

	GESTIÓN DE SERVICIOS ACADÉMICOS Y BIBLIOTECARIOS		CÓDIGO	FO-GS-15
			VERSIÓN	02
	ESQUEMA HOJA DE RESUMEN		FECHA	03/04/2017
			PÁGINA	1 de 1
ELABORÓ		REVISÓ	APROBÓ	
Jefe División de Biblioteca		Equipo Operativo de Calidad	Líder de Calidad	

RESUMEN TRABAJO DE GRADO

AUTOR(ES): NOMBRES Y APELLIDOS COMPLETOS

NOMBRE(S): INGRID TATIANA APELLIDOS: ARÉVALO GUTIÉRREZ

FACULTAD: INGENIERIA

PLAN DE ESTUDIOS: INGENIERIA INDUSTRIAL

DIRECTOR:

NOMBRE(S): PEDRO APELLIDOS: GARZÓN AGUDELO

TÍTULO DEL TRABAJO (TESIS): EVALUACIÓN DE MUESTRAS DE ARCILLAS ACTIVADAS QUE CONTRIBUYAN AL MEJORAMIENTO DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CEMENTO PRODUCIDO A NIVEL DE LABORATORIO EN CEMEX COLOMBIA S.A

En el presente proyecto, se propuso como objetivo evaluar las propiedades del cemento como lo es la resistencia a la compresión mediante su actividad puzolánica esto obtenido a partir de mezclas Clinker/yeso proporcionado por CEMEX con adición de arcilla calcinada con el fin de sustituir un porcentaje del factor de Clinker y contribuir con las emisiones generadas por el proceso de productivo.

Para ello se obtuvieron seis muestras de diferentes orígenes geológicos y luego se caracterizaron por fluorescencia de rayos X (FRX) para conocer su composición química y mediante difracción de rayos X (DRX) esto con el fin de analizar los resultados en cada una de las muestras, en las fases mineralógicas de arcilla cruda y arcilla calcinada una vez sometidas a una temperatura de 700°C en la que se observó el cambio de Kaolin a Metakaolin y las muestras ser denominadas posiblemente puzolanas, seguido de esto se realizó el ensayo con base a la norma NTC-220 y de esta manera obtener la resistencia a la compresión de los morteros de la mezcla Clinker/Yeso más el aditivo que es la arcilla calcinada a la edad en días de 1,3,7,28. Se pudo constatar que las mezclas preparadas PI-1333, PI-1121, PI-1374 presentan actividad puzolánica, alcanzado un 75% de índice de actividad a los 28 días.

PALABRAS CLAVES: Arcilla, Puzolanas, Clinker, Cemento.

CARACTERÍSTICAS: PÁGINAS: 78 PLANOS: ILUSTRACIONES: CD ROOM:

EVALUACIÓN DE MUESTRAS DE ARCILLAS ACTIVADAS QUE
CONTRIBUYAN AL MEJORAMIENTO DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL
CEMENTO PRODUCIDO A NIVEL DE LABORATORIO EN CEMEX COLOMBIA S.A

INGRID TATIANA ARÉVALO GUTIÉRREZ

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍA

PLAN DE ESTUDIO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO DE GRADO- MODALIDAD PASANTIA

CÚCUTA

2023

EVALUACIÓN DE MUESTRAS DE ARCILLAS ACTIVADAS QUE
CONTRIBUYAN AL MEJORAMIENTO DE LAS RESISTENCIAS DEL CEMENTO
PRODUCIDO A NIVEL DE LABORATORIO EN CEMEX COLOMBIA S.A

INGRID TATIANA ARÉVALO GUTIÉRREZ

Trabajo de grado en modalidad de pasantía con el fin de optar el título de Ingeniería Industrial.

Director

PEDRO GARZÓN AGUDELO

Magister en Ciencia y Tecnología de Materiales.

Especialista en Gerencia de Proyectos.

UNIVERSIDAD FRANCISCO DE PAULA SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍA

PLAN DE ESTUDIO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO DE GRADO- MODALIDAD PASANTIA

CÚCUTA

2023

Dedicatoria

A Dios, por seguirme orientando en cada paso que doy, a mis padres por su esfuerzo y dedicación de verme lograr ser una profesional, a ti Doris Becerra que desde el cielo me guías en mi caminar y me iluminas para seguir adelante con mis proyectos y finalmente a todos mis amigos, compañeros, familiares que hicieron parte de mi proceso para lograr mis objetivos.

Agradecimientos

A Dios, por darme esa sabiduría y capacidad para desarrollar el presente proyecto, ya que, sin su guía, nada de esto fuera sido posible.

A mis padres, hermanos y mascota por ser pieza fundamental a lo largo de mi trayectoria de la carrera profesional y personal, alentándome en cada paso de este sueño que hoy se materializa.

A la UFPS, por la orientación en sus docentes de transmitir sus conocimientos y dedicación que los ha regido, para el crecimiento en mi aprendizaje.

A Cemex, por permitirme elaborar mis prácticas y pasantías y crecer en la industria del cemento y así mismo al personal que contribuyó para que este proyecto fuera un éxito.



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TRABAJO DE GRADO

FECHA: 28 de agosto, 2023
HORA: 9:00 a.m.
LUGAR: Salón FU – 210
PLAN DE ESTUDIOS: INGENIERIA INDUSTRIAL

TÍTULO DE LA TESIS: “EVALUACIÓN DE MUESTRAS DE ARCILLAS ACTIVADAS QUE CONTRIBUYAN AL MEJORAMIENTO DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CEMENTO PRODUCIDO A NIVEL DE LABORATORIO EN CEMEX COLOMBIA S.A”.

JURADOS: LEONARDO CELY ILLERA
CARLOS ARARAT BERMUDEZ

DIRECTOR: PEDRO ANTONIO GARZÓN AGUDELO

NOMBRE DEL ESTUDIANTE	CODIGO	CALIFICACIÓN LETRA	NÚMERO
INGRID TATIANA AREVALO GUTIÉRREZ	1192642	cuatro, dos	4,2

APROBADA

Leonardo Cely Illera

LEONARDO CELY ILLERA

CARLOS ARARAT BERMUDEZ

Vo.Bo **PEDRO ANTONIO GARZÓN AGUDELO**

Coordinador Plan de Estudios
Ingeniería Industrial

08/28/23

Resumen

En el presente proyecto, se propuso como objetivo evaluar las propiedades del cemento como lo es la resistencia a la compresión mediante su actividad puzolánica esto obtenido a partir de mezclas Clinker/yeso proporcionado por CEMEX con adición de arcilla calcinada con el fin de sustituir un porcentaje del factor de Clinker y contribuir con las emisiones generadas por el proceso de productivo.

Para ello se obtuvieron seis muestras de diferentes orígenes geológicos y luego se caracterizaron por fluorescencia de rayos X (FRX) para conocer su composición química y mediante difracción de rayos X (DRX) esto con el fin de analizar los resultados en cada una de las muestras, en las fases mineralógicas de arcilla cruda y arcilla calcinada una vez sometidas a una temperatura de 700°C en la que se observó el cambio de Kaolin a Metakaolin y las muestras ser denominadas posiblemente puzolanas, seguido de esto se realizó el ensayo con base a la norma NTC-220 y de esta manera obtener la resistencia a la compresión de los morteros de la mezcla Clinker/Yeso más el aditivo que es la arcilla calcinada a la edad en días de 1,3,7,28. Se pudo constatar que las mezclas preparadas PI-1333, PI-1121, PI-1374 presentan actividad puzolánica, alcanzado un 75% de índice de actividad a los 28 días.

Palabras clave: Arcilla, Puzolanas, Clinker, Cemento.

Abstract

The objective of this project was to evaluate the cement properties such as compressive strength through its pozzolanic activity obtained from Clinker/gypsum mixtures provided by CEMEX with the addition of calcined clay in order to substitute a percentage of the Clinker factor and contribute to the emissions generated by the production process.

For this purpose, six samples of different geological origins were obtained and then characterized by X-ray fluorescence (XRF) to determine their chemical composition and by X-ray diffraction (XRD) in order to analyze the results in each of the samples, In the mineralogical phases of raw clay and calcined clay once subjected to a temperature of 700°C in which the change from Kaolin to Metakaolin was observed and the samples were possibly called pozzolans, after this, the test was carried out bases NTC-220 standard and thus obtain the compressive strength of the mortars of the Clinker/Gypsum mixture plus the additive which is the calcined clay at the age in days of 1,3,7,28. It was found that the prepared mixtures PI-1333, PI-1121, PI-1374 present pozzolanic activity, reaching a 75% activity index at 28 days.

Keywords: Clay, Pozzolans, Clinker, Cement.

Contenido

	Pag
Introducción	15
1. Problema	17
1.1 Titulo	17
1.2 Planteamiento del problema	17
1.3 Formulación del problema	19
1.4 Justificación	19
1.4.1 A Nivel empresa.	19
1.4.2 A Nivel estudiante.	19
1.5 Objetivos	20
1.5.1 Objetivo General	20
1.5.2 Objetivo específicos	20
1.6 Alcances y limitaciones.	20
1.6.1 Alcances.	20
1.6.2 Limitaciones.	21
2. Marco Referencial	22
2.1 Antecedentes	22
2.1.1 Antecedentes Internacionales	22
2.1.2 Antecedentes Nacionales	24
2.1.3 Antecedentes Regionales	26
2.2 Marco contextual	27

	10
2.2.1 Cemex Colombia	27
2.2.2 Perfil de la compañía	28
2.2.3 Misión	28
2.2.4 Visión	28
2.2.5 Localización	28
2.3 Marco Teórico	29
2.3.1 Arcillas.	29
2.3.1.1 Arcillas activadas.	30
2.3.1.2 Arcilla Caolinita o Caolín	30
2.3.2 Clasificación del cemento.	30
2.3.2.1 Cemento Portland.	31
2.3.3 Parámetros de calidad cemento	32
2.3.3.1 Finura	34
2.3.3.2 Pérdida por fuego	34
2.3.3.3 Resistencia a la compresión	34
2.3.4 Difracción de Rayos X (DRX)	35
2.3.5 Fluorescencia de Rayos X (FRX)	35
2.3.6 Puzolana	36
2.3.6.1 Evaluación de la actividad puzolánica	36
2.4 Marco Conceptual	37
2.5 Marco Legal	39
3. Diseño Metodológico	41
3.1 Tipo de investigación	41

	11
3.1.1 Diseño Experimental	41
3.1.2 Descripción desarrollo del proyecto	41
3.2 Población y muestra	48
3.2.1 Población	48
3.2.2 Muestra	48
3.3 Instrumentos para la recolección de la información	48
3.3.1 Fuentes primarias	48
3.3.2 Fuentes Secundarias	48
3.4 Análisis de la información	49
4. Resultados y Discusión	50
4.1 Caracterización de la composición química y mineralógica de las arcillas	50
4.1.1 Preparación de la materia prima	50
4.1.2 Composición química de la arcilla (FRX)	54
4.1.3 Evaluación de la mineralogía durante el proceso de calcinación mediante DRX.	57
4.2 Determinación de la resistencia a la compresión en la mezcla blanco-arcilla	64
4.2.1 Elaboración de morteros con adición de arcilla calcinada	64
4.2.2 Determinación de la resistencia a la compresión según la norma NTC 220.	67
4.3 Análisis de los resultados obtenidos.	68
5. Conclusiones	71
6. Recomendaciones	72
Bibliografía	73
Anexos	77

Lista de Figuras

	Pag
Figura 1. Logo Cemex	27
Figura 2. Ubicación de la planta Cemex en el municipio de los Patios, Norte de Santander	29
Figura 3. Constituyentes del cemento portland.	32
Figura 4. Ficha técnica cemento hidráulico estructural.	32
Figura 5. Ficha técnica otros parámetros físicos cemento hidráulico estructural.	33
Figura 6. Ficha técnica cemento hidráulico uso general.	33
Figura 7. Ficha técnica otros parámetros físicos cemento hidráulico uso general.	33
Figura 8. Recepción de muestras de arcillas para elaboración del proyecto.	50
Figura 9. DRX Muestra NP-4294 Caolinita-Illita	58
Figura 10. DRX Muestra PI-1333- Gibbsita	59
Figura 11. DRX Muestra NP-4229 Caolinita - Illita - Gibbsita	60
Figura 12. DRX Muestra NP-4156- Caolinita	61
Figura 13. DRX Muestra PI-1121 Caolinita.	62
Figura 14. DRX Muestra PI-1374 Gibbsita.	63
Figura 15. Molino de bolas escala laboratorio.	64
Figura 16. Resistencia mínima a la compresión en 28 días.	67
Figura 17. Índice de puzolanicidad	70

Lista de Tablas

	Pag
Tabla 1. Marco Legal	39
Tabla 2. Identificación de muestras de arcillas.	42
Tabla 3. Descripción de la preparación y procedimiento de análisis de las muestras de arcilla.	43
Tabla 4. Datos de recepción de las muestras de arcilla.	51
Tabla 5. Ingreso muestras de arcilla a estufa industrial.	52
Tabla 6. Trituradora de Mandibula.	53
Tabla 7. Trituradora de discos.	54
Tabla 8. Composición química de la arcilla (FRX)	56
Tabla 9. Fluidez muestra de ensayo.	65
Tabla 10. Elaboración de cubos de morteros.	66
Tabla 11. Índice de actividad de resistencia.	69

Lista de anexos

Pag

Anexo 1. Datos resistencia a la compresión de las mezclas de arcilla calcinada + blanco. 78

Introducción

El crecimiento de las emisiones por parte de la industria cementera productoras de clínker han presentado un aumento, según la Agencia Internacional de Energía las emisiones del cemento a nivel mundial, se han triplicado con creces desde 1992, aumentando recientemente en 2.6% anual; indica el científico Robbie Andrew especializado en emisiones de gases de efecto invernadero para el CICERO para Investigaciones Climáticas de Noruega y de Global Carbon Project “hace 20 años las emisiones a raíz de la elaboración de cemento eran aproximadamente 1400 millones de toneladas (1200 millones de toneladas métricas) de dióxido de carbono. (Andrew et al., 2022).

En Colombia, según la Cámara Colombiana del Cemento y el Concreto (Procemco), por cada tonelada de cemento se emiten 600 kilogramos de CO_2 , aunque el número ha disminuido, en 2010 las emisiones eran de 720 kg de CO_2 por tonelada de cemento (Espectador, 2022.) estas emisiones generadas por la transformación de la piedra caliza para la fabricación del clínker y combustible que se requiere para el proceso. Así mismo el ministro de ambiente indica que el país se comprometió a reducir en un 51% las emisiones de gases de efecto invernadero al año 2030.

Es por esto por lo que un enfoque para la reducción de la huella de carbono es utilizar MCS (Materiales Cementantes Suplementarios) para reducir el factor de clínker en el cemento. Cada caída del 1% en el factor de clínker puede reducir el CO_2 emitido en 8-9 kg/tonelada de cemento. (CO_2 reemplazando Clinker), teniendo en cuenta que según la ASTM C311 las puzolanas es un MCS (Material Cementante Suplementario) y las arcillas calcinadas han sido denominadas buenas puzolanas, generando en los morteros incrementos en la durabilidad, control de la reacción álcali-sílice y aumento de resistencia a compresión. (Yanguatin et al., 2017).

Por esta razón, el presente proyecto tuvo como objetivo evaluar las diferentes muestras de arcillas calcinadas de acuerdo a su actividad puzolánica, en el que se desarrolló la fabricación de morteros con adiciones de clinker/yeso + arcilla para determinar la resistencia a la compresión y así se conoció su actividad puzolánica con el fin de evaluar su comportamiento en el mejoramiento de las resistencias, además de contribuir en minimizar los efectos contaminantes, generados por el proceso de clinkerización.

1. Problema

1.1 Título

EVALUACIÓN DE MUESTRAS DE ARCILLAS ACTIVADAS QUE CONTRIBUYAN AL MEJORAMIENTO DE LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL CEMENTO PRODUCIDO A NIVEL DE LABORATORIO EN CEMEX COLOMBIA S.A

1.2 Planteamiento del problema

En la actualidad el cemento portland es el principal material cementante usado en la construcción, pero la producción de este implica problemas energéticos ya que en su fabricación se necesitan alcanzar temperaturas superiores a 1400-1500°C y problemas medio ambientales en la obtención de materias primas, fabricación de clinker con emisiones de CO_2 , NO_x , MP a la atmosfera. (Palomo, 2015), en promedio con los indicadores manejados en planta se tiene un estimado de 1.136 Kcal/kg por producción de Clinker y en emisiones de CO_2 675 Kg CO_2 /t cto.

Debido a estas problemáticas la empresa cementera, bajo su programa futuro en acción, anunció una meta de acción climática, líder en la industria de menos de 475 kg de CO_2 , una reducción de >40% en las emisiones de CO_2 , para el 2030. Además, el consumo de electricidad limpia aumentará del actual 29% en 2020 a 55% para el 2030. (Cemex, 2021).

Con base en lo anterior la industria cementera busca nuevas alternativas que contribuyan en la reducción de emisiones de CO_2 sin afectar el proceso productivo en las propiedades de la

calidad del cemento, denominado resistencia a la compresión, entre esas alternativas están los combustibles alternos y MCS (Materiales Cementicos Suplementarios).

Por lo tanto, entre los Materiales Cementicos Suplementarios están las puzolanas artificiales que son el resultado de diversos procesos industriales y agricolas, generalmente como subproductos. Las puzolanas artificiales más importantes son arcilla cocida, cenizas de combustible, escoria de altos hornos granulada y molida y ceniza de cascara de arroz (Puzolanas et al., n.d.).

Asimismo, la puzolanas son materiales sílico-aluminosos que finalmente divididos y en presencia de agua, reaccionan con el hidróxido de calcio producido en la hidratación del cemento, siendo así se tiene que las arcillas alcanzan su estado más reactivo cuando la temperatura de calcinación provoca la perdida de oxhidrilos y modifica la estructura cristalina, se considera que las arcillas como puzolanas incrementara su utilización a medida que se tome conciencia de los beneficios ambientales implicados. (Beltramini & Guilarducci, 2013)

Es por esto que desde la cementera ubicada en planta los patios se tuvo como objetivo el presente proyecto para la realización de pruebas químicas/físicas a escala laboratorio, mediante la calcinación de muestras de arcilla, en el que se sustituirá un 30% de Clinker/Yeso por arcilla activada, esto con el fin de evaluar el comportamiento de actividad puzolánica determinando por medio del ensayo resistencia a la compresión en el que se vio reflejado de manera creciente en comparación con la muestra patrón que es conocida como blanco, esta resistencia se conocerá en las edades de 1,3,7,28 días; De esta manera se contribuye en el impacto ambiental desde la sustitución de un porcentaje de clinker sin afectar las condiciones de calidad en el cemento y siendo representativo desde la mejoría de las resistencias.

1.3 Formulación del problema

¿De qué manera se beneficiaría la industria cementera con el uso de arcilla calcinada en la producción del cemento?

1.4 Justificación

1.4.1 A Nivel empresa. La industria cementera podría adquirir un avance en aspectos ambientales, reducción de costos y energía esto debido a su proceso de producción de cemento, con los estudios que se realizaron a nivel laboratorio se pudo obtener un preliminar de cuáles son esas arcillas que de acuerdo con su composición química, mineralógica y actividad puzolánica pueden sustituir un porcentaje de factor de Clinker para contribuir en las propiedades del cemento.

1.4.2 A Nivel estudiante. El estudiante pudo aplicar en un entorno real información relacionada con el proceso de muestreo, selección, identificación, análisis de un mineral como lo es la arcilla, desarrollando competencias con la ingeniería como lo son: Química General, Química Industrial, Procesos Industriales I y II, los cuales hacen parte de la formación profesional de un Ingeniero Industrial y que le aportará habilidades tales como: analizar, toma de decisiones, trabajo activo, mejoramiento continuo como experiencia en cuanto a su formación integral.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo General. Evaluar muestras de arcillas calcinadas que contribuyan en las propiedades del cemento mediante su actividad puzolánica esto con el fin de sustituir un porcentaje de factor de Clinker.

1.5.2 Objetivos Específicos. Se plantearon los siguientes objetivos:

Caracterizar la composición química y mineralógica de las muestras de arcilla a utilizar.

Determinar la resistencia a la compresión de las muestras de material mediante la realización de ensayos con base a la norma NTC-220.

Analizar los resultados de las pruebas de resistencia para conocer el comportamiento de puzolanicidad y así identificar las arcillas más apropiadas al proceso.

1.6 Alcances y limitaciones.

1.6.1 Alcances. El presente proyecto consistió en caracterizar la composición química y mineralógica de las muestras de arcilla, elaboración de cubos de morteros, determinar la resistencia a la compresión de las muestras de Clinker/Yeso con adición de arcilla y se finalizó analizando los resultados de las pruebas de resistencia y seleccionando aquellas arcillas más apropiadas conforme a su comportamiento de actividad puzolánica.

1.6.2 Limitaciones. El presente proyecto se presentó limitantes en la obtención del análisis mineralógico (DRX), ya que el equipo entro en un previo mantenimiento en mejora de su funcionamiento, esto ocasionando un tiempo muerto.

2. Marco Referencial

2.1 Antecedentes

Para el desarrollo del proyecto se consultaron diferentes fuentes bibliográficas en la cual se obtienen trabajos de investigación, proyecto, tesis a nivel nacional e internacional con la temática relacionada, con el fin de generar y suministrar un material apoyo para el desarrollo y cumplimiento del mismo:

2.1.1 Antecedentes Internacionales

Tironi, (2013). *“Materiales cementicios de baja energía. Activación de arcillas, relación entre estructura y actividad puzolánica.* Trabajo de tesis doctoral. Dpto de Química. Universidad Nacional de la Plata. Recuperado de http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/26504/Documento_completo.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Este proyecto se basa en el desarrollo de caracterización de arcillas caolínicas y bentonitas de diferentes regiones de argentina, determinando una estructura ordenada en la caolinita presente en las muestras procedentes de depósitos primarios y estructura desordenada en las muestras procedentes de depósitos sedimentarios o sometidas a un proceso industrial, además concluye que la mayor actividad puzolánica se obtiene cuando se analizan arcillas con elevado contenido de caolinita y estructura desordenada, cuando se usan bentonitas calcinadas no son tan favorables como en el caso de las arcillas caolínicas calcinadas con contenido de caolinita

superior al 40%, cuando se utilizan arcillas caoliníticas como reemplazo del 30% de CP en la elaboración de morteros si el contenido de caolinita es superior al 45% se pueden obtener morteros con un comportamiento mecánico similar a los elaborados con CP, utilizando menor cantidad de energía (16 al 20% menos) y disminuyendo las emisiones de CO_2 (27 a 28%).

En la investigación presentada anteriormente se extraen aportes de los diferentes métodos para la determinación de la actividad puzolánica donde se utilizan cuatro métodos diferentes: consumo de cal, conductividad eléctrica, ensayo de frattini y el índice de actividad puzolánica determinado mediante resistencia a la compresión. Además del análisis por medio de cálculo la cantidad de CO_2 emitido por 1kg de Clinker durante el proceso de clinkerización.

Alvarez, (2013). *“Activación térmica de arcillas de la región de Cayo Guam para su aprovechamiento como material puzolánico”*. Tesis en opción al título de ingeniero metalúrgico. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. Recuperado de <http://ninive.ismm.edu.cu/bitstream/handle/123456789/2012/Anibal.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

En el presente proyecto de investigación se realizó un estudio de la influencia de la temperatura en la activación térmica de un material arcilloso, con el objetivo de evaluar la reactividad puzolánica de los productos de calcinación, la actividad puzolánica de los productos de calcinación fue evaluada a partir de los ensayos de resistencia mecánica en morteros con un 30% de reemplazo de CP por arcilla calcinada. En el que concluye que el índice de actividad resistente de los morteros elaborados con adición del 30% de arcilla calcinada en sustitución de cemento, a los 7 y 28 días de curado, es superior al 75% mínimo requerido para que el material

puede ser utilizado como aditivo puzolánico, además que las sustituciones parciales del cemento portland por materiales puzolánicos, logra reducir el consumo de energía y emisiones de CO_2 en industrias cementeras.

En la investigación presentada anteriormente los aportes generados se basan en los métodos de activación de las arcillas, en los que se tuvieron medios mecánicos, químicos o térmicos, para el desarrollo del presente proyecto se realizaron con base a la activación térmica de las arcillas para alcanzar el máximo potencial de reactividad puzolánica.

2.1.2 Antecedentes Nacionales

Muñoz Karen, (2020). “*Metodología para la evaluación de cementos tipo LC3 en el contexto Colombiano. Aproximación Teórica*” Trabajo de grado para obtener el título de Ingeniería Industrial. Universidad Militar Nueva Granada. Recuperado de <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/36833/Mu%C3%B1ozLoezKarenLorena2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Este proyecto realiza una metodología para evaluar el potencial de producción de cementos tipo LC3 mediante la caracterización teórica de fuentes de extracción de la materia prima al igual que evalúa la información geológica del contexto Colombiano identificando zonas de formación de arcillas en lo que se concluye que la implementación de las arcillas caoliníticas como material cementicio suplementario en el país ha sido ignorado por desconocimiento de su gran beneficio y viabilidad, a su vez muestra que actualmente el país cuenta con 11 compañías cementeras con grandes aportes a la creciente demanda en el sector de construcción pero esto se convierte en mayor emisión de CO_2 y se busca que opten por nuevas metodologías que permitan la reducción

de huella de carbono, además dio a conocer que se cuentan con grandes puntos de explotación de arcillas en el departamento de Antioquia.

El aporte que se genera del proyecto mencionado anteriormente es como la implementación de arcillas calcinadas como material cementicio suplementario y la viabilidad para la explotación y aprovechamiento de arcilla de diversos orígenes geológicos.

Romero Andrea, (2020). “*Determinación del índice de actividad puzolánica de materiales cementantes suplementarios disponibles en el mercado Colombiano*”. Trabajo dirigido presentado como requisito para énfasis en estructuras. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito. Recuperado de <https://repositorio.escuelaing.edu.co/bitstream/handle/001/1206/Romero%20Gonz%C3%A1lez%20Andrea%20Yineth-2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

El presente trabajo consistió en la determinación del índice de actividad puzolánica según norma ASTM C311, de 11 MCS disponibles en el mercado colombiano: metacaolín, humo de sílice, carbonato cálcico, micro-carbonato cálcico, harina de vidrio reciclado, polvo de vidrio reciclado, ceniza volante, ceniza de cascarilla de arroz, FC3R, escoria de alto horno y escoria de arco eléctrico. Entre los resultados obtenidos se destaca que las escorias de alto horno y de arco eléctrico, debido a sus propiedades hidráulicas, fueron las que obtuvieron mayor índice de actividad puzolánica, siendo este valor de 1,43 y 1,36 respectivamente. Solamente el carbonato cálcico no cumplió con la norma ASTM C618, ya que, obtuvo un índice de actividad puzolánica de 0,62, siendo el límite inferior marcado de 0,75.

El proyecto mencionado anteriormente aporta conceptos de la reactividad puzolánica, así mismo como los diferentes estudios relacionados con las propiedades de morteros con sustitución parcial del cemento por materiales cementantes suplementarios en la mezcla.

2.1.3 Antecedentes Regionales

Peñaranda Leidy & Fontalvo Jenny, (2020). *“Evaluación de las propiedades de cemento obtenido a partir de mezclas Clinker/Yeso proporcionada por CEMEX con ceniza volátil calcárea producida en la planta Termotasajero Dos”*. Trabajo de grado para obtener el título de Química. Universidad Nacional Abierta y a Distancia. Recuperado de <https://repository.unad.edu.co/jspui/bitstream/10596/35617/1/jafontalvo.pdf>

El uso de cenizas volátiles provenientes de la combustión de carbón, como aditivos a la mezcla de cemento portland (Clinker-yeso), el propósito del proyecto de grado citado es dar a conocer la caracterización física y química de la ceniza volátil de Termotasajero, evaluando la factibilidad de su uso como aditivo para la producción de cemento en Cemex-Los Patios, la cenizas no solo es considerado un material puzolánico, sino que además presenta un alto contenido de óxido de calcio en lo que concluye que las cenizas volátiles provenientes de termotasajero dos contiene un porcentaje mayor al 70% en su contenido SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3 , adicional a esto la presencia de las cenizas en un 30% en mezcla con cemento ayuda a mejorar la resistencia comparado con el blanco.

Por otra parte, el proyecto mencionado anteriormente es un antecedente de gran relación con el proyecto a desarrollar es por esto se extrae material para el desarrollo complementario del marco referencial de acuerdo con lo teórico.

Guiza & Villamizar,(2020). “*Beneficios del uso de cenizas volantes en las propiedades físico-mecánicas del producto cerámico de construcción, fabricado mediante proceso de extrusión*”. Trabajo de grado presentado para optar al título de Ingeniero Industrial. Universidad Francisco de Paula Santander. Recuperado de https://dspace-ufps.metabuscador.org/bitstream/handle/ufps/424/1191828_%201191825.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Este proyecto trata de los beneficios del uso de cenizas volantes en las propiedades físico-mecánicas, caracterización de la arcilla con el fin de analizar los resultados en cada uno de los ensayos, en lo que concluye que las cenizas volantes pertenecen a la clase F, procedentes del carbón bituminoso y con propiedades puzolánicas, lo que indica que este tipo de material de sustitución puede conferir una elevada resistencia mecánica al producto cerámico.

Los aportes de la anterior investigación dejan conocimiento teórico de como la incorporación de otras materias primas en los materiales arrojan efectos positivos en sus diferentes usos y como su incremento se ve evidenciado en las resistencias mecánica a la flexión y demás propiedades de criterios determinantes para la calidad del espécimen.

2.2 Marco contextual

2.2.1 Cemex Colombia



Figura 1. Logo Cemex

Nota. Cemex Colombia

Es una empresa que crea valor sostenido al proveer productos y soluciones líderes en la industria, para satisfacer las necesidades de construcción de las partes interesadas en todo el mundo. Se esfuerza por crear un mejor futuro para la gente, los clientes y los accionistas, consolidándonos como la compañía de materiales para la construcción más eficiente e innovadora.

2.2.2 Perfil de la compañía

Es una empresa líder global en la industria de materiales para la construcción con más de 100 años de experiencia y presencia en más de 50 países.

2.2.3 Misión

Crear valor sostenido al proveer productos y soluciones líderes en la industria para satisfacer las necesidades de construcción de nuestros clientes en todo el mundo.

2.2.4 Visión

Construyendo un mejor futuro.

2.2.5 Localización

El presente proyecto se desarrollará en Planta Cemex Los patios para beneficio de la industria Cemex Colombia S.A.

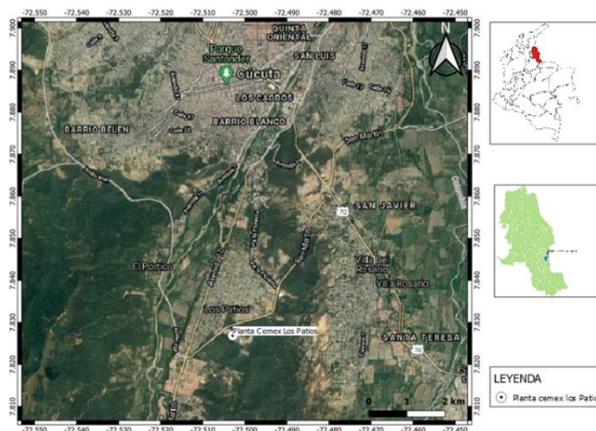


Figura 2. Ubicación de la planta Cemex en el municipio de los Patios, Norte de Santander

Nota. Cemex Colombia

2.3 Marco Teórico

Se consultaron diferentes autores para el desarrollo del proyecto, los cuales exponen conceptos, teorías, metodologías e instrumentos con la relación a la temática expuesta.

2.3.1 Arcillas.

Según Bemudez, (2013) en 1995 la AIPEA (Asociación Internacional Pour L' Etude des Argiles) y la CMS (Clay Minerals Society) redefinieron el termino de “arcilla”, donde la palabra arcilla hace referencia al material “natural” compuesto fundamentalmente por “mineral de grano fino”, el cual es generalmente “plástico” con apropiada cantidad de agua, que endurece cuando se seca al aire o calcina.

Así mismo (Díaz & Torrecillas, 2002) describe la arcilla como fruto de los agentes de meteorización físico- químicos actuante sobre la roca madre original de tamaño de grano fino ($<1 \mu\text{m}$ según los químicos que estudian los coloides, $< 2 \mu\text{m}$ según los mineralogistas e

investigadores del suelo y $< 4 \mu\text{m}$ según los sedimentólogos; y constituidas por variados minerales “silicatos aluminicos hidratados” con iones principalmente de Mg, Fe, K y Na.

2.3.1.1 Arcillas activadas.

Se entiende que la activación térmica de arcillas para producir puzolanas artificiales de elevada actividad es una de las tecnologías más importantes desarrolladas para reducir las emisiones de CO_2 en la fabricación del cemento, es por esto que la activación térmica de las arcillas para producir un material cementíceo suplementario (MCS) de extraordinaria calidad, su potencial basado en sus factores hidráulicos, sílice reactiva y alúmina reactiva, su proceso de producción y la optimización de su uso en los cementos. (Talero Morales et al., 2020)

2.3.1.2 Arcilla Caolinita o Caolín

Según (Ariana, 2016) la arcilla es un alumino-silicato hidratado, química está constituida por silicio (Si), aluminio (Al), Oxígeno (O) e hidrógeno (H), es por esto que el caolín es la arcilla más apetecible para la industrial, ubicándose como una de las puzolanas más empleadas para la obtención de cementos mezclados.

2.3.2 Clasificación del cemento.

Según la Norma Cementos NTC 121:2014 (2018), clasifica los cementos hidráulicos de acuerdo con sus propiedades físicas de la siguiente manera:

Tipo UG: Uso general utilizado en construcciones generales, cemento hidráulico.

Tipo ART: Alta resistencia temprana, este tipo de cemento desarrolla altas resistencias en una semana o menos.

Tipo MRS: Moderada resistencia a los sulfatos, se utiliza para elaborar concretos con requerimiento de desempeño moderados en resistencias a la compresión y resistencias a los sulfatos.

Tipo ARS: Alta resistencia a los sulfatos, se utiliza para la elaboración de concretos para ambientes agresivos.

Tipo MCH: Moderado calor de hidratación, desarrolla resistencia a una velocidad muy inferior a la de otros tipos.

Tipo BCH: Bajo calor de hidratación, se utiliza para proyectos en los que se requiere bajo calor de hidratación donde no se deban producir dilataciones durante el fraguado.

2.3.2.1 Cemento Portland.

El cemento Portland es un conglomerante hidráulico, el cual durante el proceso de clinkerización (1450 °C -1500 °C), la mezcla de las diferentes materias primas se combina para obtener las distintas fases mineralógicas del Portland. Las fases son: el silicato tricálcico (C_3S), silicato bicálcico (C_2S), aluminato tricálcico (C_3A) y una disolución sólida de ferritos-aluminatos cálcicos que se acerca con frecuencia a la composición C_4AF (aluminoferrato) (Mamlouk & Zaniewski, 2018).

En 1824, Aspdin patentó el cemento portland con este nombre por motivos comerciales, en razón de su color y dureza le recordaban a las piedras de Portland. Giordani & Leone, (2010)

Nombre del Componente	Fórmulas			Mineral	Densidad kg/m ³	Velocidad de Hidratación	Conten. % peso
	Componente	Oxido equival.	Corta				
Silicato tricálcico	CaO·Ca ₂ SiO ₄	3CaO·SiO ₂	C ₃ S	Alita	3150	Media	55
Silicato dicálcico	Ca ₂ SiO ₄	2CaO·SiO ₂	C ₂ S	Belita	3280	Lenta	20
Aluminato tricálcico	2CaO·Ca(AlO ₂) ₂	3CaO·Al ₂ O ₃	C ₃ A	Aluminato	3030	Elevada	
Aluminoferrita tetracálcica	CaO·Al ₂ O ₃ ·Fe ₂ O ₃		C ₄ AF	Ferrita	3770	Media-baja	
Sulfato de calcio hidratado	CaSO ₄ ·2H ₂ O	CaO·SO ₃ ·2H ₂ O	CSH ₂	Yeso	2320	Muy elevada	3.5
Oxidos alcalinos	K ₂ O, Na ₂ O, CaO						1.5

Figura 3. Constituyentes del cemento portland.

Nota. Recuperado de (Hormigones y morteros)

2.3.3 Parámetros de calidad cemento

De acuerdo con la producción de los diferentes tipos de cemento se realizan diferentes análisis para determinar sus propiedades y características para el control de calidad, en Colombia estos se ensayan se desarrollan bajo la norma NTC (Norma Técnica Colombiana). Tabla 2 y 3. Ficha Técnica Cemento 32na 32 Estructural y otros parámetros físicos, recuperado de (Tipo & Temprana, n.d.) y en la Tabla 4 y 5 se observa Ficha Técnica Cemento Hidráulico Uso General. (CEMEX, 2019)

Resistencia a compresión (MPa)	Método de ensayo	Resultado (MPa)	Requisitos NTC 121 Tipo ART (MPa)
1 día	NTC 220	Mínimo 13.0	Mínimo 11.0
3 días	NTC 220	Mínimo 24.0	Mínimo 22.0
7 días	NTC 220	Mínimo 32.0	No especificado
28 días	NTC 220	Mínimo 39.0	No especificado

Figura 4. Ficha técnica cemento hidráulico estructural.

Nota. Recuperado de Cemex, Colombia- Planta Los Patios.

Otros parámetros físicos	Método de ensayo	Resultado	Requisitos NTC 121 Tipo ART
Cambio de longitud por autoclave (%)	NTC 107	Máximo 0.8%	Máximo 0.8%
Tiempo de fraguado inicial (min)	NTC 118	Mínimo 60min Máximo 220min	Mínimo 45 min Máximo 420 min
Contenido de aire en volumen de mortero (%)	NTC 224	Máximo 12%	Máximo 12%
Expansión de barra de mortero 14 días (%)	NTC 4927	Máximo 0.02%	Máximo 0.02%

Figura 5. Ficha técnica otros parámetros físicos cemento hidráulico estructural.

Nota. Recuperado de Cemex, Colombia- Planta Los Patios.

Resistencia a compresión (MPa)	Método de ensayo	Rango de resultados	Requisitos de norma
1 día	NTC 220	8.0 – 13.0	No especificado
3 días	NTC 220	14.0 – 21.0	Mínimo 8.0
7 días	NTC 220	18.0 – 24.0	Mínimo 15.0
28 días	NTC 220	24.0 – 28.0	Mínimo 24.0

Figura 6. Ficha técnica cemento hidráulico uso general.

Nota. Recuperado de Cemex Colombia S.A

Otros parámetros físicos	Método de ensayo	Rango de resultados	Requisitos norma
Cambio de longitud por autoclave (%)	NTC 107	0.01 - 0.15	Máximo 0.80
Tiempo de fraguado inicial (min)	NTC 118	100 - 150	Mínimo 45, Máximo 420
Contenido de aire en volumen de mortero (%)	NTC 224	4 - 8	Máximo 12
Expansión de barra de mortero 14 días (%)	NTC 4927	0.000 - 0.016	Máximo 0.020

Figura 7. Ficha técnica otros parámetros físicos cemento hidráulico uso general.

Nota. Recuperado de Cemex Colombia S.A

2.3.3.1 Finura

En Colombia la NTC 294: 2018 establece el Método de Ensayo para Determinar la finura del cemento Hidráulico sobre el Tamiz de 45um (N. 325). La finura del cemento portland o también llamado módulo granulométrico es una propiedad importante dentro del desarrollo de las características cementantes, la finura está ligada al tamaño de las partículas del cemento, en libro Diseño y Control de mezclas de concreto, según Kosmatka, Kerkhoff, Panarese & Tanesi, el 95% de las partículas del cemento son menores a 45 um con un promedio de 15 um. Steven H. Kosmatka, (2004). Por otro lado, se entiende que, a mayor finura, mayor será el área superficial y se producirá una hidratación más rápida.

2.3.3.2 Pérdida por fuego

Según el libro ASLAND “Investigación y desarrollo” se entiende por pérdida de fuego el fundamento por calcinación a temperatura suficiente, para eliminar el agua y descomponer los carbonatos de óxido, este procedimiento se lleva a cabo en un horno mufla a $950\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$.

2.3.3.3 Resistencia a la compresión

En los métodos de ensayo determinados por la normal NTC 220: 2017 se realizan ensayos de resistencia a la compresión de acuerdo con unos parámetros de tiempos establecidos, la norma requiere que los cubos a usar tengan una medida de 50mm de lado. Adicional se establece que uno vez retirados los cubos fabricados que se encuentran en la cámara húmeda deben ser ensayados 1, 3,7 y 28 días.

2.3.4 Difracción de Rayos X (DRX)

La difracción de rayos X (DRX) se ha utilizado para analizar la composición de suelos e identificar minerales, aleaciones, metales, materiales catalíticos, ferroeléctricos y luminiscentes entre otros. Un difractograma ayuda a determinar la estructura cristalina y la composición de un material, e incluso, a partir de un difractograma se puede calcular los tamaños de grano, la difracción se ha consagrado como una herramienta indispensable para estudios en estado sólido y ciencia de materiales. (Aparicio y Carbajal, 2010)

2.3.5 Fluorescencia de Rayos X (FRX)

Cerquera et al., (2017) cita a Figueroa & Ortiz (2012) donde determina que la fluorescencia de rayos X (FRX) es una técnica espectroscopia que utiliza la emisión secundaria o fluorescente de radiación X generada al excitar una muestra con una fuente de radiación X. La radiación X incidente o primaria expulsa electrones de capas interiores del átomo. Los electrones de capas más externas ocupan los lugares vacantes, y el exceso energético resultante de esta transición se disipa en forma de fotones, radiación X fluorescente o secundaria, con una longitud de onda característica que depende del gradiente energético entre los orbitales electrónicos implicados, y una intensidad directamente relacionada con la concentración del elemento en la muestra.

Además, tiene como finalidad principal el análisis químico elemental.

2.3.6 Puzolana

Según como lo define la norma ASTM C 618, las puzolanas son materiales silíceos o aluminio-silíceos quienes por sí solo poseen poco o ningún valor cementante, pero cuando se han dividido finamente y están en presencia de agua reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio $[Ca(OH)^2]$ a temperatura ambiente para formar compuestos con propiedades cementantes, las puzolanas se pueden diferenciar en dos tipos, naturales e industriales. ASTM, (2019).

Por otro lado, se tiene los materiales puzolánicos, que son aquellos que presentan una baja tasa de disolución en relación con un material hidráulico y que en algunos casos requieren de un activador que facilite el inicio de la relación, el activador en el caso de las puzolanas puede ser el hidróxido de calcio $[Ca(OH)^2]$ el cual es uno de los subproductos de la reacción del cemento con el agua. (Moreno, n.d.-a).

2.3.6.1 Evaluación de la actividad puzolánica

El criterio más conocido para evaluar la puzolanicidad es la determinación del índice de actividad de resistencia (IAR) cuyo cálculo se especifica en la NTC 3823: 2020, a partir de la elaboración de cubos de cemento con un porcentaje de arcilla activada y cubos sin este aditivo.

El índice de actividad de resistencia se determina con la Ecuación 1:

$$IAR = \frac{A}{B} \times 100 \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde, A= es la resistencia a la compresión de los cubos de ensayo en Mpa.

B= Resistencia a la compresión de los cubos de control

De acuerdo con la NTC 3493-2019, el IAR con cemento portland a los 7 y 28 días debe ser como mínimo 75% respecto al control.

2.4 Marco Conceptual

Alúmina. La alúmina es el óxido de aluminio (Al_2O_3), junto con la sílice es el ingrediente más importante en la constitución de las arcillas y los barnices, confiriéndoles resistencia. (Al & Vickers, n.d.)

Calcáreo. El concepto alude a lo que contiene cal o específicamente carbonato de calcio ($CaCO_3$), por lo tanto lo calcáreo es calizo. (J., Gardey, A., 2008)

Calcinación. Se entiende por calcinación el tratamiento térmico que se le da a un material para provocar su oxidación, en caso de material inorgánico, el supuesto más tipo es la oxidación del carbonato de calcio o magnesio para la producción del óxido cálcico. (Rotativa, n.d.)

Caliza. Se define caliza como una roca sedimentaria que posee más del 50% de $CaCO_3$ (Carbonato de Calcio), fundamentalmente calcita y aragonito. (Geotecnia Facil, 2022)

Cementeras. Hace referencia al cemento, ya sea la máquina que lo produce, la fábrica o la industria. (Cementera)

Cementos. Polvo fino que se obtiene de la calcinación a 1,450 °C de una mezcla de piedra caliza, arcilla y mineral de hierro.(Cemex, Cemento)

Clinker. Es un producto en forma de gránulos o pequeñas bolas, de entre 0,5 y 25mm, principalmente, que se forma a partir de la calcinación de caliza, arcilla y otros componentes minoritarios, a temperaturas que oscilan entre los 1350 y 1450 °C (Clinker, Cemex España)

Combustible Fossil. Son combustibles fabricados por procesos geológicos, no son considerados una fuente de energía renovable, entre los combustibles fósiles incluyen el carbón, petróleo y gas natural. (Français, n.d.)

Emisiones CO₂. El dióxido de carbono es el principal gas de efecto invernadero que se emite a raíz de las actividades del ser humano. Emisiones de Dióxido de Carbono,(2014)

Horno rotativo. Es una cámara cilíndrica en rotación sobre su propio eje y levemente inclinada. Se concibe para gasificar residuos sólidos, lodos o líquidos viscosos. Tiene una llama en la parte superior y está revestido con refractario. (Bruno & Gomez, 2015)

MCS. Materiales cementantes suplementarios, son materiales inorgánicos que contribuyen en las propiedades de una mezcla cementicia a través de la actividad hidráulica, puzolánica o ambas. (Moreno, n.d.-b)

Puzolanas. Son materiales naturales o artificiales que contienen sílice y/o alúmina, las puzolanas pueden reemplazar de 15 a 40% del cemento portland sin reducir significativamente la resistencia del concreto. (Puzolanas et al., n.d.)

2.5 Marco Legal

Tabla 1. Marco Legal

Marco Legal	
Norma	Contenido
Estatuto Estudiantil Universidad Francisco de Paula Santander Cúcuta.	En el capítulo 1 del estatuto estudiantil trata sobre la realización del trabajo de grado, en este se dan las pautas necesarias para ejecución de un trabajo óptimo y se dan los objetivos que busca la universidad para que los estudiantes elaboren un trabajo de investigación.
ASTM C 618-03 del 2003.	Standard Specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete. Según la cual establece la composición química debe ser tal que la suma SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3 expresados

	como porcentaje en masa sea superior al 70%.
NTC 1784.	Determinación de la actividad puzolánica. Método de contribución a la resistencia a la compresión.
NTC 220.	Determinación de las resistencias de morteros de CH a la compresión.
NTC 30.	Cemento Portland. Clasificación y Nomenclatura.
NTC 31.	Cemento. Definiciones
NTC 112.	Mezcla Mecánica de pastas y morteros de CH de consistencia plástica.
NTC 321.	Cemento Portland. Especificaciones Químicas

Nota. Elaboración Propia

3. Diseño Metodológico

3.1 Tipo de investigación

Según Guevara et al., (2020) como se citó según Fidias Arias, autor del libro el proyecto de investigación (Arias, 2015) “La investigación experimental es un proceso que consiste en someter a un objeto o grupo de individuos en determinadas condiciones, estímulos o tratamiento (variable independiente), para observar los efectos o reacciones que se producen (variable dependiente)”

Es por esto el tipo de investigación en el desarrollo del proyecto no solo consta de lo experimental, además de lo analítico con la capacidad de analizar los datos que se obtuvieron de los diferentes ensayos en comparación entre las diferentes muestras, de cierto modo su aporte teórico-práctico por el fundamento del seguimiento del proceso evaluando cada una de las diferentes características.

3.1.1 Diseño Experimental

Se evaluó la actividad puzolánica mediante la determinación de la resistencia a la compresión, se produjo primero el blanco que es la muestra patrón con que se evaluó las diferentes muestras de arcillas, este blanco fue conformado por Clinker/yeso. Luego se prepararon las mezclas de Clinker/Yeso + Arcilla; este ensayo se realizó bajo los estándares establecidos en la compañía que establece 70% muestra patrón y 30% muestra a evaluar qué en este caso es 70% Clinker/Yeso y 30% Arcilla activada, las muestras fueron identificadas de la

siguiente manera NP-4294, PI-1333, NP4229, NP-4156, PI-1121, PI-1374 las cuales se caracterizaron de acuerdo con su composición química y mineralógica.

Tabla 2. Identificación de muestras de arcillas.

Mezcla	Arcilla	Composición
1	NP-4294	70% Blanco de cemento 30% Arcilla
2	PI-1333	70% Blanco de cemento 30% Arcilla
3	NP- 4229	70% Blanco de cemento 30% Arcilla
4	NP-4156	70% Blanco de cemento 30% Arcilla
5	PI-1121	70% Blanco de cemento 30% Arcilla
6	PI-1374	70% Blanco de cemento 30% Arcilla

Nota. Elaboración Propia

1 Tipo de Muestra x 12 Cubos = 12 Cubos de Mezcla

6 Muestras x 12 Cubos = 72 Cubos de Mezcla

Para la evaluación de la resistencia; así como, de la puzolanicidad de las mezclas, se siguió lo estipulado por la NTC 220, la cual indica que los ensayos se deben realizar a 1, 3,7 y 28 días; ensayando 3 especímenes para cada edad.

3.1.2 Descripción desarrollo del proyecto

Tabla 3. Descripción de la preparación y procedimiento de análisis de las muestras de arcilla.

PASO	DESCRIPCIÓN	EQUIPO
HOMOGENIZACIÓN	Homogenizar y cuartear 2 veces la muestra. Después del segundo cuarteo se separa entre un (1) kilogramo y 500 gramos, que se guardarán en una bolsa plástica debidamente identificada.	Cuarteador.
SECADO	Los 500 gramos de muestra se introducen en un recipiente y es llevado a la estufa por 8 horas para que es el exceso de humedad sea retirado.	Estufa industrial
TRITURAR	Inicialmente la muestra se pasa por la trituradora de mandíbula.	Tituradora de discos – Mandíbula

	Dependiendo del tamaño la muestra se pasa la muestra por la trituradora de discos.	
PULVERIZAR	Se pesan 30 gramos de muestras y se introducen en un dado por 30 segundos, luego se separa 15 gramos de la muestra pulverizada en una bolsa plastica y los otros 15 gramos que quedan en el dado se les adiciona 0,6 gramos de acido salicilico y se pulverizan por 30 segundos de nuevo.	Moledor Herzong
PRENSADO	Se pesan 0,60 gramos de la muestra pulverizada y son llevados a la prensa herzong para arma la pastilla prensada.	Pensar Herzong
LECTURA RAYOS X	Se procede a leer la pastilla en el rayos X y conocer su composición química.	Rayos X
PERDIDA POR FUEGO	Se pesa 1 gramo de la muestra pulverizada en un crisol y es llevada a una mufla a 700° por dos horas.	Balanza analítica – Mufla

CALCINACIÓN DE ARCILLA	Se introduce en un recipiente 300 gramos de arcilla y son llevados a la mufla a 700°C por dos horas.	Mufla- balanza
MOLIENDA	La muestra de arcilla calcinada es llevada al molino de bolas y se introduce por dos horas.	Molino de bolas
FINURA	Se toma 10 gramos de la muestra pasada por el molino y se coloca en el tamiz RTM325.	Tamizador
ORGANIZAR Y PESAR MATERIALES	Pesar el 70% de Clinker/Yeso y el 30% de arcilla calcinada, arena 2750, H_2O .	Balanza analítica – Mufla
HOMOGENIZACIÓN	Homogenizar por 15 min el Clinker/Yeso y la Arcilla activada.	N/A
MEZCLA DE MORTEROS	<ul style="list-style-type: none"> ✓ En el recipiente de la mezcladora que se encuentra con agua agregar cuidadosamente la muestra. ✓ Posicionar el recipiente en la mezcladora y con la paleta 	Batidora

	<p>mezcladora encender por 30 segundos en velocidad 1.</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Luego agrega la arena en 30 segundos, detener la mezcladora y cambiar a velocidad 2 y arrancar por 30 segundos. ✓ Detener la mezcladora y dejar reposar por 90 segundos la muestra. ✓ Luego volver a mezclar en velocidad 2 por 1 minuto. 	
<p style="text-align: center;">FLUIDEZ DEL MOTERO</p>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Agregar 1 cuchara de la mezcla al molde de flujo dejándolo lleno hasta la mitad, luego darle 10 golpes de forma horizontal y 10 golpes de forma vertical con el compactador. ✓ Agregar de nuevo otra cucharada de la mezcla al molde de flujo dejando ± 2 cm de alto y volver a compactar como la primera vez. 	<p style="text-align: center;">Mesa de Fluidez</p>

	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Luego retirar el molde de manera cuidadosa del molde de flujo y se acciona equipo que genera 25 golpes a la mesa de flujo. ✓ Luego de los 25 golpes se mide la fluidez, la cual debe dar una fluidez de 110 ± 5. ✓ Devolver la muestra de la mesa flujo al recipiente y remezcla por 15 segundos en velocidad 2. ✓ Se procede agregar la mezcla en los cubos de 50MM. ✓ Una vez terminado se agregan a la cámara de curado. 	
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN	<p>Los morteros se fallan en un tiempo determinado de:</p> <p>1 día.</p> <p>3 días.</p> <p>7 días.</p> <p>28 días.</p>	<p>Máquina de Ensayos a Compresión.</p>

Nota. Elaboración Propia

3.2 Población y muestra

3.2.1 Población. La población objeto de estudio fue compuesta por los suelos arcillosos de diversos orígenes geológicos en Colombia.

3.2.2 Muestra. Las 6 muestras de arcilla perteneciente a suelos arcillosos de diversos orígenes geológicos en Colombia y serán enviadas a planta los patios, Cemex Colombia S.A.

3.3 Instrumentos para la recolección de la información

3.3.1 Fuentes primarias

Ensayos de laboratorio. Se realizaron análisis y ensayos de laboratorio los cuáles aportaron información relevante para la caracterización y evaluación de las muestras.

3.3.2 Fuentes Secundarias

Entre las fuentes secundarias que fueron de utilidad para el desarrollo del proyecto, se consultaron libros, proyectos de grado, artículos encontrados en bases de datos bibliográficas relacionada al proceso productivo del cemento, proceso del Clinker, arcillas activadas, puzolanas, además se empleó información suministrada en las asignaturas vistas de cerámicos I, II, III la cual generaron un gran aporte para completar los conocimientos acerca de los grupos de arcillas.

3.4 Análisis de la información

Para el análisis de la información relacionada al proceso, para la activación de las arcillas, descripción de las muestras, composición, caracterización, ensayos físicos, ensayos químicos, se agruparon y organizaron en tablas comparativas para un mayor análisis de los datos recolectados a su vez se elaboraron gráficas para conocer el comportamiento mediante curvas para esto se empleó como herramienta principal, Microsoft Office Excel.

4. Resultados y Discusión

4.1 Caracterización de la composición química y mineralógica de las arcillas

4.1.1 Preparación de la materia prima

Para el desarrollo del proyecto de investigación se llevaron a cabo varios procesos experimentales, los cuales fueron necesarios para ejecutar cada uno de los objetivos de este. La primera parte, la recepción y preparación de la materia prima, consistió en las siguientes actividades. Inicialmente se recibió el material arcilloso (Figura 8) este material es proveniente de suelos arcillosos de diversos orígenes geológicos en Colombia.



Figura 8. Recepción de muestras de arcillas para elaboración del proyecto.

Nota. Muestras de arcillas de diferentes orígenes geológicos. Elaboración Propia.

Durante el proceso, para la identificación y seguimiento del material recibido se procedió a codificar y posterior a esto se realizó pesaje de las arcillas crudas (Tabla 4).

Tabla 4. Datos de recepción de las muestras de arcilla.

N°	ID MUESTRA	PESO (GR)
1	NP-4294	1476,66
2	PI-1333	2045,2
3	NP-4229	1775,92
4	NP-4156	2081,77
5	PI-1121	1650,39
6	PI-1374	1714,89

Nota. Elaboración Propia.

A cada una de las 6 muestras se le realizó el proceso de secado en una estufa industrial a 180°C por tiempo estipulado de 8 horas con el fin de extraer la humedad con la que se recibió el material, la muestra se expande en un recipiente y se identifica con el ID muestra y se ingresa a la estufa (Tabla 5).

Tabla 5. Ingreso muestras de arcilla a estufa industrial.



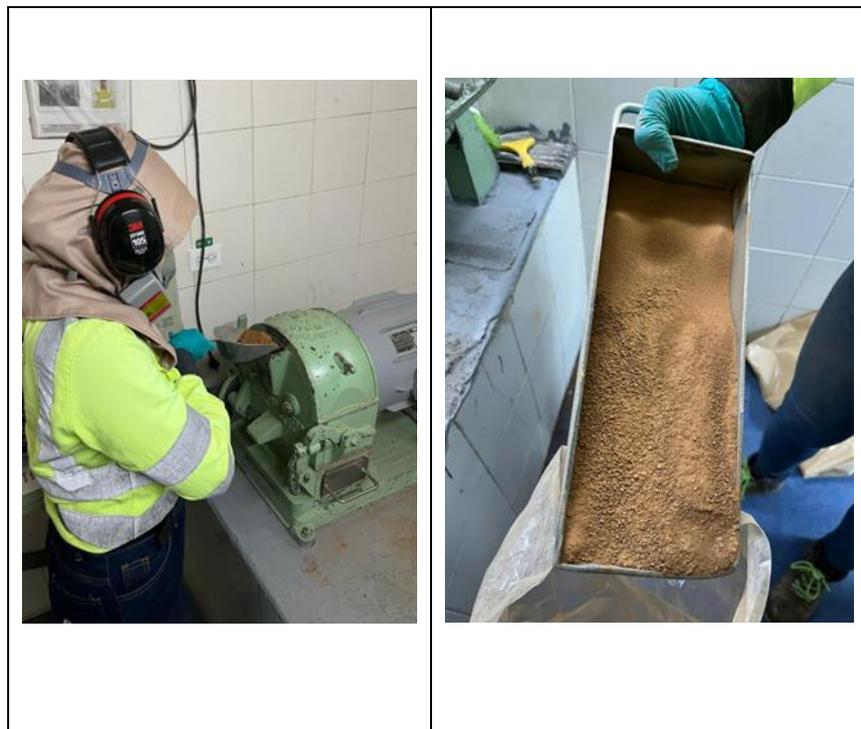
Nota. Elaboración Propia.

Seco el material se le realizó a cada muestra el proceso de trituración con el fin de disminuir el tamaño de partícula, inicialmente la muestra se ingresó en la trituradora de mandíbula (Tabla 6.)

Tabla 6. Trituradora de Mandibula.

Nota. Elaboración Propia.

Se realizó una inspección visual en la cual se considera si es necesario pasar nuevamente la muestra para reducir a menor tamaño la partícula, en este caso el procedimiento se realiza en una tritura de discos hasta obtener un aspecto pulverulento (Tabla 7.)

Tabla 7. Trituradora de discos.

Nota. Elaboración Propia.

4.1.2 Composición química de la arcilla (FRX)

Siguiendo la metodología descrita, después de caracterizar químicamente las arcillas y el blanco, teniendo en cuenta que para la industria del cemento se utiliza arcilla generalmente para producir harina que por medio de un proceso de calcinación se convierte en Clinker producido, estas arcillas a su vez se utilizan como correctivo de saturación (LSF) en harina cruda, y ajuste de módulos, ya que tiene un buen porcentaje de sílice (SiO_2), Aluminio (Al_2O_3) y hierro (Fe_2O_3).

Para su uso en la harina para la producción del Clinker, se tienen en cuenta estos módulos:

Saturación Harina Cruda (LSF)

$$LSF = \frac{CaO}{2.8 * SiO_2 + 1.18 * Al_2O_3 + 0.65 * Fe_2O_3}$$

Módulos Silícico y Aluminico

$$MS = \frac{SiO_2}{Al_2O_3 + Fe_2O_3}$$

$$MA = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3}$$

En el desarrollo de este objetivo se basó en las arcillas calcinadas y su potencial, observando la Tabla 8 la caracterización de las diferentes arcillas antes de ser sometidas a temperatura para ser activadas o convertirlas en puzolanas. Se pudo analizar que las arcillas tienen un grado de pureza mayor que otras, esto se debe a sus contenidos en porcentaje de sílice, las arcillas químicamente se definen como un silicato hidratado de alúmina cuya fórmula es:



En la reacción del cemento con agua, se generan dos productos, el gel de tobermorita y el hidróxido de calcio $Ca(OH)_2$, el gel de tobermorita es el elemento que genera la resistencia a la compresión en el cemento hidratado, el hidróxido de calcio es un residuo inevitable de la hidratación del cemento que incluso puede afectar su durabilidad.

En la reacción puzolánica, un material añadido al cemento reacciona con ese hidróxido de calcio y genera gel de tobermorita adicional que genera resistencias. Este material debe tener dos características, ser de naturaleza ácida o anfótera y ser amorfo o carecer de estructura cristalina.

Las arcillas tienen un alto contenido de aluminio y la sílice, estos son dos óxidos de carácter ácido por lo tanto que favorecerán la reacción puzolánica, por lo tanto, las arcillas con alto contenido de estos óxidos deberán presentar posibilidades puzolánicas. El otro parámetro importante es el carácter amorfo o ausencia de cristalinidad, este es el que se le proporciona a las arcillas durante el proceso de calcinación, es decir durante la calcinación se rompe la estructura cristalina de la arcilla, se le transforma en un sólido amorfo y con ello busca generársele propiedad puzolánicas.

Las arcillas calcinadas mejoraran la calidad del cemento y su comportamiento en cuanto a resistencia a la compresión, durabilidad y calor de hidratación.

Tabla 8. Composición química de la arcilla (FRX)

Componente	Denominación	NP- 4294	PI- 1333	NP- 4229	NP- 4156	PI- 1121	PI- 1374
SiO₂	Sílice	60,24	30,2	47,53	50,72	66,59	32,48
Al₂O₃	Alúmina	20,07	27,65	24,78	23,63	14,95	28,23
Fe₂O₃	Hierro	6,89	20,00	13,41	8,48	4,62	19,89
MgO	Magnesio	0,24	0,00	0,46	0,02	0,01	0,00
SO₃	Azufre	0,01	0,07	0,02	0,02	0,02	0,04
Na₂O	Sodio	0,14	0,02	0,14	0,04	0,06	0,02
K₂O	Potasio	3,00	0,04	4,57	0,48	0,49	0,60
Pxf	Perdida por fuego	7,26	19,7	9,49	12,06	7,95	18,59

Nota. Elaboración Propia.

De acuerdo con la Tabla 8, en materiales arcillosos sus componentes principales son el SiO_2 y el Al_2O_3 con valores significativos de Fe_2O_3 , los otros óxidos son caracterizados minoritarios con un porcentaje bajo lo cual es favorable puesto que su presencia en altas proporciones puede llegar a afectar la expansión del cemento, una vez se haya endurecido, haciéndolo propenso a la formación de grietas, se pudo observar que sus variaciones composicionales son amplias, variando SiO_2 desde 30,2 al 66,59, el Al_2O_3 de 14,95 al 28,23 y el Fe_2O_3 de 4,62 al 19,89, la composición química de las muestras presentan diferencias entre si ya que son muestras mineralógicas de diferentes suelos geológicos.

4.1.3 Evaluación de la mineralogía durante el proceso de calcinación mediante DRX.

Se evaluaron las muestras de arcillas mediante difracción de rayos X; para las muestras de arcillas sin calcinar y calcinadas, esto con el fin de analizar la estructura de composición mineralógica que contienen las muestras en la transformación de sus fases caoliniticas a metakaolín siendo este el material que desarrolla la reacción puzolánica.

Según la literatura de diversos autores donde se han realizado estudios acorde al parámetro optimo de la temperatura de activación para el caso del caolín se encuentra en el rango de 630 a 800 °C (Castillo et al., 2010).

En este proceso una vez las arcillas han sido trituradas, se adicionaron 300g en forma de cama en un recipiente y se ingresaron a una mufla a una temperatura de 700 °C por un tiempo estimado de 120min es aquí donde se le aplicó temperatura a la arcilla generando en ella modificándose a su estructura mineralógica, como se puede observar mediante las siguientes figuras.

En las figuras de DRX el eje X representa el ángulo de reflexión, cada muestra refleja ángulos característicos y por eso se pueden conocer, en el eje Y la escala vertical mide la intensidad con que se refleja, en donde la intensidad de la reflexión esta relacionada con la concentración de las fases minerales de cada muestra.

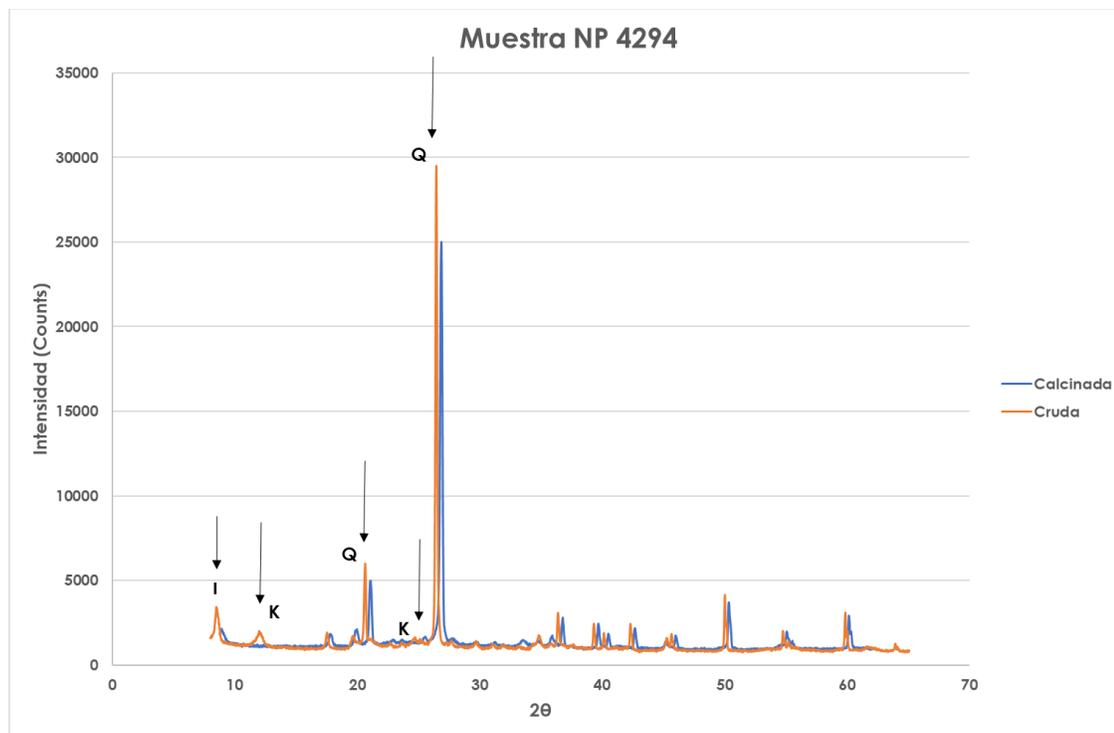


Figura 9.DRX Muestra NP-4294 Caolinita-Illita

Nota. Elaboración Propia.

En la Figura 9 la muestra original sin ser calcinada se tenía principalmente Illita y Kaolinita , durante el proceso de calcinación se observa que; la transformación del kaolin en metakaolin siendo este el que generará la reacción puzolanica, pero tanto la illita como el cuarzo se conservan, la illita es una arcilla que a la temperatura de (750°C) no pierde su estructura.

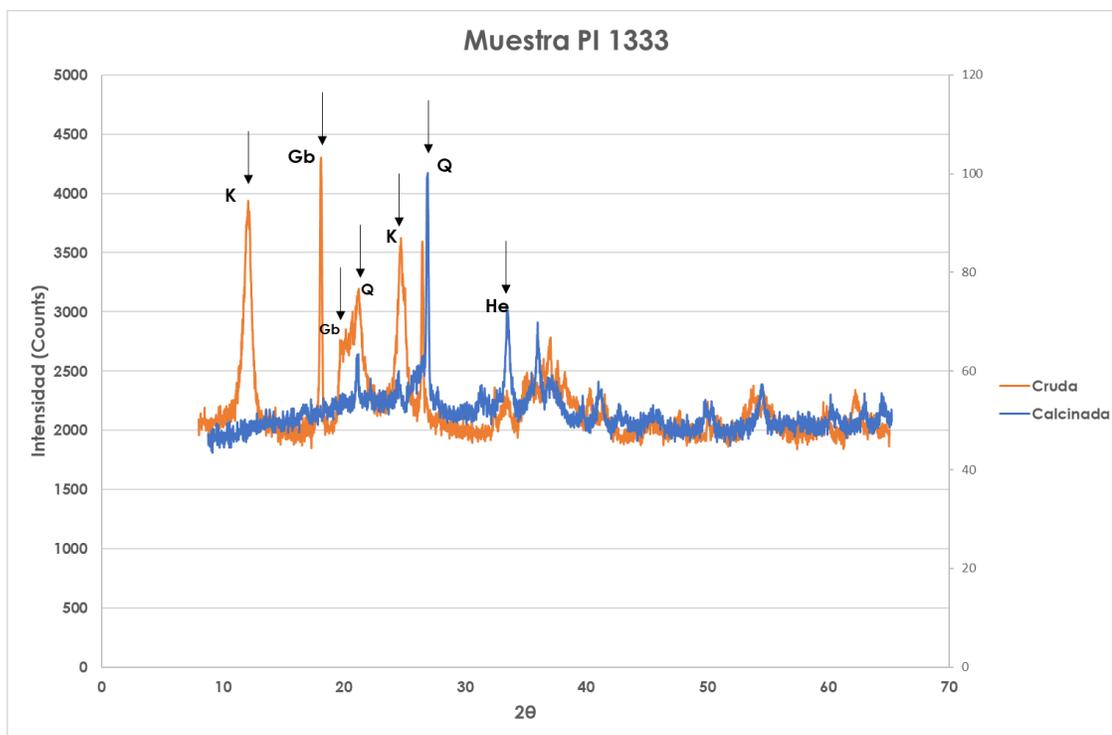


Figura 10. DRX Muestra PI-1333- Gibbsita

Nota. Elaboración Propia.

En la Figura 10 en la transformación mineralógica producida por la calcinación se observa que los picos de kaolín cambia su estructura a metakaolín al igual que la Gibbsita estas fases generan la reacción puzolánica, el cuarzo se conserva y se evidencia que al momento de aplicar temperatura se presentó un pico de hematita en un ángulo de aproximadamente 35°.

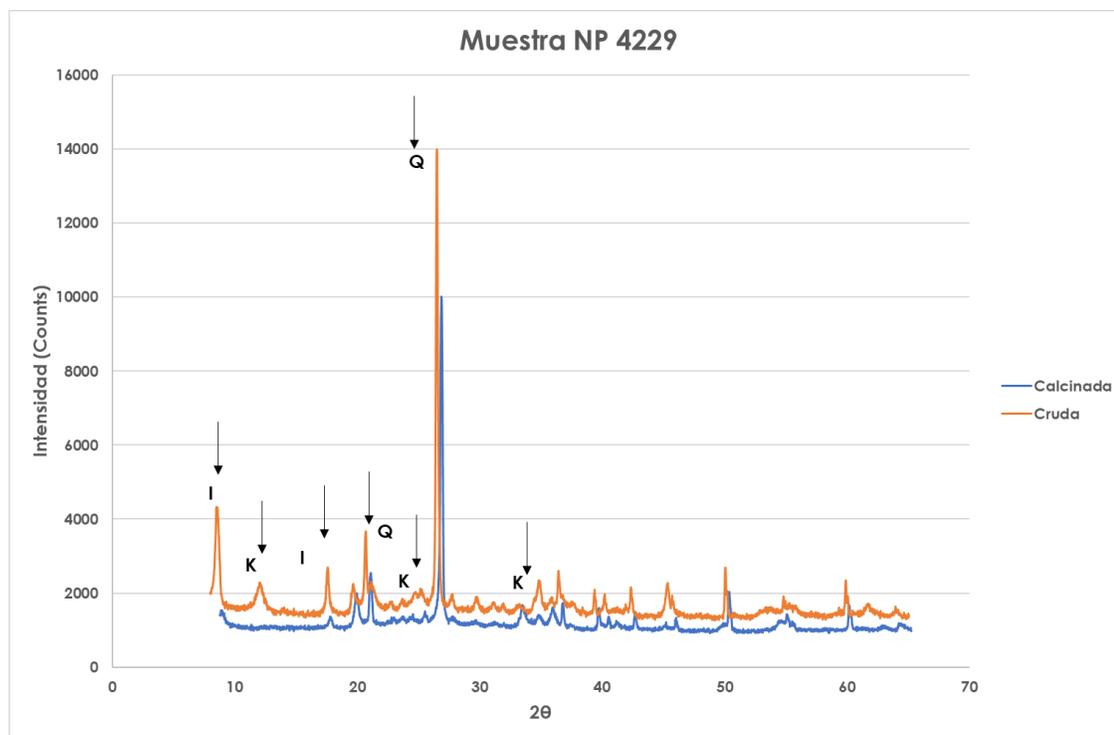


Figura 11. DRX Muestra NP-4229 Caolinita - Illita - Gibbsita

Nota. Elaboración Propia

En la Figura 11 se observa la presencia de tres fases de Kaolin con la arcilla en bruto al momento se aplicar calor cambia su estructura mineralogica siendo este un metakaolin apto al proceso.

Las fases de la Illita los picos presentes de los 8° y 18° solo disminuyen, pero no cambia por completo su estructura, este fenómeno se da por una orientación preferencial que sufrieron los cristales al ser preparados en la muestra calcinada. Es un fenómeno usual que se puede presentar durante la preparación de las muestras para XRD.

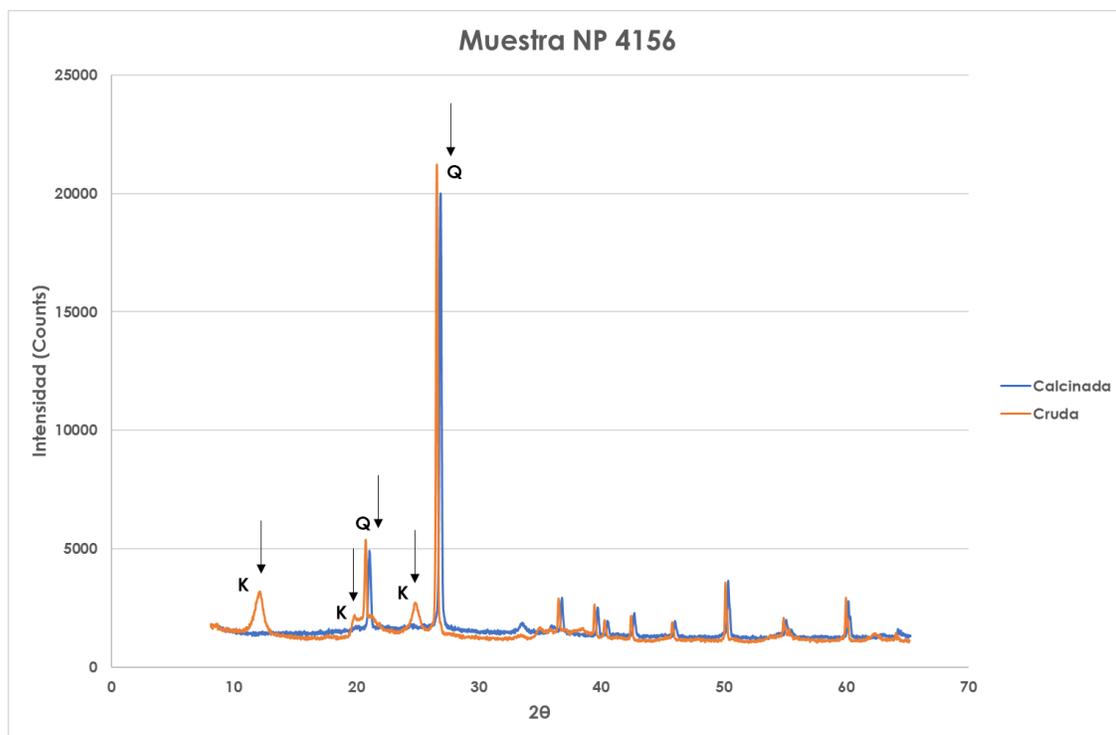


Figura 12. DRX Muestra NP-4156- Caolinita

Nota. Elaboración Propia.

En la Figura 12 en la muestra original se tenía principalmente Cuarzo, Kaolinita y durante el proceso de calcinación los picos de la Kaolinita se transforman en metakaolin, que es el material que desarrollará la reacción puzolanica, el cuarzo se mantiene.

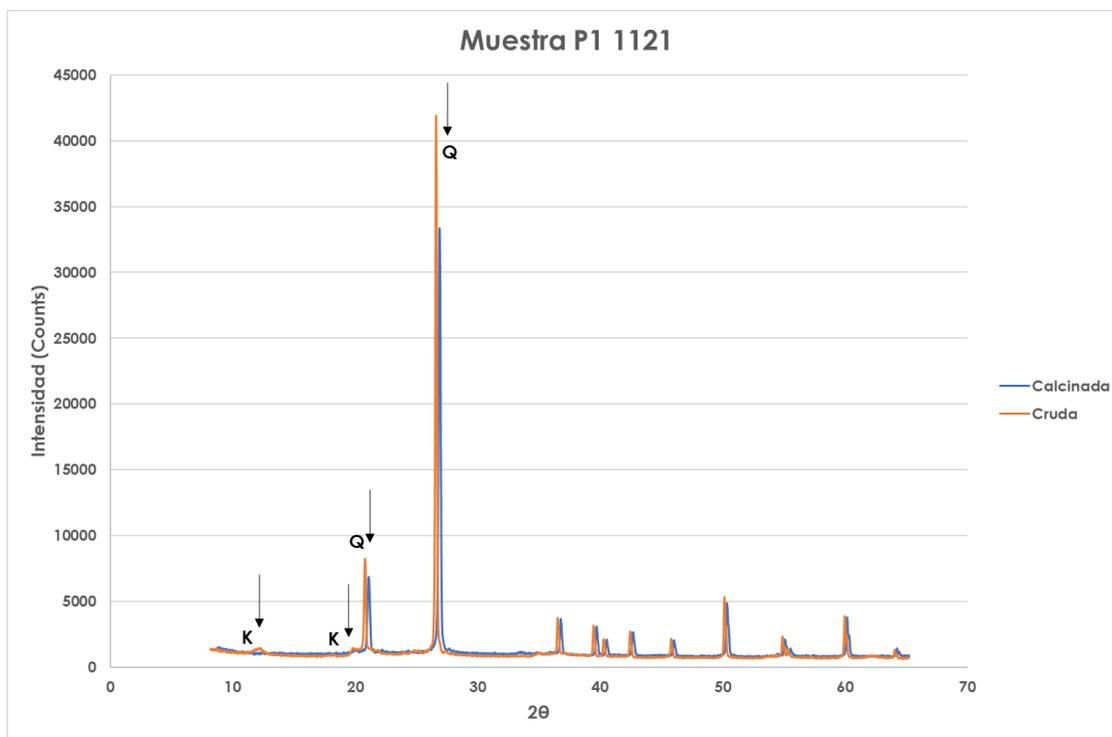


Figura 13. DRX Muestra PI-1121 Caolinita.

Nota. Elaboración Propia.

En la Figura 13 la muestra PI-1121 tiene similitud con la NP-5146, en el eje vertical se observa que la escala de intensidad es mayor a la de otras muestras, esto se debe porque presentaba más cuarzo y menos Kaolin, de igual manera se evidencia que se transforma a metakaolin.

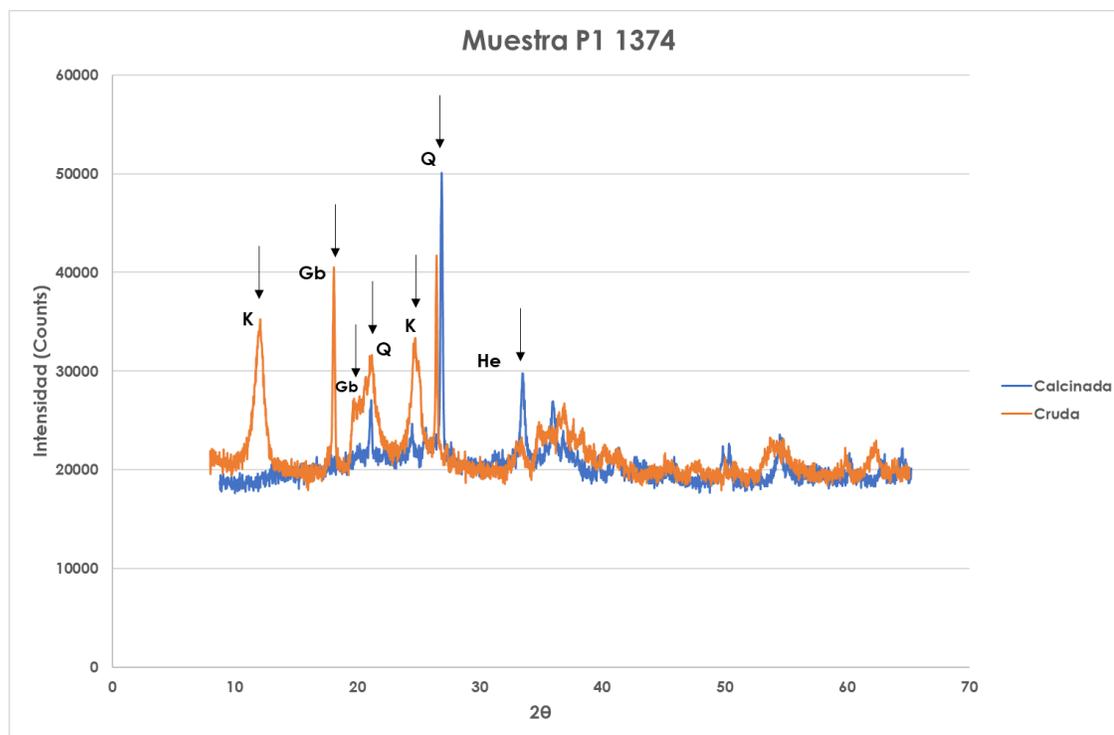


Figura 14. DRX Muestra PI-1374 Gibbsita.

Nota. Elaboración Propia.

En la Figura 14 la muestra PI-1374 tiene similitud con la PI-1333 donde en el proceso de calcinación su transformación mineralógica evidencia que los picos de kaolinita disminuyen por completo pasando a hacer presencia las fases de metakaolina al igual que la gibbsita es aquí donde se le da lugar a la reacción puzolánica, así mismo es donde se evidencia una fase de hematita al pasar por el proceso de calcinación y el cuarzo se conserva.

4.2 Determinación de la resistencia a la compresión en la mezcla blanco-arcilla

4.2.1 Elaboración de morteros con adición de arcilla calcinada

Para la utilización de la arcilla calcina las muestras primero fueron llevadas a un molino de bolas de escala de laboratorio con moledores de 20mm en un tiempo de 120 min por muestra de arcilla calcinada con el fin de reducir su tamaño de partícula. (Figura 14.)



Figura 15. Molino de bolas escala laboratorio.

Nota. Laboratorio de Cemex. Elaboración Propia.

En la elaboración de los morteros se realizó mediante el procedimiento de 70 % muestra patrón (blanco) y 30 % material puzolánico, que en el presente proyecto es la arcilla calcinada. Para cada una de las muestras, el procedimiento de homogenización se realizó de manera manual, pesando las cantidades necesarias de arcilla y muestra patrón (blanco). Seguidamente

cumpliendo con lo establecido en la NTC 220 (ICONTEC - Instituto Colombiano de Normas, 2008). Se realizó la mezcla de los materiales los cuales fueron arena ottawa, agua, muestra patrón+ arcilla calcinada, la homogenización de estos fue en una batidora hoobar por un tiempo establecido de 4min. Luego se determinó la fluidez la cual debe ser 110 ± 5 (Tabla 9).

Tabla 9. Fluidez muestra de ensayo.

MUESTRA	FLUIDEZ
1374	103
4294	107
1333	108
4229	112
1121	111
4156	107

Nota. Elaboración Propia.

En el llenado de los compartimientos se inició antes de 150s, contados desde la terminación de la mezcla inicial del mortero. En cada compartimento se colocó una capa de mortero de 25 mm y se apisonó con 32 golpes del compactador durante unos 10 s. Estos golpes se aplicaron sobre la superficie del mortero, en cuatro etapas de ocho golpes adyacentes cada una. En cada etapa se golpeó siguiendo una dirección perpendicular a la anterior. La presión del compactador debe asegurar el llenado uniforme de los compartimientos completando las cuatro etapas de compactación (32 golpes) en cada compartimento antes de continuar con el siguiente. Una vez se

finalizó la operación anterior en todos los compartimentos, se llena con una segunda capa y se apisonaron como se hizo anteriormente. El mortero depositado en los bordes del molde se retiró con la ayuda de un palustre como se observa en Tabla 10.

Tabla 10. Elaboración de cubos de morteros.



Nota. Elaboración Propia.

Terminada la operación de llenado, el conjunto formado por los cubos se ubicó en la cámara húmeda durante un período de 20h a 24 h, con las caras superiores de los cubos expuestas al aire húmedo, cumplido este periodo se retiraron los cubos de morteros de los moldes y se organizaron en una pileta de curado (agua+cal) a una temperatura $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ según las fechas a determinar la resistencia a la compresión 1,3,7,28 días.

Los cubos de mortero a un día de edad se le determinó la resistencia a la compresión una vez fueron retirados de los moldes, este proceso se realizó en la máquina de ensayos a la compresión, Así mismo se realizó el procedimiento en los demás cubos de mortero acorde al cumplimiento de las edades.

4.2.2 Determinación de la resistencia a la compresión según la norma NTC 220.

Se midió la resistencia a la compresión del cemento blanco y de las mezclas del cemento blanco con la adición de arcillas calcinadas, se realizó el análisis donde dicho factor disminuye respecto al blanco, los datos se observan el Anexo 1 y su representación gráfica (Figura 17); en donde los valores se encuentran comparados con el requisito mínimo exigido por la NTC 121.

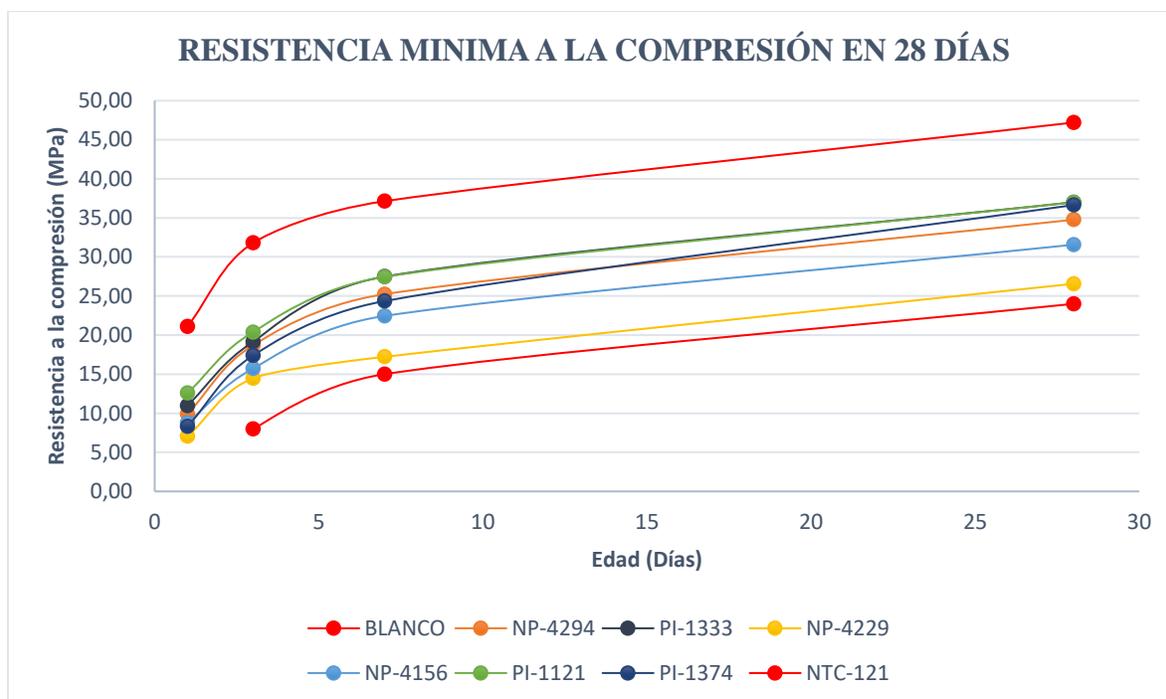


Figura 16. Resistencia mínima a la compresión en 28 días.

Nota. Elaboración Propia.

En la figura 17 se evidencia que a partir del día 7 los valores de resistencia aumentan en las muestras las mezclas PI-1333, PI-1121, PI-1374 y NP-4294 de manera lineal y para el día 28 las mezclas alcanzan valores similares de resistencia a la compresión. Al ser comparadas con el blanco, las mezclas presentan valores inferiores, resultado esperado, teniendo en cuenta que el principal elemento generador de resistencia en la mezcla es el cemento puro y dado que en las mezclas este compuesto se encuentra en menor proporción, su resistencia es menor, Sin embargo, en el presente caso de estudio, los datos obtenidos se encuentran dentro de los límites inferiores permitidos por la NTC-121.

4.3 Análisis de los resultados obtenidos.

El cálculo del índice de actividad de resistencia (IAR) permitió visualizar la variación de la puzolanicidad de las diferentes arcillas calcinadas (la muestra patrón que es el blanco no tiene puzolanicidad ya que es solo Clinker y yeso por lo tanto no se presenta reacción puzolánica, esta se da en las arcillas calcinadas y lo que se buscó es igualar al blanco con la adición puzolánica). Dichos resultados se presentan en la tabla 11 en donde las mezclas PI-1333, PI-1121, PI-1374 presenta una resistencia mayor al 75% de la resistencia del cemento blanco para el día 28 dentro del requisito establecido por NTC- 3493, es decir puesto que la mezcla tenía solo 70% de cemento, si la resistencia en la mezcla solo fuera por la presencia de este 70% de cemento blanco, la resistencia a 28 días debería ser de solo el 70% del cemento de muestra patrón, por lo tanto como fue mayor al 75%, este valor adicional se interpreta que el producto de la reacción puzolánica es de arcilla calcinada, así mismo la muestra NP-4294 obtuvo un valor mayor al 70% para el día 28.

El mecanismo puzolánico implica una reacción inicial lenta, pero a edades tardías, posteriores a 7 días, la presencia de las arcillas calcinadas en las mezclas se manifiesta en una actividad mayor al 70%. Si, las arcillas calcinadas no ejercieran influencia en la actividad puzolánica, los valores se mantendrían bajos, similares a los del día 1 y 3 y no pasarían del 70% de la resistencia de la muestra patrón. En el cemento blanco el único elemento que aportara resistencias es el cemento, no hay reacción puzolánica, por esta razón a edades tardías las mezclas de arcillas calcinadas tienden a acercarse a estos valores; el índice de puzolanidad aumenta con la edad. Lo cual significa que las arcillas calcinadas son un material apto para ser usado como aditivo en el cemento.

Tabla 11. Índice de actividad de resistencia.

IAR	BLANCO	NP- 4294	PI- 1333	NP- 4229	NP- 4156	PI- 1121	PI- 1374
PUZOLANIC.	21,11	46,90	52,01	33,40	41,54	59,59	39,32
1D							
PUZOLANIC.	31,80	58,81	60,22	45,53	49,43	64,12	54,69
3D							
PUZOLANIC.	37,13	67,95	74,01	46,38	60,46	73,93	65,58
7D							
PUZOLANIC.	47,20	73,67	78,39	56,29	66,89	78,39	77,63
28D							

Nota. Elaboración Propia.

Adicional a lo anterior expuesto, se construyó la curva de índice de puzolanicidad con relación a la edad en días para las mezclas preparadas, observar gráfico (Figura 18).

Allí, es posible observar el efecto que tiene la adición de arcilla calcinada sobre las mezclas; puesto que; si el cemento fuese el único elemento aportante a resistencia, todos los puntos de resistencias deberían caer por debajo del 70%.

Los puntos de resistencias por encima del 70% indican, que son producto de la reacción puzolánica; estas resistencias tardías son mayores a las esperadas cuando el único elemento aportante de resistencias es el cemento puro.

El presente estudio se realizó seguimiento de las resistencias solo hasta 28 días.

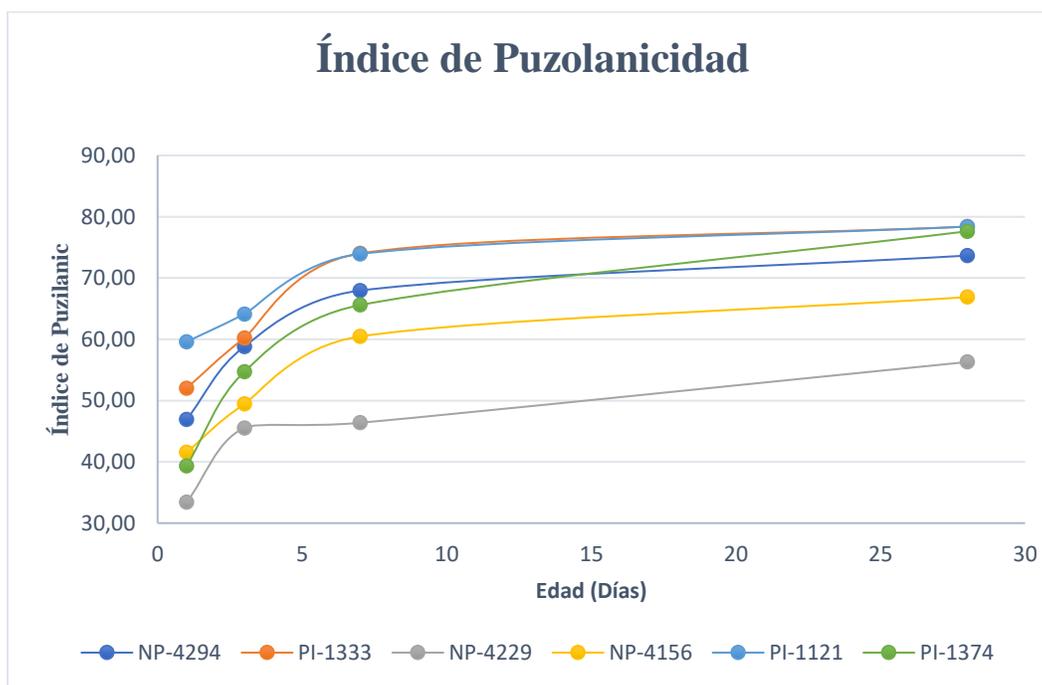


Figura 17. Índice de puzolanicidad

Nota. Elaboración Propia.

5. Conclusiones

Tras la caracterización química y mineralógica de las muestras de arcillas sin calcinar y calcinadas, se pudo determinar que contienen 70% en su contenido de SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3 , caracterizándolas como posiblemente puzolanas, lo cual es importante para las industrias cementeras la implementación de estos estudios.

Durante el proceso de arcillas sin calcinar mediante la realización de DRX se pudo determinar que hay presencia de tres minerales arcillosos, Caolinita (K), Illita (I) y Gibbsita (Gbs) adicional el Cuarzo (Q), la importancia de que a las muestras de arcillas se les aplicará la temperatura de 700°C fue observar nuevamente como esa fase de Caolinita se transformaba en Metakaolin (MK), siendo este el factor que aporta a desarrollar la reacción puzolanica.

El ensayo de la resistencia a la compresión, se evidencio que los datos de las mezclas están por debajo de la muestra patrón, es debido a que la mezcla solo presenta un 70% de cemento puro y el 30% es adición, aun así, es significativo ya que se encuentra dentro de los parámetros mínimos establecidos en la NTC-121.

La adición de las arcillas calcinadas en un 30% en mezcla con cemento ayuda a mejorar la resistencia del cemento al aumentar continuamente el índice de actividad puzolánica a partir de los siete días, comparado con el blanco.

De acuerdo con la norma NTC 3493 con respecto al requisito del índice de actividad de resistencia la evaluación de las muestras de arcillas calcinadas que cumplen con lo establecido son PI-1333, PI-1121, PI-1374 siendo estas las que presentan un porcentaje mayor al 75% a los 28 días de edad.

6. Recomendaciones

Se considera pertinente realizar otros tipos de ensayos físicos en propiedades de peso específico, % cal libre, finura Blaine y tiempos de fraguado, con el fin se observar el comportamiento de la adición en un 30% de arcilla calcinada.

Se sugiere realizar el proceso de calcinación mediante diferentes temperaturas y de esta manera, analizar y evaluar las diferentes transformaciones en su estructura mineralógica.

Se aconseja analizar la factibilidad económica de la adición del 30% arcilla calcinada a la mezcla del cemento.

Bibliografía

- Alvarez, A. (2013). Activación Térmica de Arcillas de la Región de Cayo Guam para su Aprovechamiento como Material Puzolánico Activación Térmica de Arcillas de la Región de Cayo Guam para su Aprovechamiento como Material Puzolánico. 73.
- Andrew, R., Cicero, C., Clim, I. & Project, G.C. (2022). La industrial del cemento duplicó sus emisiones en 20 años.
- Aparicio Ceja Martha Eloisa, & Carbajal Arizaga Gregorio Guadalupe. (2010). Utilidad De La Difracción De Rayos X. Mundo Nano, 3(2), 62–72.
- Beltramini, L., & Guillarducci, A. (2013). Puzolanas artificiales. Estudio de la activación térmica de residuos de carbón. Jit 1,1-4.
- Bermudez, Y. (2013). Activación Termica de Arcillas Caoliniticas para el Desarrollo y Aplicación de Nuevos Productos.
- Bruno, I., & Gomez, A. C. (2015). Horno rotativo. 2–3.
- Catalog, S. (2019). Register or Log in for to additional content direct access ASTM International - ASTM C618-19 Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete Active. 1–6.
- Cementos Tequendama. (2018). Tipos de cementos y características según NTC 121. Cetesa, 1.
- CEMEX. (2019). Cemento Hidraulico. Uso general. 9, 3.
- CEMEX. (2021). Nuestros Objetivos 2030 – CEMEX. 2030.
- Cerquera, A., Rodriguez, C., & Ruano, D. (2017). Analisis mineralógico, quimico y porosimétrico de los agregados pétreos de una cantera perteneciente a la formación geológica de la Sabána en el municipio de Soacha - Cundinamarca. Universidad Catolica de Colombia, 1–58.
- Definición Cemento, Cemex. (n.d.). 23.

Definición Clinker, Cemex España. (n.d.). 303.

Díaz, L., & Torrecillas, R. (2002). Cerámica y Vidrio de sus distintos tipos , significados y aplicaciones. Boletín de La Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, 41(5), 459–470.
<http://digital.csic.es/bitstream/10261/4676/1/arcillas.pdf>

El, M. A., Mundial, B., Unidos, E., & Unidos, E. (2014). Emisiones De Dióxido De Carbono ? 5–6.

Espectador, E.L. El Cemento También es Responsable del Cambio Climático, ¿Podremos Sustituirlo?

Fidias G Arias . (2012). Libro El Proyecto de Investigación, Introducción a la Metodología científica. 6ª Edición.

Figura 14.8. Esquema de la constitución de un hormigón. (n.d.). 14–16.

Français, E. (n.d.). Combustible fósil. 2–3.

Geotecnia Facil. (2022). Caliza roca: Descripción, propiedades y características. 1–13.
<https://geotecniafacil.com/caliza-roca/>

GESTIÓN DE RECURSOS Y SERVICIOS RESUMEN TRABAJO DE GRADO Código Página
 AUTOR (ES): NOMBRE (S): MARTHA MILENA APELLIDOS : GUIZA GONZÁLEZ
 NOMBRE (S): YESSICA CAROLINA APELLIDOS : VILLAMIZAR DELGADO
 FACULTAD : INGENIERÍA PLAN DE ESTUDIOS : INGENIERÍA I. (2014).

Giordani, C., & Leone, D. (2010). Docentes: Ing. Claudio Giordani Ing. Diego Leone 1º Año Ingeniería Civil – Comisión 02 – Turno Tarde. Artículo, 1(encofrado), 1–6.
[https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/civil/1_anio/civil1/files/IC Pavimentos.pdf](https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/civil/1_anio/civil1/files/IC_Pavimentos.pdf)

Guevara, G., Verdesoto, A., & Castro, N. (2020). Educational research methodologies (descriptive,

- experimental, participatory, and action research). *Revista Científica Mundo de La Investigación y El Conocimiento*, 0(3), 163–173.
[https://doi.org/10.26820/recimundo/4.\(3\).julio.2020.163-173](https://doi.org/10.26820/recimundo/4.(3).julio.2020.163-173)
- J., Gardey, A., P. P. (2008). Definición de. 5–9. <https://definicion.de/interdisciplinariedad/>
- Mamlouk, M., & Zaniewski, J. (2018). *Materials for civil and construction engineers* (4th ed.). Pearson educación limited.
- Moreno, J. D. (n.d.-a). *concreto.com*. 1–12.
- Moreno, J. D. (n.d.-b). *concreto.com*. 1–13.
- Muñoz. K (2016). *Metodología Para la Evaluación del Potencial de Producción de Cementos Tipo LC3 en el Contexto Colombia. Aproximación Teórica.*
- Peñaranda & Fontalvo (2020). *Evaluación de las Propiedades de Cemento Obtenido a Partir de Mezclas Clinker/Yeso proporcionado por CEMEX con Ceniza Volátil Calcárea Producida en la Planta Termotasajero Dos.*
- Puzolanas, T. De, Cocida, A., & Delhi, N. (n.d.). *Puzolanas*. 1–14.
- Química. es (n.d.). *Alúmina*. 2–3.
- Romero, A. (2020). *Determinación del Índice de Actividad Puzolánica de Materiales Cementantes Suplementarios Disponibles en el Mercado Colombiano.*
- Rotativa, V. (n.d.). *Horno de Calcinación*. 1–3.
- Steven H. Kosmatka, B. K. W. C. P. J. T. (2004). *Diseño y control de mezclas de concreto*. Portland Cement Association, Primera Ed, 26648.
- Talero Morales, R., Aramburo Varela, C. H., Nieto-Márquez, C. P., & Pinho, L. F. (2020). *Las arcillas activadas térmicamente y su potencial en la industria del cemento. CONAMA 2020 Congreso Nacional de Medio Ambiente*, 1–15.

Típo, C., & Temprana, A. R. Cemento Hidráulico.

Tíroni, A. (2013). Materiales Cementicios de Baja Energía. Activación térmica de arcillas, relación entre estructura y actividad puzolánica.. 165.

Yanguatin, H., Tobón, J., & Ramírez, J. (2017). Pozzolanic Reactivity of Kaolin Clays, a Review. Revista Ingenieria de Construcción, 32 (2), 13-24.

ANEXOS

Anexo 1. Datos resistencia a la compresión de las mezclas de arcilla calcinada + blanco.

Mpa								
MUESTRA	Blanco	NP-4294	PI-1333	NP-4229	NP-4156	PI-1121	PI-1374	NTC-220
R1D	21,11	9,90	10,98	7,05	8,77	12,58	8,30	21,11
R3D	31,80	18,70	19,15	14,48	15,72	20,39	17,39	31,80
R7D	37,13	25,23	27,48	17,22	22,45	27,45	24,35	37,13
R28D	47,20	34,77	37,00	26,57	31,57	37,00	36,64	47,20