Q/1600$$

Donde

Q : Carga de rotura en cada ensayo (N).

R_f : es la resistencia a flexión (MPa).

R_c : es la resistencia a compresión (MPa)

Capítulo 3: Caracterización de las arcillas y evaluación de la reactividad puzolánica.

3.1 Caracterización mineralógica.

La tabla 1 presenta la composición química que se determinó mediante XRF con un espectrómetro Epsilo 3 de PAnalytical. Las muestras fueron prensadas en polvo y la cuantificación del encendedor de elementos se realizó bajo flujo de He.

Tabla 1: Composición química de la arcilla cruda

	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	Fe ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	LOI ⁹⁵⁰
Arcilla cruda	0.131	0.272	31.82	54	0.071	0.001	0.445	0.154	1.627	0.029	4.53	0,0148	10.52

La cuantificación del contenido de minerales pertenecientes al grupo de los caolines (expresados como caolinita contenido) en la arcilla cruda se realizó por el método del horno, el intervalo de temperatura considerado fue 400°C – 600°C para reducir la posible influencia en la cuantificación de hidróxidos y caolinitas, descomposición de piritas y combustión de compuestos orgánicos altamente volátiles entre 350°C y 400°C, y combustión de compuestos orgánicos de baja volatilidad, minerales arcillosos 2:1 y descomposición de carbonatos en la temperatura de intervalo 600°C -650°C (Alujas, et al., 2022)

El contenido de caolinita en la arcilla cruda utilizada para la prueba de la planta piloto fue del 57,7%, un contenido de caolinita bien por encima del 40%. De este resultado se puede decir que se garantiza buena reactividad del material.

Tabla 2 Contenido de caolinita cuantificado por el método del horno

Muestra	C _{dry}	C ₂₀₀	M ₂₀₀	C ₄₀₀	C ₆₀₀	K, %	Promedio
1	15.836	26.2117	10.1993	26.0194	25.1912	58.2	57.5
2	14.8508	25.0086	9.9852	24.8164	24.0205	57.1	
3	15.3662	25.7001	10.1479	25.4935	24.6825	57.3	

Para pronosticar el potencial del material, se midieron LOI a 550 °C y 950 °C. Para LOI en 550 °C la muestra se calcinó durante 4 h en una mufla y para LOI a 950 °C la muestra se sometió a calcinación durante 1 h en la misma mufla. El LOI a 550 °C es la diferencia de masa de la muestra secada a 105 °C y el de calcinado a 550 °C, dividido por la masa de la muestra a 105 °C. La LOI a 950 °C es la diferencia de masa de la muestra calcinada a 550 °C y la de la calcinada a 550 °C, dividida por la masa de muestra a 105

°C. La suma de ambas cifras de LOI es la LOI total. La Tabla 3 presenta el análisis del cumplimiento, por parte de la arcilla, de los criterios de idoneidad química según los métodos empíricos recomendados (Alujas Díaz, et al., 2018) (Alujas Díaz, et al., 2020)

Tabla 3 Análisis del cumplimiento de los criterios de idoneidad química.

	Al ₂ O ₃	Al ₂ O ₃ /SiO ₂	LOI ⁵⁰⁰	LOI ⁹⁵⁰	LOI total%	Na ₂ O + K ₂ O	CaO	SO ₃
Arcilla	29,4	0,51	8,7	1,12	9.82	0.767	0,209	< 0,01
Criterio	> 18	> 0,3	–	–	> 7	< 3	< 3	< 3

Los minerales del grupo del caolín son caolinita, sólo el 6,1 % del Al₂O₃ no proviene de la caolinita probablemente de minerales arcillosos 2:1 o hidróxidos de aluminio u otras fases que contienen alúmina. Además, el % Na₂O + % K₂O es inferior al 3 % indicando que el contenido de minerales como los feldspatos (minerales no completamente caolinitados) son bastante bajos. Además, el % CaO y el % SO₃ son inferiores al 3 % y 2 % respectivamente, lo que se correlaciona con el bajo contenido de carbonatos y sulfatos en la muestra. Se puede entonces concluir que, desde el punto de vista de la composición química, el material es adecuado para la producción de una arcilla calcinada que pueda utilizarse como material cementoso suplementario.

3.2 Composición mineralógica de la arcilla.

El análisis mineralógico se realizó en instalaciones de laboratorio de la Universidad de Moa y del Centro de Investigaciones del Níquel (CEDINIQ). Se recibieron y procesaron dos muestras. El original las muestras se molieron en proceso húmedo hasta que se retuvo un 5 % en el tamiz de 45 µm. Durante la molienda de las muestras se mezclaron con un estándar interno (corindón), que se preparó mediante un proceso de alta Calcinación a temperatura de una muestra químicamente pura de Al₂O₃. Los difractogramas se obtuvieron mediante un difractómetro PAnalytical bajo la siguiente configuración: escaneo tipo Gonio, registro angular de 4.0042° a 79.9962° con distancia de paso en 2θ de 0.0080°, Cu filtro de radiación y níquel. La diferencia de potencial fue de 45 kV y 40 mA de intensidad de corriente. El dispositivo se comprobó utilizando un estándar externo de silicio. Tanto para el análisis cualitativo (identificación de fases) como para el análisis cuantitativo (utilizando el método Rietveld), el software HighScore Plus versión 3.11 y la interfaz gráfica Profex asociados al código de refino BGMN. Se utilizaron las bases de datos ICSD 2009 y COD 2020 para identificar fases.

Tabla 4 Resultados del análisis mineralógico

Fase	Cantidad (% en peso)	Estd. Desarrollo.
Albita	1.35%	0.25%
Cristobalita	0.25%	0.06%
Dickita	12.68%	0.67%
Caolinita	40.20%	0.88%
Nacrita	1.84%	0.20%
Cuarzo	25.43%	0.60%
Tridimita	1.73%	0.22%
Anatasa	0.54%	0.05%
Anortita sódica	1.34%	0.16%
Moscovita 2M1 (Phengítica)	5.47%	0.27%
Hematita	0.92%	0.04%
Amorfo	8.27%	1.70%

Los resultados del análisis cuantitativo (Tabla 4) demuestran que la muestra objeto de estudio tiene una alta cantidad de minerales arcillosos 1:1, correspondientes al grupo del caolín (54,72 % en peso), con caolinita (40,20 %) y dickita (12,68%) como fases principales pertenecientes al grupo de los minerales arcillosos 1:1, que se caracterizado por picos estrechos e intensos, comportamiento que indica un alto grado de deterioro estructural ordenar. Estos resultados, junto con el contenido relativamente bajo de materiales amorfos, son consistente con un origen hidrotermal para el depósito de arcilla. El cuarzo y la moscovita son otras abundantes fases, con pequeñas inclusiones de Mg y Fe en su estructura cristalina.

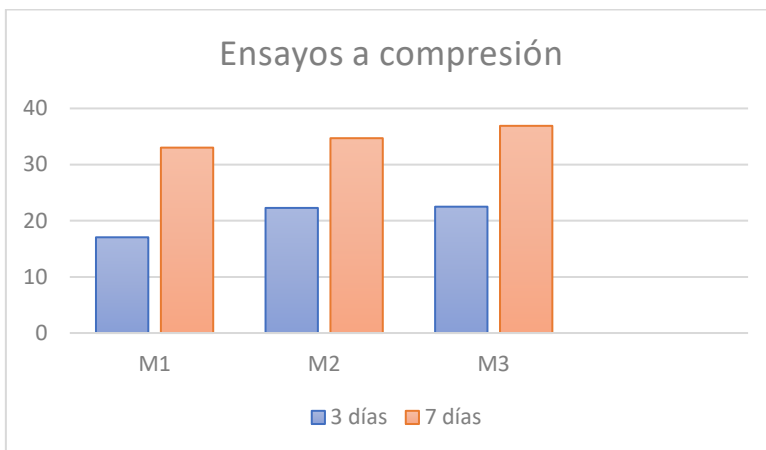
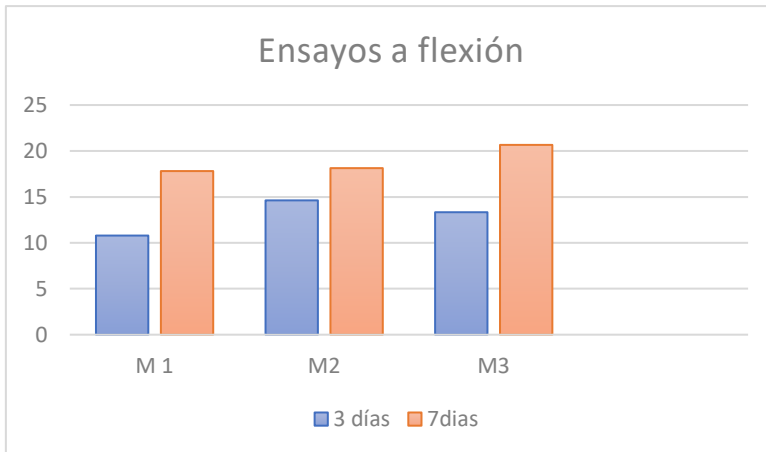
3.3 Evaluación de la reactividad puzolánica

La tabla 5 muestra los resultados obtenidos en los ensayos de resistencia mecánica de los morteros con sustituciones parciales de un 50 % de clínquer por LC² de Zimbabue formado por un 65% de arcilla calcinada a 800 °C, tamizada en los intervalos de 2.36mm < Ø (1), 1mm < Ø < 2.36mm (2) y 37µm < Ø < 1mm (3), y luego de ser molidas. Dando como resultado que los tres tamaños de partículas analizados cumplen respectivamente con la NC 95:2017, pero el de mejor comportamiento es el intervalo 37µm < Ø < 1mm.

Tabla 5 Resultados de los ensayos a flexión y compresión de los morteros.

	Flexión	Compresión

Muestras	3 días (MPa)	7 días (MPa)	3 días (MPa)	7 días (MPa)
1	10.79	17.81	17.05	33.02
2	14.62	18.13	22.28	34.7
3	13.33	20.66	22.5	36.9



En la tabla 6 se muestran los datos correspondientes a la muestra puntual de cemento Portland P-35, conforme a la NC 1340:2021, utilizado en la elaboración de los morteros.

Tabla 6. Resultados del análisis a la compresión del cemento Portland P-35.

Resistencia a la compresión		Método de ensayo
3 días, MPa	26.2 ± 0.8	NC 506: 2013
7 días, MPa	33.6 ± 1.2	NC 506: 2013
28 días, MPa	45.2 ± 1.1	NC 506: 2013

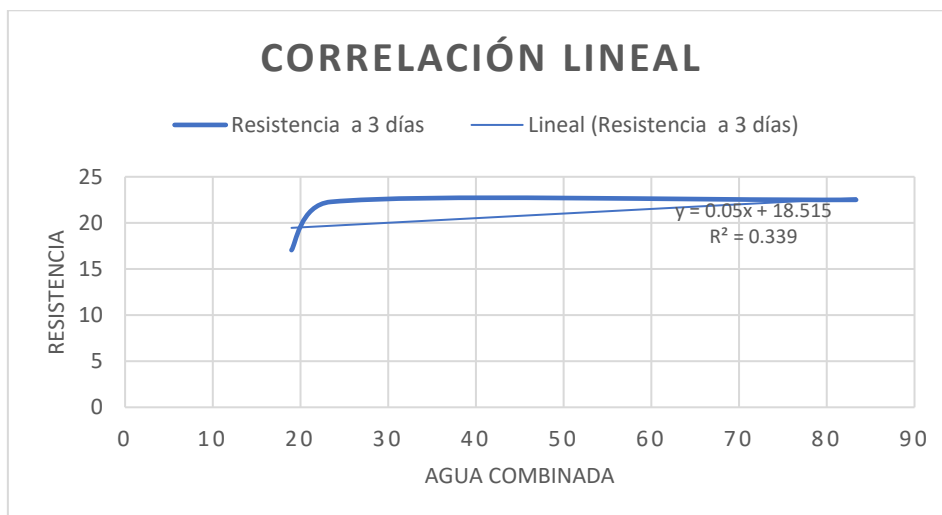
Los datos obtenidos en los ensayos de resistencia a la compresión de los morteros de LC3 se encuentran a los tres días en un intervalo inferior a los del CPO y pasado los siete días en un intervalo superior por lo que el sistema LC3 es mejor.

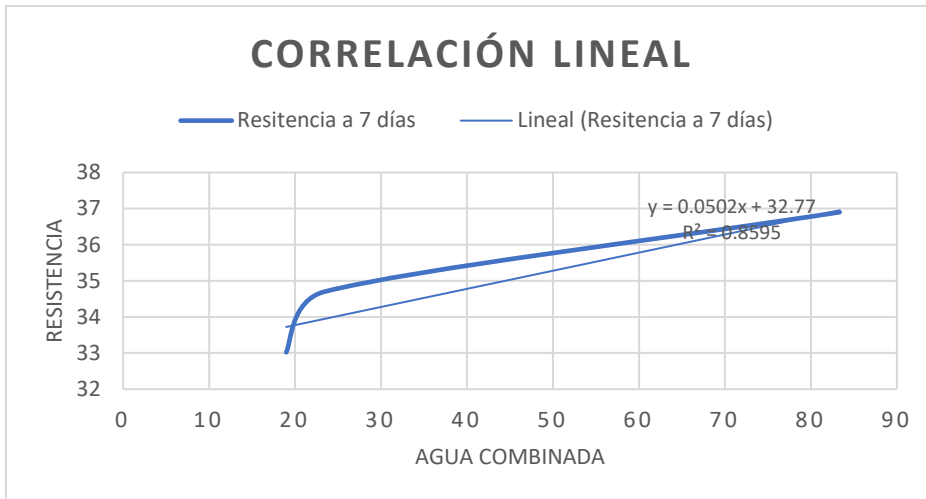
En la tabla 7 se muestran los resultados obtenidos por la técnica alternativa basada en la determinación del agua ligada a una temperatura de 200 y 400° C respectivamente.

Tabla 7 Contenido de agua en g por 100g de masa seca calentada.

Muestra	Réplicas	Masa _{crisol}	Masa _{200°}	Masa _{400°}	H ₂ O _{ligado, seco}	Promedio H ₂ O _{ligado, seco}
1	R1	17.2665	21.0991	20.913	18.61	18.97
	R2	18.4257	22.6120	22.4186	19.34	
2	R1	17.7110	21.9568	21.7082	24.86	23.44
	R2	18.2112	22.0009	21.7806	22.03	
3	R1	15.0128	20.0019	19.6737	32.82	83.34
	R2	15.7331	21.5985	20.2114	133.87	

Determinación de correlación lineal mediante un gráfico entre agua combinada (X) y resistencia (Y).





Conclusiones parciales:

- Las arcillas naturales provenientes de un yacimiento en Zimbabue presentan un alto contenido de caolinita (57,7%), bien por encima del 40%, garantizando con estos resultados la buena reactividad del material.
- La separación de fracciones mediante el tamizado mecánico es uno de los métodos más eficaces para determinar la distribución del tamaño de partícula.
- La reactividad puzolánica da mejores resultados ante ensayos de resistencia mecánica en las fracciones de menor tamaño.
- La activación térmica de las arcillas es un proceso que permite mejorar sus propiedades y rendimiento en materiales de construcción.

Recomendaciones:

- Extender los estudios de resistencia mecánica a edades superiores a los 7 días.
- Profundizar en la evaluación de la reactividad puzolánica de los productos de calcinación de los distintos tamaños de partículas, a partir del empleo de métodos alternativos de análisis como el protocolo R3.

Bibliografía

Hernández González, Y., 2015. *Evaluación de la influencia de cementos con sustituciones de clínquer al 60 y 75% por una mezcla de arcilla calcinada y caliza en morteros de albañilería*, s.l.: Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas. Facultad de construcciones. Departamento de Ingeniería Civil.

Almenares, 2017. *Potencialidades de arcillas caoliníticas cubanas para ser empleadas como fuente de materia prima en la obtención de materiales cementicios suplementarios*, s.l.: Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.

Alujas Díaz, A. y otros, 2020. *The Experience of Cuba TRC on the Survey of kaolinitic Clay Deposits as Source of SCMs---Main Outcomes and Learned Lesson*, in: S. Bishnoi (Eds), *Calcined Clays Sustain. Concr, Springer, Singapore*, s.l.: s.n.

Alujas Díaz, A., Almenares Reyes, R., Arcial Carratalá, F. & Martirena Hernandez, J., 2018. *Proposal of a methodology for the preliminary assessment oh kaolinitic clay deposits as a source of SCMs in: F. MArtirena, A. Favier, K. Scrivener(Eds), Calcined Clays Sustain. Concr. Springer, Dordrecht*, s.l.: s.n.

Alujas, A., 2010. *Obtención de un material puzolánico de alta reactividad a partir de la activación térmica de una fracción arcillosa multicomponente*, s.l.: Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.

Alujas, A. y otros, 2022. *Properties and occurrence of clay resources for use as supplementary cementitious materials*, Master. Struct, s.l.: s.n.

AMBROISE, J. M.-C. S. & P. J., 1992. *Pozzolanic behaviour of thermally activated kaolin. Proc. 4th Int. Conf. Fly Ash, Silica Fume, Slag Nat. Pozzolans Concr. ACI, Detroit, USA.*, s.l.: s.n.

ASTM C1897-20, 2020. *Standard test methods for measuring the reactivity of Supplementary Cementitious Materials by isothermal calorimetry and bound water measurements*. s.l.

Avet, F. & Scrivener, K., 2018. *Investigation of the calcined kaolinite content on the hydration of Limestone Calcined Clay Cement (LC3)*, *Cem. Concr. Res.* 107, s.l.: s.n.

Betancourt, R., 1997. *Estudio teórico experimental de las propiedades puzolánicas de las cenizas de bagazo y paja de caña.*, s.l.: Universidad Central "Martta Abreu" de Las Villas.

Casales Hernandez, S., 2017. *Evaluación de la calcinación semi-industrial de arcilla del yacimiento Neptuno en Artemisa para la producción de una adición mineral activa a base de arcilla calcinada, yeso y caliza (LC2)*, s.l.: Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.

CASTILLO LARA, R. A. M. A. D. A. S. K. & M. H. J. F., 2011. *Estudio de la adición de arcillas calcinadas en la durabilidad de hormigones. Revista ingeniería de construcción*, 26, 25-40., s.l.: s.n.

Escobar, K. D., 2018. *Reactividad Puzolánica de los Productos de Calconación de la Arcillas del Depósito Yaguajay*, s.l.: Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.

Fernandez, R., Martirena, F. & Scrivener, K., 2011. *The origin of the pozzolanic activity of calcined clay minerals: A comparison between kaolinite, illite and montmorillonite*, *Cem. Concr. Res.* 41, s.l.: s.n.

- Moya, J. J. L., 2022. *Formulación de cementos de bajo carbono con arcillas calcinadas de diferentes yacimientos*, s.l.: Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
- M. S., 2016. *Use of natural pozzolans with lime for producing repair mortars*. *Environmental Earth Sciences*, 75, 1-8., s.l.: s.n.
- Muller, C., 2005. *Pozzolanic activity of natural clay minerals with respect to environmental geotechnics.*, s.l.: SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH. p. .
- NC506:2013, 2013. *CEMENTO HIDRÁULICO — MÉTODO DE ENSAYO — DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA MECÁNICA* , s.l.: s.n.
- NC95:2011, 2011. *CEMENTO PORTLAND— ESPECIFICACIONES*, s.l.: s.n.
- NC-TS527:2013, 2013. *CEMENTO HIDRÁULICO — MÉTODOS DE ENSAYO — EVALUACIÓN DE LAS PUZOLANAS* , s.l.: s.n.
- NC-TS528:2013, 2013. *CEMENTO HIDRÁULICO — PUZOLANAS —ESPECIFICACIONES.*, s.l.: s.n.
- Scrivener, K. y otros, 2018. *Impacting factors and properties of Limestone Calcined Clay Cements (LC3)*, s.l.: s.n.
- Shi, C. a. R. D., 2001. *Comparison of different methods for enhancing reactivity of pozzolans*. *Cement and Concrete Research*,, s.l.: s.n.
- Tironi, A., 2013. *Materiales cementicios de baja energía.*, s.l.: Universidad Nacional de La Plata.
- Vizcaino Andrés , L. M., 2014. *Cemento de bajo carbono a partir del sistema cementicio ternario clínquer – arcilla calcinada - caliza*, s.l.: Univerrsidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
- WBCSD/IEA/CSI, 2018. *Technology Roadmap. Low-Carbon Transition in the Cement Industry*, Paris, Francia, IEA Publications., s.l.: s.n.
- Zunino, F. & Scrivener, K., 2020. *Increasing the kaolinite content of raw clays using particle classification techniques for use as supplementary cementitious materials*, s.l.: s.n.

