

# **ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

## **Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra**

Caracterización mecánica de un hormigón sostenible con sustitución parcial de cemento por arcillas calcinadas y reforzados con fibras naturales Amazónicas.

### **PROYECTO DE GRADUACIÓN**

Previo la obtención del Título de:

**Maestría en Ing. Civil con mención en Construcción y  
Saneamiento**

Presentado por:

Michelle Caroline Bonilla Coca

Walter Barnye Naranjo Canales

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2025

## DEDICATORIA

Este proyecto se lo dedico a mi familia, especialmente a mi madre por apoyarme durante este proceso, a mis amigos quienes siempre me brindaron su apoyo en los momentos de incertidumbre. A la pequeña estudiante de hace un año que dentro de sus pensamientos creía que no lo lograría, solo queda decir este logro es de nosotras.

Michelle Bonilla C.

## **AGRADECIMIENTOS**

Doy gracias a Dios por siempre darme la oportunidad de llevar a término este proceso aún en los momentos difíciles. Al personal de la Universidad Tecnológica Indoamérica especialmente a mis compañeros del Centro Tecnológico de Innovación y Emprendimiento “CTT” quienes me permitieron usar sus instalaciones para poder culminar con este proyecto, este proceso no hubiera sido posible sin su apoyo. Este logro es para todos aquellos que creyeron en nosotros.

Michelle Bonilla C.

## DEDICATORIA

Dedico este logro a Dios, por ser mi guía en los momentos de duda y mi fuerza en cada paso.

A mis padres y hermanos, por su amor inquebrantable, por enseñarme que el esfuerzo y la fe abren caminos donde antes no los había.

Gracias por creer en mí, por alentar mis sueños y acompañarme con amor en cada paso de este camino.

A mi abuelo Víctor Naranjo Cedeño que siempre desde donde esté el me acompaña y me protege, y a mi abuela Mariana Mosquera Valverde quien es inspiración de superación para su nieto. Este logro no es solo mío, es de todos nosotros.

Walter Naranjo C.

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios, por iluminar mi mente y fortalecer mi espíritu durante todo este proceso.

A mi familia, por ser el ancla y el impulso, por sostener mis sueños con paciencia, comprensión y ternura.

A quienes, con generosidad, compartieron su tiempo, conocimiento o palabra de ánimo, les extiendo mi más sincera gratitud.

Cada gesto, cada enseñanza y cada aliento se reflejan en este resultado.

Walter Naranjo C.

## DECLARACIÓN EXPRESA

Nosotros Michelle Caroline Bonilla Coca y Walter Barnye Naranjo Canales acordamos y reconocemos que: La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá a los autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor de los autores. El o los estudiantes deberán procurar en cualquier caso de cesión de sus derechos patrimoniales incluir una cláusula en la cesión que proteja la vigencia de la licencia aquí concedida a la ESPOL.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, secreto empresarial, derechos patrimoniales de autor sobre software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique los autores que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 19 de noviembre del 2025.

---

Michelle Caroline Bonilla C.

---

Walter Barnye Naranjo C.

## **EVALUADORES**

---

**Ing. Fernanda Estefanía Mejía**

**Peralta**

Profesor de Materia

---

**Ing. Pablo Daniel Mazón Ortiz**

Tutor de proyecto

## RESUMEN

La investigación realizada en este documento corresponde al proyecto de grado de la Maestría en Ingeniería Civil con mención en Saneamiento y Construcción de la Escuela Superior Politécnica del Litoral, al ser el hormigón el material más utilizado en la construcción moderna y por la huella de carbono que genera su producción, demanda la investigación de alternativas con menor impacto, con base a esta necesidad se plantea caracterizar el comportamiento mecánico de hormigón sostenible con reemplazo de un porcentaje de cemento por arcillas calcinadas reforzado con fibras naturales de la Amazonía. Y así sustentar la probable reducción potencial de emisiones de CO<sub>2</sub> y el aprovechamiento de los recursos naturales locales de nuestro país.

Se obtuvieron y caracterizaron arcillas locales ubicadas en la ciudad del Puyo en Pastaza por el ensayo de Difracción de Rayos X (DRX) antes y posterior a la calcinación de la muestra con mejor caracterización presentada. Se realizó el diseño de la mezcla de hormigón con base a parámetros de ACI con una resistencia esperada de 21 MPa. Evaluamos las propiedades de la mezcla tanto en estado fresco, trabajabilidad y fraguado, y en estado endurecido posterior a la fundición de las probetas con ensayos a compresión ASTM C39 (cilindros) y a flexión ASTM C293 (vigas).

Los resultados obtenidos por las diferentes dosificaciones de hormigón planteadas indicaron que las mezclas con arcilla calcinada a los 28 días llegaron a una resistencia a la compresión del 80% en comparación con respecto al hormigón convencional, es importante recalcar la resistencia tardía que pueden presentar producto de la sustitución de cemento. Respecto a los resultados a flexión las mezclas con arcilla presentaron mayor índice relativo al relacionarlas con la resistencia a la compresión obtenida al tiempo de análisis, llegando hasta un 59% de relación.

Se confirma que el diseño de hormigones con sustitución parcial con arcillas calcinadas con una relación porcentual óptima y moderada de reemplazo constituye una vía prometedora hacia hormigones sostenibles con menor producción de huella de carbono y comportamiento mecánico competitivo.

**Palabras Claves:** Hormigón sostenible, arcillas calcinadas, fibras naturales, resistencia tardía, índice relativo.

## **ABSTRACT**

*The research presented herein constitutes the master's degree Project in Civil Engineering, with a specialization in Sanitation and Construction, at the Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL). Concrete remains the most widely utilized material in contemporary construction; however, its production is associated with a considerable carbon footprint. This circumstance necessitates the exploration of alternative materials with reduced environmental impact. Accordingly, this study aims to characterize the mechanical behavior of a sustainable concrete wherein cement is partially replaced by calcined clays and reinforced with natural fibers sourced from the Amazon, thereby supporting the anticipated reduction in CO<sub>2</sub> emissions and promoting the sustainable use of national resources.*

*The local clay used in this investigation was procured from Puyo city, in Pastaza province. These clays were analyzed by X-ray Diffraction (XRD) both before and after calcination, and the material exhibiting superior characteristics was selected for further study. The concrete mixture was designed in accordance with American Concrete Institute (ACI) standards, targeting an expected compressive strength of 21 MPa. The mixture's fresh properties—specifically workability and setting time—were assessed, and, upon hardening, specimens were subjected to compressive strength testing in accordance with ASTM C39 (cylinders) and flexural strength testing per ASTM C293 (beams).*

*Results from several mix proportions indicated that mixtures with calcined clay reached 80% of the compressive strength of conventional concrete at 28 days, suggesting the potential for later strength gain. Regarding the flexural strength results, the sample with a calcined clay mixture showed a higher relative index compared to the compressive strength at the same age, reaching up to 59%.*

*It is confirmed that the design of concrete with a fractional substitution of cement by calcined clay, at an optimal and moderate substitution level, constitutes a viable approach toward the production of sustainable concrete with a lower carbon footprint and efficient mechanical performance.*

**Keywords:** *Sustainable concrete, calcined clays, natural fibers, long-term mechanical strength, relative performance index.*

# ÍNDICE GENERAL

EVALUADORES .....	II
RESUMEN .....	I
ABSTRACT .....	II
ABREVIATURAS.....	VII
SIMBOLOGÍA.....	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS .....	IX
ÍNDICE DE TABLAS.....	XII
ÍNDICE DE ANEXOS .....	XV
CAPÍTULO 1 .....	1
Introducción.....	1
1.1    Antecedentes.....	2
1.2    Estudios previos.....	4
1.3    Definición del problema .....	5
1.4    Justificación .....	6
1.5    Objetivos.....	7
1.5.1    Objetivo General.....	7
1.5.2    Objetivos Especificos .....	7
CAPÍTULO 2 .....	9
Desarrollo del proyecto.....	9
2.1    Marco conceptual.....	9
2.1.1    Hormigón convencional, una comparativa con el hormigón reforzado con fibra y sustitutos parciales de cemento. ....	9
2.1.1.1    Contaminación ambiental en la producción de cemento .....	9
2.1.1.2    Características mecánicas: resistencia a la compresión y su fragilidad en flexión.....	10

2.1.2	Materiales cementantes suplementarios .....	11
2.1.2.1	Objetivo de usos .....	12
2.1.2.2	Clasificación de los Materiales cementantes suplementarios .....	12
2.1.3	Arcillas calcinadas como puzolana .....	13
2.1.3.1	Temperaturas y tiempo de calcinación .....	13
2.1.4	Hormigón reforzado con fibras .....	14
2.1.4.1	Mecanismos de refuerzo en hormigones reforzados con fibras.....	15
2.1.4.2	Tipos de fibras usadas en hormigones reforzados con fibras .....	16
2.1.4.3	Consideraciones en la aplicación de fibras.....	17
2.1.5	Fibra natural amazónica .....	17
2.1.5.1	Fibras naturales como opción sostenible.....	17
2.1.5.2	Fibra Aphandra Natalia (Palmae) .....	18
2.1.6	Normativa y método de ensayo .....	21
2.1.6.1	Ensayo de Difracción de Rayos X en Materiales .....	21
2.1.6.2	Ensayo de resistencia a la compresión .....	22
2.1.6.3	Ensayo de Resistencia a la Flexión del Hormigón .....	23
2.2	Marco metodológico.....	24
2.2.1	Trabajo de campo.....	25
2.2.2	Trabajo de laboratorio o gabinete .....	27
2.2.2.1	Caracterización de materiales .....	27
2.2.2.2	Diseño de mezclas .....	34
2.2.2.3	Elaboración y curado de probetas .....	35
2.2.2.4	Ensayos realizados.....	35
2.2.3	Tabulación de datos .....	36
2.2.4	Difracción de Rayos X .....	36
CAPÍTULO 3 .....		39

RESULTADOS .....	39
3.1.    M. PUYO 1.....	39
3.2.    M. PUYO 2.....	40
3.3.    M. VERACRUZ .....	42
3.4.    M. PUYO 1 CALCINADA .....	43
3.5.    Contenido de humedad:.....	45
3.6.    Densidad del cemento .....	46
3.7.    Densidad el árido fino .....	48
3.8.    Densidad del árido grueso .....	48
3.9.    Caracterización del cemento HOLCIM FUERTE .....	49
3.10.   Diseño de hormigón.....	49
3.10.1.   Diseño de hormigón para las mezclas propuestas .....	50
3.11.   Trabajabilidad del hormigón en estado fresco .....	52
3.12.   Tiempo de fraguado.....	53
3.13.   Comportamiento mecánico de hormigón con reemplazo parcial de cemento por arcilla calcinada y fibra vegetal de la Amazonía.....	57
3.13.1.   Ensayo a compresión con reemplazo parcial de Cemento por Arcilla Calcinada y fibra vegetal de la Amazonía.....	57
3.13.2.   Resultados de Resistencia a la compresión .....	58
3.13.3.   Ensayo a flexión con reemplazo parcial de Cemento por Arcilla Calcinada y fibra vegetal de la Amazonía.....	71
3.13.3.1.   Parámetros de ensayo a flexión en 3 puntos.....	71
3.13.3.2.   Cálculo del módulo de rotura .....	72
3.13.3.3.   Resultados de ensayo a Flexión.....	73
CAPÍTULO 4 .....	76
conclusiones y recomendaciones del proyecto .....	76
4.1.    Conclusiones .....	76

4.2. Recomendaciones .....	79
Bibliografía .....	80
Anexos .....	84

## **ABREVIATURAS**

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
ASTM	American Society for Testing and Materials
NEC	Norma Ecuatoriana de la Construcción
ISO	Organización Internacional de Normalización
IEC	Comisión Electrotécnica Internacional
NTE	Norma Técnica Ecuatoriana
INEN	Instituto Ecuatoriano de Normalización
ACI	American Concrete Institute
EHE	Instrucción Española del Hormigón Estructural

## SIMBOLOGÍA

ml	Mililitros
Kg	Kilogramo
G	Gramo
MPa	Mega Pascales
GJ	Gigajulio
kWh	Kilovatio-hora
kN	Kilo Newton
F'c	Resistencia a la compresión del concreto
°C	Grados Centígrados
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
m	Metro
cm	Centímetro
mm	Milímetro
µm	Micrómetro
min	Minutos
Ca	Calcio
OH	Grupo hidroxilo
Si	Silicio
O	Oxígeno
Al	Aluminio
Na	Sodio

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Ubicación por coordenadas de los puntos de extracción de la materia prima, provincia de Pastaza .....	25
Figura 2.2 Extracción de materia prima “arcilla natural”: (a) Terreno muestra-Puyo 1, (b) Ubicación muestra-Puyo 2, (c) Ubicación muestra-Veracruz 3 .....	26
Figura 2.3 Almacenamiento de muestras en sacos herméticos .....	27
Figura 2.4 Secado de muestras: (a) contenido de humedad de las muestras, (b) secado de la muestra-Puyo 1, (c) secado de la muestra-Puyo 2, (d) secado de la muestra-Veracruz 3 .....	28
Figura 2.5 Proceso de trituración de la muestra seca: (a) Obtención de partículas más pequeñas de las muestras seca, (b) Diferencia de tamaños en el proceso de trituración manual, (c) Trituración o desgaste de partículas de arcilla seca en la Máquina de los Ángeles.....	29
Figura 2.6 Calcinación de muestra de arcilla natural a 750 °C.....	29
Figura 2.7 Calcinación masiva de la arcilla natural: (a) Colocación de muestra natural, (b) Distribución uniforme de la muestra natural en el volumen total del horno, (c) Encendido de quemadores, (d) Control de temperatura, (e) Sellado del horno, presencia de alta .	30
Figura 2.8 Observación de la fibra de Aphandra Natalia bajo el lente del estereoscopio .....	31
Figura 2.9 Proceso de corte de las fibras naturales: (a) fibra Aphandra Natalia obtenida de la Amazonía, (b) Verificación de método de corte correcto, (c) Mejoramiento de corte con el uso de plástico film stretch, (d) corte de fibra a 50 mm de manera uniforme.....	32
Figura 2.10 Determinación de la densidad del árido fino: (a) Muestra saturada por 24 horas, (b) Secado de muestra constante, (c) Obtención de muestra superficialmente saturada, (d) Verificación de estado superficialmente saturado, (e) Control de temperatura para la probeta .....	33
Figura 2.11 Determinación de la densidad del árido grueso: (a) Muestra saturada durante 24 horas, (b) Verificación de temperatura para toma de datos, (c) Calibración de pesos sumergidos antes de introducir la muestra, (d) Introducción de muestra sumergida.....	33
Figura 2.12 Ensayo de tiempo de fraguado con el método de Vicat: (a) mezcla del reemplazo de arcilla con cemento, (b) adición de agua, (c) toma de medidas de	

penetración de aguja Vicat, (d) resultados obtenidos de las tres muestras, (e) identificación de penetración .....	34
Figura 2.13 Control de asentamiento de las dosificaciones en estado fresco .....	35
Figura 3.14 Gráfico porcentual de compuestos químicos de la muestra M. PUYO 1 ....	40
Figura 3.15 Patrón difractométrico M. PUYO 1 .....	40
Figura 3.16 Gráfico porcentual de compuestos químicos de la muestra M. PUYO 2 ....	41
Figura 3.17 Patrón difractométrico M. PUYO 2 .....	41
Figura 3.18 Gráfico porcentual de compuestos químicos de la muestra M. VERACRUZ .....	42
Figura 3.19 Patrón difractométrico M. VERACRUZ.....	43
Figura 3.20 Gráfico porcentual de compuestos químicos de la muestra M. PUYO 1 CALCINADA .....	44
Figura 3.21 Patrón difractométrico M. PUYO 1 CALCINADA.....	44
Figura 3.22 Densidad de la arcilla calcinada: (a) peso de la muestra inicial -Ensayo 1, (b) lectura inicial-Ensayo 1, (c) introducción de la muestra en el frasco de Le Chatelier, (d) agitación manual de la muestra, (e) lectura final-Ensayo 2, (f) inconsistencia en .....	47
Figura 3.23 Comparación de asentamientos obtenidos .....	53
Figura 3.24 Control de asentamiento de las dosificaciones en estado fresco .....	53
Figura 3.25 Comparativa de resultados obtenidos del ensayo Vicat.....	56
Figura 3.26 Ensayo de tiempo de fraguado con el método de Vicat: (a) mezcla del reemplazo de arcilla con cemento, (b) adición de agua, (c) toma de medidas de penetración de aguja Vicat, (d) resultados obtenidos de las tres muestras, (e) identificación de penetración .....	57
Figura 3.27 Ensayo de Compresión de Cilindros de hormigón: (a) control de perpendicularidad de la probeta, (b) control de planicidad de la probeta, (c) equipo usado para control de calidad, (d) probeta con fibra ensayada, (e) toma de medidas de diámetros, (f) resultados en la pantalla de la máquina, (g) estado de la probeta posterior al ensayo .....	59
Figura 3.28 Resumen comparativo de las resistencias a compresión obtenidas a los 7,14,28 días por dosificación .....	69
Figura 3.29 Porcentaje de aumento en comparación de las diferentes dosificaciones propuestas.....	70

Figura 3.30 Esquema de la aplicación de la carga para el módulo de rotura (Presas, Pastor, Sepúlveda, & Llorca, 1995).....	72
Figura 3.31 (a) Ensayo de viga con la aplicación de la carga en el centro, (b) Viga posterior al ensayo, grieta ubicada en el centro, (c) Vista transversal de la viga post aplicación de carga.....	73
Figura 3.32 Resumen comparativo de las resistencias a flexión obtenidas a los 28 días por dosificación.....	75
Figura 3.33 Relación porcentual entre la Resistencia a la Compresión y Flexión. ....	75

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Resultados del Contenido de humedad de las fibras de Aphandra Natalia; (Balcázar, 2020) .....	18
Tabla 2.2 Resultados del ensayo de Absorción de las fibras de Aphandra Natalia; (Balcázar, 2020) .....	19
Tabla 2.3 Comparativa de los resultados obtenidos de ensayos a tracción de diferente espesor de fibra de Aphandra Natalia; (Balcázar, 2020) .....	21
Tabla 2.4 Coordenadas de puntos de muestra.....	25
Tabla 3.5 Porcentaje de cada compuesto en la muestra M. PUYO 1.....	39
Tabla 3.6 Porcentaje de cada compuesto en la muestra M. PUYO 2.....	41
Tabla 3.7 Porcentaje de cada compuesto en la muestra M. VERACRUZ .....	42
Tabla 3.8 Porcentaje de cada compuesto en la muestra M. PUYO 1 CALCINADA .....	44
Tabla 3.9 Resultados del contenido de humedad NTE INEN 690- arcilla en estado natural .....	45
Tabla 3.10 Resultados del ensayo NTE INEN 156 – Densidad de la arcilla calcinada..	46
Tabla 3.11 Densidad de árido fino.....	48
Tabla 3.12 Densidad de árido grueso.....	48
Tabla 3.13 Caracterización de Cemento .....	49
Tabla 3.14 Tabla de dosificación para hormigón 21MPa.....	50
Tabla 3.15 Tabla de dosificación con reemplazo parcial de cemento Portland con arcilla calcinada .....	50
Tabla 3.16 Resultados del Ensayo NTE INEN 1578- Control de asentamiento o slump test para las dosificaciones planteadas .....	52
Tabla 3.17 Resultados del Ensayo NTE INEN 158- Tiempo de fraguado para la mezcla de control.....	53
Tabla 3.18 Resultados del Ensayo NTE INEN 158- Tiempo de fraguado para sustitución del 30% de cemento con arcilla calcinada.....	54
Tabla 3.19 Resultados del Ensayo NTE INEN 158- Tiempo de fraguado para sustitución del 40% de cemento con arcilla calcinada.....	55
Tabla 3.20 Cantidad de probetas – Ensayo de Compresión .....	57

Tabla 3.21 Informe de acompañamiento en la toma de datos del ensayo NTE INEN 1573 a los 7 días– Resistencia a la Compresión de cilindros de hormigón “Primeras dosificaciones” .....	59
Tabla 3.22 Informe de acompañamiento en la toma de datos del ensayo NTE INEN 1573 a los 7 días – Resistencia a la Compresión de cilindros de hormigón “Segundas dosificaciones” .....	60
Tabla 3.23 Informe de acompañamiento en la toma de datos del ensayo NTE INEN 1573 a los 14 días– Resistencia a la Compresión de cilindros de hormigón “Primeras dosificaciones” .....	61
Tabla 3.24 Informe de acompañamiento en la toma de datos del ensayo NTE INEN 1573 a los 14 días – Resistencia a la Compresión de cilindros de hormigón “Segundas dosificaciones” .....	62
Tabla 3.25 Informe de acompañamiento en la toma de datos del ensayo NTE INEN 1573 a los 28 días– Resistencia a la Compresión de cilindros de hormigón “Primeras dosificaciones” .....	63
Tabla 3.26 Informe de acompañamiento en la toma de datos del ensayo NTE INEN 1573 a los 28 días – Resistencia a la Compresión de cilindros de hormigón “Segundas dosificaciones” .....	64
Tabla 3.27 Resultados del ensayo NTE INEN 1573 - Resistencia a la compresión a los 7 días (1eras dosificaciones).....	65
Tabla 3.28 Resultados del ensayo NTE INEN 1573 - Resistencia a la compresión a los 7 días (2das dosificaciones) .....	65
Tabla 3.29 Resultados del ensayo NTE INEN 1573 - Resistencia a la compresión a los 14 días (1eras dosificaciones).....	66
Tabla 3.30 Resultados del ensayo NTE INEN 1573 - Resistencia a la compresión a los 14 días (2das dosificaciones) .....	67
Tabla 3.31 Resultados del ensayo NTE INEN 1573 - Resistencia a la compresión a los 28 días (1eras dosificaciones).....	67
Tabla 3.32 Resultados del ensayo NTE INEN 1573 - Resistencia a la compresión a los 28 días (2das dosificaciones) .....	68
Tabla 3.33 Resistencia a la compresión de las dosificaciones propuestas a los 7, 14, 28 días.....	68

Tabla 3.34 Obtención del porcentaje de aumento de resistencia entre los 14 y 27 días de edad del hormigón .....	70
Tabla 3.35 Cantidad de probetas – Ensayo de Flexión .....	71
Tabla 3.36 Resistencia a la Flexión de las dosificaciones propuestas a los 28 días .....	74
Tabla 3.37 Tabla de relación porcentual entre Compresión y Flexión .....	75

## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1 Resultados de Ensayos de Densidad de las fibras de de Aphandra Natalia; (Balcázar, 2020) .....	84
Anexo 2 Resultados de Ensayos de Tracción de las fibras de de Aphandra Natalia; (Balcázar, 2020) .....	84
Anexo 3 Resultados parciales del ensayo de Difracción de Rayos x de las muestras de arcillas en estado natural.....	86
Anexo 4 Moldeado y curado de probetas cilíndricas- Previo a la realización del ensayo a compresión de cilindros de hormigón .....	87
Anexo 5 Moldeado de probetas de vigas- Previo a la realización del ensayo a flexión.	88
Anexo 6 Resultados de ensayo a Flexión en el laboratorio .....	90

## **CAPÍTULO 1**

### **INTRODUCCIÓN**

La búsqueda de alternativas sostenibles en el sector de la construcción es el trabajo constante que realiza la sociedad para reducir la contaminación en nuestro medio. Este sector de producción se presenta a la sociedad como uno de los mayores emisores de CO<sub>2</sub> a nivel mundial, el origen se ocasiona principalmente por el elevado consumo de Clinker en la producción de cemento (González Esteban, 2021). “El desarrollo de alternativas de hormigones sostenibles mediante la incorporación de materiales cementicios suplementarios ha cobrado relevancia en las últimas décadas” (Córdoba, 2017). Entre las investigaciones desarrolladas y evaluadas destaca la arcilla calcinada por su bajo costo, capacidad puzolánica y bajo costo de adquisición, lo que permite desarrollar y analizar una sustitución parcial al cemento Portland, para llegar a reducir la huella ambiental del material sin comprometer sus propiedades mecánicas (Cepeda Torres, 2023).

Desarrollar la tecnología de los cementos con arcilla calcinada ha demostrado resultados favorables con mejoras en comportamiento mecánico, durabilidad y reforzamiento en la microestructura de los compuestos cementicios (Sui, 2023).

La inclusión de fibras naturales de procedencia de la Amazonía aporta una estrategia innovadora con el aprovechamiento de los recursos renovables de amplia disponibilidad. El comportamiento de las fibras como refuerzo a la estructura integral del hormigón aporta con tenacidad, ductilidad y control de fisuras; pero sobre todo lo que se busca con el uso de este recurso es la menor generación de impacto ambiental, alineándonos con los principios de la economía circular y la sostenibilidad (Batista, 2022).

Este trabajo busca que con la combinación de arcillas calcinadas como sustituto parcial de cemento Portland y fibras naturales Amazónicas como refuerzo una opción de solución para la producción de hormigones sostenibles que comprendan satisfacer tanto al impacto medio ambiental con una reducción considerable de la huella de carbono como a los estándares mínimos de calidad para las necesidades locales de consumo.

## **1.1 Antecedentes**

La industria de la construcción representa una de las fuentes más importante de contaminación ambiental debido a la producción de cemento portland considerado el material aglomerante principal en construcción puesto que su proceso de fabricación indica alta contaminación y uso de energía, investigaciones indican que la fabricación de una tonelada del componente principal del cemento, Clinker, requiere entre 3.1-3.8 GJ de energía calorífica (Jaskulski, Józwiak-Niedźwiedzka, & Yakymchko, 2020). Las emisiones de CO<sub>2</sub> que esta producción de cemento genera proviene principalmente de dos procesos fundamentales en su obtención: La des carbonatación de la piedra caliza (materia prima) y la combustión de estos fósiles la cual alcanza a temperaturas superiores a 1400 °C mismas que pueden añadir alrededor de un 60% adicional de emisiones de CO<sub>2</sub> al proceso (Andrew, 2018). El problema de contaminación ambiental se ha considerado como prioridad en esta industria puesto que la tendencia de crecimiento del sector de la construcción ha

incrementado en los últimos años cuya producción global ha llegado a casi cuadruplicarse desde el año de 1990 (Mousavi, 2021) llevando así, la contaminación ambiental no solo durante su proceso de producción sino también en las actividades relacionadas a la extracción y procesamiento de materias primas para su posterior obtención.

Debido a estos antecedentes presentados dentro de la industria de la construcción es que en los últimos años se busca una nueva estrategia para una mitigación más efectiva con gran campo de investigación desarrollada, la cual se enfoca en la reducción del uso de Clinker, mediante el aprovechamiento de residuos y/o materiales cementantes suplementarios conocidos como SCM por sus siglas en inglés (Reddy, 2021). Tradicionalmente el rol que cumple el Clinker ha sido asumido por subproductos obtenidos de diferentes industrias, sin embargo, la obtención y aprovechamiento de estos subproductos es geográficamente irregular y variable lo que genera una barrera en la obtención de estos suministros para su adopción universal (Cao, 2021). Las limitaciones presentadas anteriormente han impulsado a la búsqueda e investigación de diferentes alternativas proponiendo y ubicando a las arcillas calcinadas como los SCM más prometedores para el futuro (Cao, 2021) pese a que es considerado uno de los recursos con mejor accesibilidad su obtención natural en depósitos puros es geológicamente limitada (Jaskulski, Józwiak-Niedźwiedzka, & Yakymchko, 2020)

El estado del arte actual se ha desplazado hacia el enorme potencial que presentan las arcillas naturales de menor pureza en sus componentes químicos (mezclas de caolinita, illita y otros materiales arcillosos) mismos que pueden lograr a desarrollar una actividad puzolánica significativa tras un proceso de calcinación mediante una activación térmica controlada dentro de un rango de 700-800 °C (Zunino, 2020) .La viabilidad de esta aplicación mencionada ha sido demostrada de manera concluyente con el desarrollo de una alternativa mediante el cemento con arcilla calcinada y adición de caliza, denominado LC3, siendo una opción que da la posibilidad de reducir el contenido de Clinker utilizado en la producción de cemento hasta un 50% sin comprometer en las características mecánicas o su desempeño (Reddy, 2021).

A su vez la fragilidad que demuestra un hormigón ha dado paso a una segunda línea de investigación centrada en el aprovechamiento de fibras sintéticas y metálicas. Dentro de un contexto amazónico ecuatoriano, fibras naturales de origen nativo como la Aphandra Natalia (fibra de chili) han demostrado un potencial uso para mejorar las características mecánicas como la tenacidad y resistencia a la flexión (Ridier, 2024).

A pesar de los avances, se ha evidenciado de manera independiente en ambas áreas una brecha en el nicho de investigación con respecto a la implementación de ambas estrategias. La utilización de ambas alternativas, el uso de arcillas calcinadas de origen local como un sustituto parcial del cemento y el uso de fibras naturales amazónicas en una mezcla de hormigón no ha sido lo suficientemente investigada ni explorada continuamente. Este proyecto busca aprovechar esta brecha para proponer una alternativa eficaz para reducir la huella de carbono del cemento y empleando fibras naturales para mejorar sus características mecánicas en cuanto a fragilidad; al realizarlo se aborda una necesidad global de carácter urgente con soluciones locales con enfoque innovador que promueven la economía circular y el uso de recursos subutilizados en la Amazonia ecuatoriana.

## **1.2 Estudios previos**

El desarrollo del proyecto tiene como sustento principal en información preliminar obtenida mediante una revisión del estado del arte actual que abarque el estudio de fibras naturales y arcillas calcinadas, así como también el conocimiento del contexto local quienes en un conjunto justifican y fundamentan un alcance de la propuesta. El estado de arte analizado de carácter científico reporta datos importantes sobre el principal activo del cemento, Clinker como problema ambiental a mitigar, así como también el aprovechamiento de arcillas calcinadas obtenidas de un estado natural de la misma quienes son sometidas a altas temperaturas; sin embargo, este proceso consta de temperaturas menores a la utilizada en la producción del cemento. La base teórica se complementa con el reconocimiento in situ que confirma la disponibilidad de la materia prima en provincias de la Amazonía ecuatoriana. La integración de estos materiales no solo valida la viabilidad técnica y la importancia del proyecto,

sino que a su vez permite diseñar una metodología de carácter experimental que tiene su fundamentación en caracterizar un material compuesto que aprovecha recursos subutilizados en la amazonia ecuatoriana.

### **1.3 Definición del problema**

Las primeras fases en la producción del cemento hasta su etapa final contribuyen en mayor porcentaje a la contaminación del aire o ambiente, se ha revelado que aproximadamente el 0.8 toneladas de CO<sub>2</sub> son liberadas en la producción de una tonelada de cemento hacia la atmósfera (He, 2020); se indica que esta producción genera alrededor de una tonelada de emisiones de gases de efecto invernadero de CO<sub>2</sub> y que alrededor de 2%-8% del consumo mundial de energía se debe al proceso de la fabricación de cemento (Mohamad, 2022).

En la industria cementera alrededor del 29% del proceso de contaminación es mediante el consumo de energía para la obtención del cemento, de esta manera la industria cementera se caracteriza principalmente por un uso intensivo de energía en sus etapas de producción y calcinación de materias prima liberando cantidades significativas de gases de efecto invernadero siendo un consumo aproximado de 4-5 GJ/tonelada (Madloul, 2011). Adicional a la problemática indicada, el hormigón al ser un material frágil este presenta problemas internos y ocasionalmente superficiales siendo su resistencia a la flexión e impacto baja lo que denota una inseguridad en las estructuras de hormigón; actualmente el método más utilizado es la adición de fibras a hormigón para mejorar estas características mecánicas controlando o retardando así la iniciación, propagación de micro fisuras o macro fisuras (He, 2020).

Estas cifras nos demuestran la importancia de la toma de medidas necesarias para reducir el uso de energía junto con la prevención de la contaminación ambiental por la liberación de CO<sub>2</sub> a la atmósfera. De esta manera, la propuesta busca la elección de una alternativa para un menor consumo energético en la producción de cemento portland. Un aglutinante en lugar del cemento que presente sus características químicas óptimas para su utilización y la aplicación de fibras rentables al hormigón

no solo puede llegar a reducir el consumo de energía y la contaminación ambiental, a su vez mejora el rendimiento del hormigón brindando beneficios ambientales, estructurales y económicos.

En la Amazonía del Ecuador, existe gran cantidad de fibras naturales que no han sido investigadas/aprovechadas dentro de la industria de la construcción, sino más bien han sido enfocadas a su desecho en la selva para su posterior descomposición natural, así como también la presencia de arcillas es indiscutible dentro de la región amazónica mismas que indican en estudios posteriores como el llevado a cabo por (Jaskulski, Józwiak-Niedźwiedzka, & Yakymchko, 2020) indican en su composición química elementos que pueden ser aprovechados como un aglutinante como reemplazo al cemento portland tradicional.

#### **1.4 Justificación**

El hormigón es el material más utilizado en la construcción moderna, pero también uno de los que mayor impacto ambiental genera en la sociedad. Se estima que la producción de cemento Portland, principal componente del hormigón, es responsable de entre el 4 % y el 8 % de las emisiones globales de dióxido de carbono (Mohamad, 2022). Este escenario plantea la urgencia de implementar soluciones tecnológicas que reduzcan la dependencia del Clinker y promuevan materiales más sostenibles. En este sentido, la sustitución parcial del cemento por arcillas calcinadas ha demostrado ser una alternativa eficaz, capaz de disminuir hasta en un 40 % las emisiones de CO<sub>2</sub>, manteniendo propiedades mecánicas competitivas y mejorando aspectos de durabilidad (Ventures, 2025).

Adicionalmente, la región amazónica cuenta con una gran diversidad de fibras vegetales, las cuales, presentan un alto potencial como refuerzo en matrices cementicias. Estas fibras, al ser renovables y biodegradables, aportan beneficios en la tenacidad, control de fisuración y comportamiento posterior a la falla por compresión del hormigón, al mismo tiempo que promueven el aprovechamiento de recursos locales (Avalon/Circular Concrete, s.f.). Resolver esta problemática es fundamental porque no solo contribuye a la reducción de la huella de carbono global,

sino que también fomenta el desarrollo regional sostenible y la generación de conocimiento aplicable en contextos con abundancia de recursos naturales. Permitiendo así cumplir con uno de los objetivos ODS como lo es el construir infraestructuras resilientes y promover la industrialización sostenible a través del fomento de la innovación.

Como resultado, la combinación de arcillas calcinadas y fibras amazónicas representa una vía estratégica hacia un hormigón sostenible, eficiente y socialmente responsable.

## **1.5 Objetivos**

### **1.5.1 Objetivo General**

Caracterizar el comportamiento mecánico de un hormigón sostenible mediante la sustitución parcial de cemento con arcillas calcinadas y el refuerzo con fibras naturales amazónicas, para determinar su viabilidad como material de construcción alternativo.

### **1.5.2 Objetivos Específicos**

- Analizar la composición química de las arcillas locales mediante difracción de rayos x “DRX” antes y después del proceso de calcinación para establecer su idoneidad y valor puzolánico como sustituto parcial del cemento.
- Diseñar y optimizar la mezcla de hormigón siguiendo las normas estadounidenses (ACI) para alcanzar una resistencia mínima de 21 MPa incorporando porcentaje de arcilla calcinada como reemplazo parcial del cemento, garantizando viabilidad técnica y estructural.
- Evaluar el comportamiento del hormigón analizando sus propiedades en estado fresco, trabajabilidad, tiempo de fraguado, como endurecido, resistencia a la compresión y flexión, para validar su desempeño bajo estándares internacionales.
- Determinar el efecto de las arcillas calcinadas en el hormigón, cuantificando mediante ensayos de laboratorio cómo influye la sustitución parcial de cemento por este material en las propiedades mecánicas, comparando sistemáticamente los resultados con los de un hormigón control sin adición de arcillas.

- Analizar el impacto de las fibras naturales amazónicas como refuerzo en el hormigón, evaluando experimentalmente su efecto en la ductilidad y tenacidad del material, mediante ensayos de flexión, con especial énfasis en la mejora de la resistencia post fisuración y la capacidad de absorción de energía

## CAPÍTULO 2

### DESARROLLO DEL PROYECTO

#### 2.1 Marco conceptual

##### 2.1.1 Hormigón convencional, una comparativa con el hormigón reforzado con fibra y sustitutos parciales de cemento.

###### 2.1.1.1 *Contaminación ambiental en la producción de cemento*

Los diferentes métodos de producción de cemento portland representan la principal causa de contaminación ambiental debido a su proceso de calcinación de la piedra caliza cuyo proceso genera altos niveles de emisiones de Dióxido de Carbono o CO<sub>2</sub> (Hosen, 2025).

Para entender mejor el impacto ambiental que esta producción genera, (Massoumi, 2025) proporciona información relevante en esta contaminación, indica que una tonelada de cemento libera entre 0.5 y 0.95 toneladas de CO<sub>2</sub> esto depende de la relación Clinker-cemento, la eficiencia del combustible y la mezcla de combustibles y uso de electricidad; aproximadamente el 60% de estas emisiones son relacionadas al proceso de

descomposición térmica de la piedra caliza a altas temperaturas el cual aporta aproximadamente 520 kg de CO<sub>2</sub> por tonelada de Clinker mientras que el 40 % de emisiones son relacionadas a la quema de combustibles a sus altas temperaturas y el consumo de electricidad (100-120 kWh/tonelada de cemento).

La industria del cemento requiere de diferentes estrategias de reducción de emisiones para impulsar su producción “verde” y baja en carbono; de esta manera la estrategia implica desarrollar tipos de cemento con menor contenido de Clinker usando materiales cementantes suplementarios siendo los más comunes residuos de piedra caliza, cenizas volantes y escoria de alto horno sin embargo éstos residuos en cantidad son menores a la producción del cemento en todo el mundo por lo que las arcillas calcinadas especialmente las que contienen caolinita se considera una opción prometedora para su uso recomendando que su calcinación se genere en la planta de producción del cemento para evitar contaminación por transporte de materias (Christófolli, 2025).

#### ***2.1.1.2 Características mecánicas: resistencia a la compresión y su fragilidad en flexión***

La capacidad de disipación de energía que tiene el hormigón bajo diferentes cargas dinámicas tiene una influencia directa con el rendimiento estructura, esto brinda una línea de investigación que busca brindar la importancia necesaria a la ductilidad y la tenacidad como propiedades esenciales para la durabilidad de las estructuras de hormigón (Tolga, 2022).

El hormigón tradicional es conocido por presentar altos resultados en sus características mecánicas como lo son la resistencia a la compresión, se conoce que la resistencia a la flexión suele ser por lo general un aproximado al 8% inferior a la resistencia a compresión obtenida; asimismo su resistencia a la flexión se encuentra dentro del rango del 9% al 12% (Bediako, 2025).

El hormigón reforzado con fibra o conocido como “FRC” es ampliamente reconocido por su ductilidad mejorada, eficiencia energética y principalmente la sostenibilidad que este material de construcción representa, para mejorar su concepto de sostenibilidad las fibras naturales han abierto una nueva línea de investigación como alternativa sostenible

y rentable a comparación con las fibras sintéticas debido a su baja huella de carbono (Zaid, 2025). Estudios realizados en la producción de un hormigón sostenible con diferentes fibras naturales indican que su utilización aumenta la resistencia a tracción y flexión del hormigón, tal es el caso de (Yan, 2025) quienes al utilizar fibra de yute tratada con álcali produjeron alrededor del 4 al 7% más resistencia a la compresión. Para (Alani, 2025) la resistencia a la compresión y el rendimiento del hormigón a la flexión mejoraron con la adición de 1% de fibra de cáñamo y porcentajes de sustitución parcial del cemento con cenizas volantes, demostraron que estas fibras en la mezcla brindaron una resistencia a la compresión significativamente mayor y una mejor deformación antes del colapso, su resistencia a la flexión aumentó en un 40% en comparación al hormigón tradicional mejorando su tenacidad.

### **2.1.2 Materiales cementantes suplementarios**

Los materiales cementantes suplementarios conocido por sus siglas (SCM) son productos cuyo origen se da en primera instancia con la utilización de cenizas volcánicas en la época de los Romanos para la fabricación de monumentos. Estos productos se incorporan al hormigón con el fin de mejorar sus propiedades mecánicas, específicamente en su resistencia y durabilidad, esta mejora se produce al reaccionar químicamente con el hidróxido de calcio ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) durante el periodo de hidratación del cemento Portland. (Scrivener, 2018).

Su origen se da con la necesidad de reutilizar los recursos en la producción de hormigón, reducir el impacto ambiental lo cual está asociado con la fabricación de cemento Portland, debido al alto consumo energético y la generación de  $\text{CO}_2$ . En la construcción moderna el uso de la SCM se centró en el reciclaje de subproductos industriales, tales como cenizas volantes y escorias de alto horno, las cuales demostraron por su alta reactividad el ser efectivos como sustitutos del cemento Portland. (Raghav, 2021).

(Landa Gómez, 2022) en su investigación de los SCM como alternativa para la disminución de fenómenos en el hormigón indica que, en la actualidad, los SCM se utilizan para sustituir parcial o totalmente al cemento Portland en mezclas de hormigón, mejorando la microestructura y la durabilidad del material, al mismo tiempo que se reduce

la huella de carbono de la industria de la construcción. Su uso no solo se enfoca en la mejora de propiedades mecánicas y físicas, sino también en la sostenibilidad ambiental, ya que reduce el volumen de residuos industriales y promueve el reciclaje de materiales de desecho.

#### **2.1.2.1 Objetivo de usos**

Para la sociedad y la industria de la construcción se dan 3 objetivos fundamentales de uso de los SCM los cuales son:

- Reducción de costo y energía, al reducir la cantidad de cemento Portland para realizar la mezcla de hormigón, conlleva al disminuir el costo de producción y consumo energético que se da en la fabricación de cemento.
- Mejor características físicas del hormigón, la intervención de SMC con base a estudios mejora la microestructura del hormigón, aumentando su resistencia a la corrosión, penetración de cloruros y la propagación de sulfatos
- Genera sostenibilidad ambiental, la reutilización de subproductos de la industria como cenizas volantes, escoria y lo que tratamos de implementar con la investigación arcillas calcinadas, minimiza el consumo de recursos no renovables reduciendo el impacto ambiental.

#### **2.1.2.2 Clasificación de los Materiales cementantes suplementarios**

- Materiales cementantes suplementarios Puzolánicos

Los materiales puzolánicos son aquellos que no poseen propiedades cementantes por sí mismos, pero que, al reaccionar con el hidróxido de calcio en presencia de humedad, forman compuestos adicionales que mejoran la resistencia y la durabilidad del hormigón. Esta reacción se conoce como reacción puzolánica, y resulta en la formación de un gel C-S-H adicional, el cual contribuye a la mejora de la microestructura del hormigón. Los materiales puzolánicos suelen ser residuos industriales o naturales con altas concentraciones de sílice ( $\text{SiO}_2$ ) y de alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) (Scrivener, 2018).

- **Materiales cementantes suplementarios Hidráulicos**

Los materiales hidráulicos son aquellos que, por sí mismos, tienen propiedades cementantes debido a su capacidad de reaccionar con el agua para formar compuestos que endurecen. A diferencia de los SCM pozo-lánicos, los materiales hidráulicos no dependen de la presencia de hidróxido de calcio para reaccionar, sino que pueden formar compuestos cementantes por sí solos. Los más comunes de estos materiales son las escorias de alto horno (GGBS) y la cal hidráulica (Raghav, 2021).

La calcinación de la arcilla forma el metacaolín, este un material hidráulico que, al igual que otros SCMs, mejora las propiedades mecánicas y la durabilidad del hormigón, especialmente al reducir la permeabilidad y mejorar la resistencia química a los sulfatos.

### **2.1.3 Arcillas calcinadas como puzolana**

Para la implementación de arcillas como material cementante se requiere que esta contenga altas cantidades de mineral de caolín; (Hosen, 2025) mencionan que se ha demostrado que un contenido de aproximadamente de 40% de caolinita es adecuada para fines de producción de cemento LC3 mismo que está compuesto por arcilla caolinita calcinada y piedra caliza, es decir, incorpora metacaolín. Durante el proceso de calcinación entre los 700°C a 800 °C la arcilla se convierte en material con metacaolín.

El contenido de caolinita es una característica fundamental en las arcillas naturales a emplearse en los hormigones sostenibles, pues éste compuesto es el que al ser sometido a altas temperaturas brinda las características necesarias para ser considerado un suplemento parcial del cemento. (Christófolli, 2025) menciona que el contenido de caolinita de la arcilla también es el responsable de la formación de metacaolín, componente que tiene una reacción con el hidróxido de calcio para dar silicatos de calcio aluminio hidratado lo que contribuye al rendimiento mecánico y durabilidad.

#### **2.1.3.1 Temperaturas y tiempo de calcinación**

La transformación de arcillas, especialmente su compuesto de caolinita, mediante calcinación térmica es esencial para activar su reactividad puzolánica. Este proceso implica la deshidratación estructural, dehidroxilación, que altera la estructura cristalina y

genera una fase amorfa altamente reactiva con hidróxido de calcio. Para lograr una conversión ideal, es decir, alta reactividad sin formación de fases inertes como la mullita es crucial controlar correctamente la temperatura y la duración del tratamiento térmico. Ángulos de temperatura reportados oscilan entre 550–850 °C, con el intervalo óptimo comúnmente citado en 650–750 °C.

Según (Badogiannis, 2005), el tratamiento a 650 °C durante 3 horas es suficiente para convertir caolinas de baja calidad en metacaolines altamente reactivos. En casos de caolinas con alto contenido de alunita, un mineral sulfato, puede ser necesario aumentar la temperatura hasta 850 °C para eliminar impurezas como el SO<sub>3</sub>.

#### **2.1.3.2 Densidad de la arcilla calcinada**

El valor de densidad está estrechamente relacionado con la estructura mineralógica y la porosidad generada durante el proceso de calcinación. La dehidroxilación de la caolinita y la formación de fases amorfas modifican la distribución interna de la materia sólida, lo que repercute directamente en la densidad aparente y real del material.

Generalmente, la densidad real de la arcilla calcinada se ubica en un rango de 2,4 a 2,6 g/cm<sup>3</sup>, aunque este valor puede variar en función de la pureza del caolín, la presencia de impurezas minerales y las condiciones de calcinación aplicadas. (Abizanda Buisán, 2023) expresa que, durante el tratamiento térmico, la pérdida de agua estructural y la generación de fases desordenadas inducen una reducción de la densidad en comparación con la arcilla sin tratar. Por otro lado, la densidad aparente suele presentar valores más bajos debido a la creación de micro y macroporos, los cuales favorecen la actividad puzolánica, pero pueden influir en la trabajabilidad de mezclas cementicias.

#### **2.1.4 Hormigón reforzado con fibras**

El hormigón reforzado con fibras (HRF) es una mezcla de hormigón en la que se incorporan fibras como aditivo para mejorar sus propiedades mecánicas y de durabilidad. Estas fibras pueden ser de diversos tipos de materiales, como acero, polímeros, vidrio o fibras naturales, y se distribuyen de manera aleatoria en la masa del hormigón, lo que permite que actúen de manera integral en todo el volumen de la mezcla. Los objetivos

principales de la implementación de HRF en la construcción es controlar la formación y propagación de fisuras, mejorar la ductilidad y aumentar la resistencia del material a la flexión, tracción y compresión (Scrivener, 2018).

Los sistemas de refuerzo tradicionales, que se componen de una malla o varilla de acero, el HRF utiliza estas fibras distribuidas de forma homogénea para actuar como un refuerzo adicional que ayuda a la resistencia del hormigón frente a tensiones y cargas cíclicas. Este tipo de hormigón se ha utilizado ampliamente en distintas aplicaciones de elementos constructivos como en pavimentos, losas, muros y estructuras que requieren de una mayor resistencia al impacto y a la abrasión, especialmente en condiciones extremas como en las que se presenta la fatiga del material. La adición de fibras en el hormigón influye en disminuir la cantidad de agua requerida en la mezcla, lo que mejora la trabajabilidad y la resistencia a largo plazo del hormigón. Además, este tipo de hormigón tiene la capacidad de no solo mejorar las propiedades mecánicas, sino también proporcionar mayor seguridad en el comportamiento de las estructuras al prevenir el colapso repentino por fallos frágiles (G. Cordeiro, 2016).

#### ***2.1.4.1 Mecanismos de refuerzo en hormigones reforzados con fibras***

El refuerzo de fibra en el hormigón actúa mediante varios mecanismos clave que contribuyen a la mejora de las propiedades de los materiales, especialmente en términos de resistencia al agrietamiento y al impacto. Uno de los mecanismos más importantes es el "efecto puenteo", donde las fibras actúan como puentes que atraviesan las fisuras y ayudan a redistribuir las tensiones. Este proceso impide la propagación de las fisuras y limita su tamaño, lo que ayuda a mantener la integridad estructural del hormigón, incluso cuando ha comenzado a fisurarse (Raghav, 2021).

Otro mecanismo relevante es el debonding y pull-out, que se refiere al deslizamiento o extracción de las fibras de la matriz de hormigón bajo tensiones. Aunque este proceso puede ser considerado un inconveniente en algunas aplicaciones, en otros casos ayuda a dispersar la energía y controla la propagación de fisuras. Las fibras con una mayor adherencia en la matriz ofrecen un rendimiento superior, ya que pueden transferir mejor las tensiones entre las fibras y el hormigón (Raghav, 2021).

El mecanismo de anclaje es crucial para la eficacia de las fibras en la matriz de hormigón. Las fibras con mayor longitud, rugosidad superficial y mayor adherencia en la mezcla de hormigón proporcionan una mejor transferencia de carga y aumentan la resistencia general del HRF. Esto se debe a que las fibras actúan de manera directa en el comportamiento estructural del hormigón, reforzando la cohesión entre las partículas y asegurando la integridad del material frente a cargas externas (Scrivener, 2018).

#### ***2.1.4.2 Tipos de fibras usadas en hormigones reforzados con fibras***

Existen varios tipos de fibras que se utilizan en el hormigón reforzado, cada una con características y aplicaciones específicas dependiendo de las propiedades requeridas para la estructura. Las fibras metálicas, como las de acero, son algunas de las más utilizadas debido a su alta resistencia a la tracción, durabilidad y capacidad para controlar la fisuración. Las fibras de acero mejoran la resistencia al impacto y a la abrasión del hormigón, y son especialmente efectivas en la prevención de grietas en aplicaciones de pavimentos y estructuras expuestas a vibraciones (G. Cordeiro, 2016).

Las fibras sintéticas, como las de polipropileno, polietileno y nylon, son ampliamente utilizadas debido a su ligereza, resistencia a la corrosión y costo relativamente bajo. Estas fibras se clasifican en microfibras, que controlan la fisuración por retracción plástica, y macrofibras, que se usan para sustituir parcialmente al refuerzo convencional en aplicaciones estructurales. Aunque las fibras sintéticas tienen una menor capacidad de resistencia que las metálicas, ofrecen una buena resistencia a la flexión y ayudan a reducir la permeabilidad del hormigón (Raghav, 2021).

Las fibras naturales son otra categoría importante de refuerzo en el HRF, y se derivan de fuentes orgánicas como el yute, el sisal, el cáñamo y la fibra de coco. A pesar de su menor resistencia en comparación con las fibras metálicas y sintéticas, las fibras naturales son biodegradables, lo que las convierte en una opción más ecológica y sostenible. Se utilizan principalmente en aplicaciones de hormigón ligero y en proyectos donde la sostenibilidad es un objetivo clave, aunque su uso en estructuras de alta carga es limitado debido a su menor resistencia a la tracción (Landa Gómez, 2022)

Las fibras inorgánicas, como las de vidrio, se caracterizan por su alta resistencia a la tracción y durabilidad. Estas fibras se utilizan principalmente en aplicaciones arquitectónicas y decorativas, y se emplean en hormigón de alto rendimiento que requiere propiedades mecánicas mejoradas, especialmente en entornos corrosivos (Scrivener, 2018)

#### **2.1.4.3 Consideraciones en la aplicación de fibras**

La aplicación efectiva del HRF depende de varios factores importantes, como la dosificación de las fibras, la relación de aspecto (longitud/diámetro) de las fibras, y la distribución de las fibras en la mezcla de hormigón. La dosificación típica de fibras en el hormigón varía entre el 0.1% y el 3% en volumen de la mezcla, dependiendo del tipo de fibra y la aplicación específica. La relación de aspecto de las fibras también es un factor crucial; las fibras con una mayor relación de longitud a diámetro son generalmente más efectivas en la mejora de las propiedades del hormigón (Scrivener, 2018).

Otro aspecto importante es la compatibilidad entre las fibras y la matriz del hormigón. Es fundamental que las fibras tengan una adherencia adecuada con la pasta de cemento para asegurar una distribución uniforme de las tensiones y una respuesta coherente frente a las cargas aplicadas (Raghav, 2021)

### **2.1.5 Fibra natural amazónica**

#### **2.1.5.1 Fibras naturales como opción sostenible**

Una de las técnicas más simples para disminuir el impacto ambiental consiste en la sustitución de fibras sintéticas y de acero, ambas ampliamente investigadas para mejorar las características mecánicas del hormigón, por un hormigón reforzado con fibras naturales de origen vegetal. Las fibras vegetales proceden de plantas que absorben CO<sub>2</sub> de forma natural convirtiéndose en una opción de sostenibilidad (Zaid, 2025)

Acorde (Zaid, 2025) investigaciones han demostrado que la producción de fibras naturales genera entre 1.5-2.5 kg de CO<sub>2</sub> por kilogramo de fibra mientras que las fibras sintéticas emiten entre 6-10 kg de CO<sub>2</sub> por kilogramo durante su obtención lo que indica

una reducción del 50 y hasta 75% en emisiones de carbono cuando fibras naturales son utilizadas en la producción de un hormigón sostenible.

**2.1.5.2 Fibra Aphandra Natalia (Palmae)**

Esta fibra es originaria de la Amazonía Occidental, generalmente es explotada para su comercialización en la fabricación de escobas. Acorde (Henrik, 1996) existe una producción de hojas de 5.5 por palma al año adicionalmente indica que se corta un promedio de 8.5 hojas por palma por cosecha la cual genera 3.4 kg de fibras mientras que el 6.9 hojas se dejan intactas. Su cosecha toma alrededor de 33 min y bajo condiciones óptimas solo un recolector puede cosechar y limpiar alrededor de 20 kg de fibras en 1 día.

- Características mecánicas

(Balcázar, 2020) en el desarrollo de su tesis doctoral realiza la caracterización de las fibras de Aphandra Natalia de Ecuador, de esta forma brinda la información de los resultados obtenidos en los ensayos de contenido de humedad, absorción, densidad y ensayos de tracción; estos parámetros son de vital importancia para la dosificación de la mezcla.

A continuación, las tabulaciones mostradas son resultado de su proceso de investigación:

- **Contenido de humedad:** (Balcázar, 2020) indica que el contenido de humedad de las fibras es muy similar al de otras fibras vegetales usadas en un hormigón sostenible mismas que son empleadas para formar una matriz compuesta en el hormigón. Véase la Tabla 2.1:

**Tabla 2.1 Resultados del Contenido de humedad de las fibras de Aphandra Natalia; (Balcázar, 2020)**

Muestras	Peso inicial de la fibra con la cápsula “wi” (g)	Peso final de la fibra con la cápsula “wf” (g)	Peso final de la fibra “w” (g)	Contenido de humedad (%)	Contenido de humedad promedio (%)	Desviación estándar (±)

1	49.2440	49.2407	1.1816	12.6912	12.6279	0.0636
2	92.5216	92.5176	1.2122	12.5639		
3	51.9169	51.9144	1.1832	12.6287		

- **Absorción:** (Balcázar, 2020), en la Tabla 2.2, muestra un valor promedio de 22.6%, este autor indica que según las revisiones de otras fibras vegetales este resultado es inferior al reportado en sus estudios.

**Tabla 2.2 Resultados del ensayo de Absorción de las fibras de Aphandra Natalia;  
(Balcázar, 2020)**

Muestras	Masa del solido en la humedad ambiente (g)	Masa del solido en punto de saturación (g)	Absorción de agua (%)	Absorción de agua promedio (%)	Desviación estándar (±)
1	0.00537	0.00645	20.11173	22.62	4.06
2	0.00509	0.00599	17.68173		
3	0.00792	0.00983	24.11616		
4	0.00514	0.00613	19.26070		
5	0.00421	0.00489	16.15202		
6	0.00454	0.00536	18.06167		
7	0.00809	0.00977	20.76638		
8	0.00610	0.00742	21.63934		
9	0.00877	0.01088	24.05929		
10	0.00781	0.00947	21.25480		
11	0.01098	0.01326	20.76503		
12	0.01512	0.01962	29.76190		
13	0.01148	0.01402	22.12544		
14	0.01040	0.01268	21.92308		
15	0.01090	0.01332	22.20183		
16	0.01428	0.01934	35.43417		
17	0.00958	0.01164	21.50313		
18	0.01504	0.01872	24.46809		
19	0.00911	0.01099	20.63666		
20	0.01049	0.01236	17.82650		
21	0.01268	0.01550	22.23975		
22	0.00861	0.01077	25.08711		
23	0.02136	0.02779	30.10300		

Muestras	Masa del solido en la humedad ambiente (g)	Masa del solido en punto de saturación (g)	Absorción de agua (%)	Absorción de agua promedio (%)	Desviación estándar (±)
24	0.01311	0.01599	21.96796		
25	0.02470	0.03075	24.49393		
26	0.01433	0.01783	24.42428		
27	0.01416	0.01678	18.50282		
28	0.02472	0.02977	20.42880		
29	0.01375	0.01740	26.54545		
30	0.02330	0.02913	25.02146		

- Densidad:** (Balcázar, 2020) muestra los resultados obtenidos en dos procesos realizados para este ensayo, el primero realiza la densidad de las fibras con un 12.63% de humedad (considerando una condición natural o al ambiente de la fibra) obteniendo una densidad de 0.94 g/ cm<sup>3</sup> reflejando un comportamiento similar a las fibras de polietileno (0.96 g/ cm<sup>3</sup>) y polipropileno (0.9 g/ cm<sup>3</sup>) mientras que las fibras naturales como sisal, coco o abacá muestran una densidad entre 0.76-0.89 g/cm<sup>3</sup>. El segundo análisis lo realiza con un 22.62% de humedad (consideración saturada en agua) obteniendo una densidad de 1.16, indica que al absorber agua esta se vuelve más pesada, pero sin embargo sigue siendo más ligera con relación a fibras sintéticas como las de vidrio y poliéster 2.50 y 1.40 respectivamente. Los resultados mostrados por (Balcázar, 2020) en este ensayo de densidad se los puede apreciar en el Anexo 1.
- Ensayos a tracción:** Este ensayo es realizado con la finalidad de evidenciar la resistencia que presentan las fibras para su uso en el hormigón. (Balcázar, 2020) indica que estos resultados dependen del grosor de la fibra, de esta manera se presenta la Tabla 2.3, la cual recoge la comparación de los resultados obtenidos en su estudio y en el anexo se evidencia los resultados de manera más detallada por grosor de fibra.

**Tabla 2.3 Comparativa de los resultados obtenidos de ensayos a tracción de diferente espesor de fibra de Aphandra Natalia; (Balcázar, 2020)**

Rango de grosor (mm)	N° de ensayos realizados	Resistencia a la tracción (MPa)	Módulo de Young (GPa)
0.1-0.2	10	563.30	23.17
0.2-0.3	10	266.69	15.49
0.3-0.4	10	209.38	8.32
0.4-0.5	10	157.87	6.41
0.5-0.6	10	112.42	8.37
0.6-0.7	10	106.66	3.70

## 2.1.6 Normativa y método de ensayo

Los ensayos realizados están bajo los estándares de la Norma Ecuatoriana de la Construcción.

### 2.1.6.1 Ensayo de Difracción de Rayos X en Materiales

La difracción de rayos X (DRX) es una técnica analítica que permite identificar y cuantificar las fases cristalinas presentes en materiales pulverizados, como portlandita, Clinker, puzolanas, minerales arcillosos o agregados. La interacción del haz de rayos X con la estructura cristalina genera un patrón de difracción característico, útil para estudios cualitativos y cuantitativos.

De este ensayo obtenemos resultados como la composición mineralógica del material a analizar, detectar contaminantes de la muestra y correlacionar propiedades mecánicas o durabilidad de la composición mineral.

#### 2.1.6.1.1 Procedimiento del ensayo

- Preparación de la muestra, la cantidad de muestra obtenida se tritura y muele el material hasta obtener una finura adecuada (típicamente  $< 45 \mu\text{m}$ ), asegurando homogeneidad.
- Cristalización en polvo, posterior a la pulverización de la muestra se coloca en un porta-muestras, alineando las partículas para minimizar efectos de textura.
- Adquisición del patrón de difracción, el difractómetro escanea ángulos  $2\theta$  definidos mientras registra la intensidad de los rayos X difractados

- Análisis de datos: Se comparan los picos obtenidos con bases de datos para identificar fases. Software como EVA o TOPAS facilita el análisis cuantitativo mediante refinamiento de Rietveld

#### 2.1.6.1.2 Fórmula por usar

- Ley de Bragg, para relacionar el ángulo en el que se detecta un pico con la distancia entre planos cristalinos.

$$n\lambda = 2d \sin\theta$$

#### Ecuación 1: Ley de Bragg

Donde:

$n$  = orden de difracción (usualmente 1)

$\lambda$  = longitud de onda del rayo X (Å)

$d$  = distancia interplanar del cristal (Å)

$\theta$  = ángulo de incidencia/difracción (°)

- Cuantificación Rietveld, con esto determinamos los pesos relativos de manera porcentual de cada fase.

$$I_{calc}(2\theta) = \sum_j S_j |F_j|^2 \Phi(2\theta - 2\theta_j) e^{-2M_j}$$

#### Ecuación 2: Cuantificación Rietveld

$I_{calc}$  = intensidad calculada

$S_j$  = escala de fase  $j$

$F_j$  = factor de estructura

$\Phi$  = función de perfil de pico

$e^{-2M_j}$  = factor de Debye–Waller (desorden térmico)

#### 2.1.6.2 Ensayo de resistencia a la compresión

El ensayo de resistencia a la compresión del hormigón es el método principal utilizado para evaluar la calidad del hormigón endurecido y su capacidad para soportar cargas axiales. La Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC), en la sección NEC-SE-HM

(Estructuras de Hormigón Armado), establece que esta prueba debe realizarse obligatoriamente en laboratorios acreditados bajo la NTE INEN-ISO/IEC 17025, garantizando precisión y confiabilidad en los resultados. Este ensayo permite comprobar si el hormigón cumple con la resistencia especificada ( $f'c$ ) en el diseño estructural.

#### 2.1.6.2.1 Procedimiento del ensayo

- Muestreo y moldeo de las Probetas, el muestreo se rige por la NTE INEN 153 (equivalente a ASTM C172). Se elaboran cilindros de 10 cm de diámetro por 20 cm de altura (NTE INEN 1573 / ASTM C39). Las probetas se curan en condiciones normalizadas (temperatura de  $23 \pm 2$  °C y humedad relativa  $\geq 95\%$ ).
- Ensayo en laboratorio, la probeta se coloca en una prensa hidráulica calibrada, se aplica carga axial continua y sin generar impacto, a una velocidad de 0.25 más menos 0.05 MPa/s hasta la falla, con esto registramos la carga axial máxima.
- Fórmulas utilizadas, la resistencia a la compresión se calcula mediante la expresión:

$$f'c = \frac{P}{A}$$

#### **Ecuación 3 Resistencia a la compresión**

Donde:

- $f'c$  = resistencia a la compresión (MPa o kgf/cm<sup>2</sup>)
- P = carga máxima aplicada por la prensa (N o kgf)
- A = área de la sección transversal de la probeta (mm<sup>2</sup> o cm<sup>2</sup>)

#### 2.1.6.2.2 Interpretación de resultados

El hormigón cumple si el promedio de las resistencias de un lote (mínimo 3 cilindros) es  $\geq f'c$  especificado. Ningún resultado individual puede ser inferior al 85% de  $f'c$ . En caso de resultados insatisfactorios, la NEC exige realizar ensayos adicionales como testigos (ASTM C42) o pruebas de carga en la estructura.

#### **2.1.6.3 Ensayo de Resistencia a la Flexión del Hormigón**

El ensayo a flexión en hormigón es un procedimiento normalizado que permite determinar la resistencia a la flexión o módulo de rotura (MR) del material, propiedad

mecánica que describe su capacidad para resistir tensiones de tracción inducidas por cargas flectoras. Este ensayo es de gran importancia en el diseño y control de calidad de elementos estructurales sometidos a flexión.

La norma ASTM C293 especifica el método para evaluar la resistencia a la flexión de vigas de hormigón simple mediante el ensayo de carga puntual central, en el que se aplica una carga en el centro de la longitud de una viga simplemente apoyada. Este método se diferencia del ensayo según la ASTM C78, donde la carga se aplica en dos puntos a tercios de la longitud de la viga.

Durante el ensayo, el hormigón desarrolla una fisura de tracción que inicia en la fibra inferior (zona de máxima tensión) y progresa hacia la zona de compresión hasta la rotura total. La falla es frágil y repentina, característica del material en flexión. La magnitud de la carga y la forma de la fisura permiten analizar la tenacidad y adherencia interna del hormigón.

El cálculo de este módulo se da con la siguiente fórmula, con base a la carga registrada en el ensayo.

$$f_r = \frac{3 P L}{2 b d^2}$$

#### **Ecuación 4 Resistencia a la flexión**

Donde:

P= Carga de rotura en kN

L= luz en mm

b, d= ancho y altura en mm

## **2.2 Marco metodológico**

El presente proyecto de investigación se enfocó en una metodología tipo cascada cuya finalidad fue evaluar el comportamiento mecánico de la nueva propuesta de hormigón sostenible con una sustitución parcial del cemento por arcillas calcinadas y adición de fibras naturales amazónicas como refuerzo; este enfoque nos permitió establecer relaciones de causa entre las variables establecidas y las propiedades mecánicas obtenidas del nuevo hormigón. La metodología enfocada en una investigación de tipo experimental se llevó a cabo en seis fases principales de secuencia:

1. Extracción de arcillas naturales.
2. Caracterización de materiales.
3. Diseño y optimización de mezclas.
4. Ensayos en estado fresco del hormigón y elaboración de probetas.
5. Curado de probetas.
6. Evaluación de propiedades mecánicas.

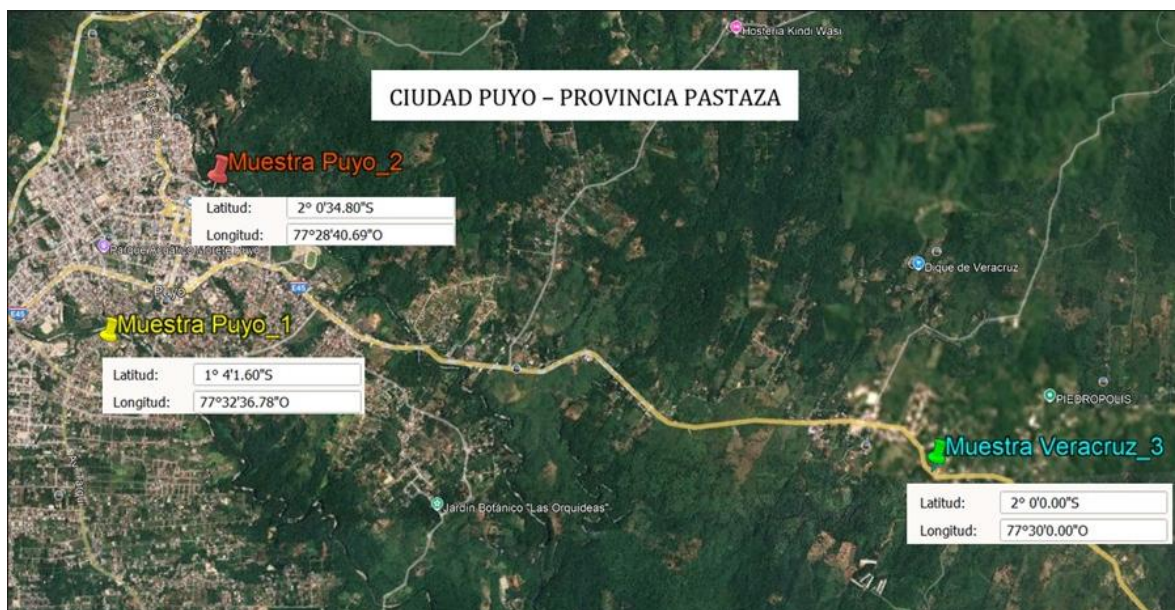
A continuación, se detalla el procedimiento llevado a cabo.

### 2.2.1 Trabajo de campo

La extracción de la materia prima, arcillas naturales, fueron obtenidas de la provincia de Pastaza dentro de la región Amazónica del Ecuador en tres puntos distintos de extracción. Ver la Tabla 2.4 y Figura 2.1

**Tabla 2.4 Coordenadas de puntos de muestra**

MUESTRA	PUYO_1	PUYO_2	VERACRUZ_3
Zona	17	18	18
Latitud	833239	166620	173250
Longitud	9834285	9835675	9832600
Altitud (m)	924	932	965



**Figura 2.1 Ubicación por coordenadas de los puntos de extracción de la materia prima, provincia de Pastaza**

Esta arcilla se encuentra dispuesta en depósitos naturales ubicadas en zonas accesibles de la provincia sin mayor esfuerzo físico para su adquisición en espacios abiertos como se observa en la Figura 2.2, se realizaron pequeñas excavaciones superficiales para evitar obtener muestras con contaminantes orgánicos superficiales mismas que afecten a la caracterización química de las arcillas. Se recolectó aproximadamente 10 kg de arcilla en estado húmedo por cada punto de extracción mismas que fueron almacenadas en sacos herméticos para preservar su humedad natural, éstas muestras fueron etiquetadas y transportadas para su posterior análisis en laboratorio (Figura 2.3).

Las fibras naturales utilizadas fueron de Aphandra Natalia, conocida como la fibra de escoba, éstas fueron suministradas por artesanos locales de la provincia de Napo. Las fibras que fueron usadas son aquellas que se presentaban en estado maduro las cuales fueron cortadas de manera manual en longitudes aproximadas de 30 a 50 mm las mismas que fueron trasladadas al laboratorio para su acondicionamiento previo a la elaboración de las probetas de hormigón. Todo el proceso de recolección y/o ubicación contó con el apoyo técnico y logístico de investigadores de la Universidad Regional Amazónica "IKIAM" quienes brindaron el acceso a los sitios de adquisición de las fibras y los permisos correspondientes para su extracción.



**Figura 2.2 Extracción de materia prima “arcilla natural”: (a) Terreno muestra-Puyo 1, (b) Ubicación muestra-Puyo 2, (c) Ubicación muestra-Veracruz 3**



**Figura 2.3 Almacenamiento de muestras en sacos herméticos**

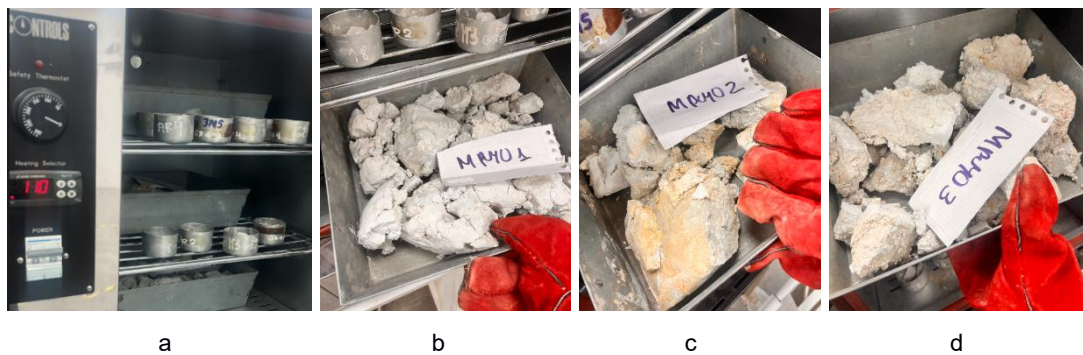
## **2.2.2 Trabajo de laboratorio o gabinete**

Previo a la obtención de la dosificación a usar, se realizó una caracterización de cada una de las materias primas (agregados) para conocer sus propiedades físicas que permitan obtener resultados reales aplicados a la dosificación establecida por el American Concrete Institute (ACI).

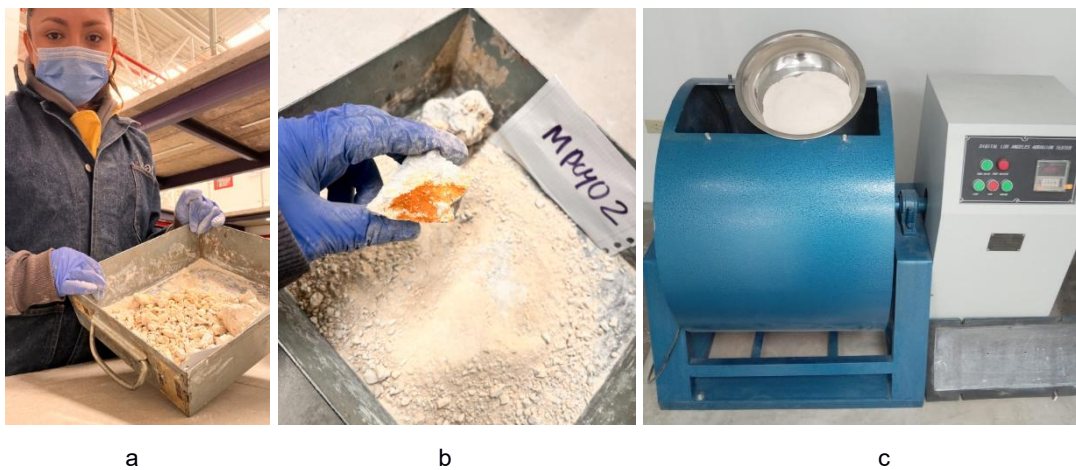
### **2.2.2.1 Caracterización de materiales**

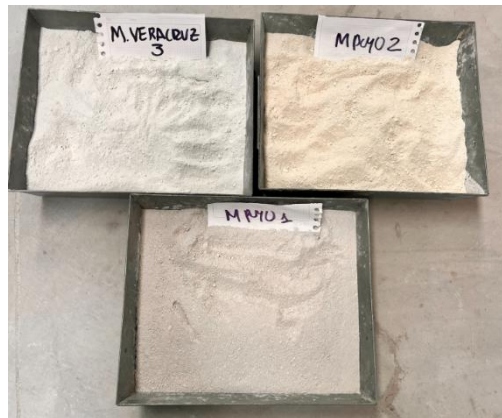
- **Arcilla Natural:** Se tomó muestras de arcilla de las muestras obtenidas en pequeñas proporciones para proceder a realizar el ensayo de contenido de humedad previo al secado de la muestra para otros análisis que serán indicados posteriormente. Se inició con un proceso de secado al aire durante 24 horas para posteriormente realizar su secado en horno a  $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  durante 24 horas para eliminar la humedad de la muestra (Figura 2.4). Posteriormente se realizó el molino de cada una de las muestras secas mediante el uso de la máquina de los ángeles, misma que contiene 12 esferas metálicas y permite desgastar la muestra hasta obtener un polvo fino que pasa por la malla # 200 “75  $\mu\text{m}$ ” (Figura 2.5). Estas muestras fueron enviadas a su análisis en el centro de investigación y desarrollo en nanotecnología en la Escuela Superior Politécnica del Litoral para la realización del ensayo mediante la técnica de Difracción de Rayos X “DRX” para identificar sus características mineralógicas en estado natural (Anexo 3) y de esta manera seleccionar la muestra que presenta mejores propiedades químicas para ser un

sustituto parcial del cemento; obtenidos los resultados se procedió a realizar la activación térmica o calcinación de la muestra a temperaturas de 700 a 800 °C durante 2 horas con un enfriamiento natural dentro del horno, de esta manera se envió la muestra a un nuevo análisis de DRX para verificar los cambios mineralógicos y justificar la literatura obtenida de investigaciones previas.



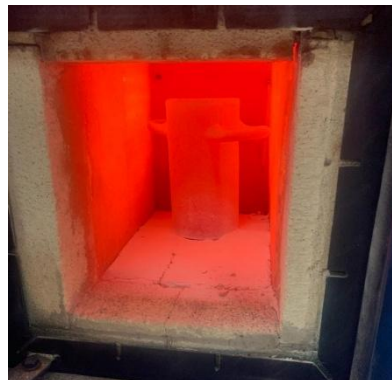
**Figura 2.4 Secado de muestras: (a) contenido de humedad de las muestras, (b) secado de la muestra-Puyo 1, (c) secado de la muestra-Puyo 2, (d) secado de la muestra-Veracruz 3**





d

**Figura 2.5** Proceso de trituration de la muestra seca: (a) Obtención de partículas más pequeñas de las muestras seca, (b) Diferencia de tamaños en el proceso de trituration manual, (c) Trituration o desgaste de partículas de arcilla seca en la Máquina de los Ángeles



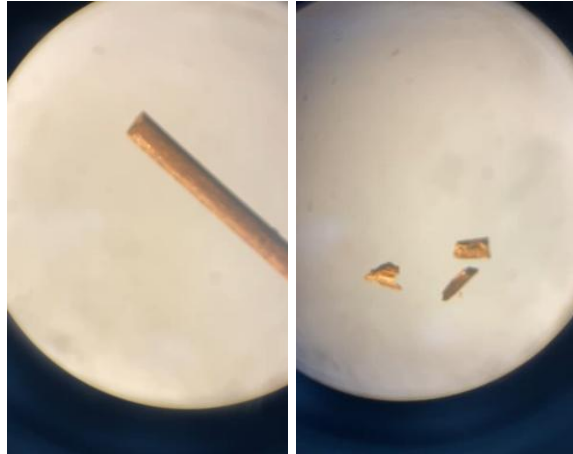
**Figura 2.6** Calcinación de muestra de arcilla natural a 750 °C

Obtenidos los resultados de DRX de la muestra calcinada, se realizó una activación masiva de la arcilla natural a la temperatura de 750 °C durante 2 horas, mediante el uso de hornos para preparación de arcilla en procesos de fabricación industrial, ver Figura 2.7.



**Figura 2.7** Calcinación masiva de la arcilla natural: (a) Colocación de muestra natural, (b) Distribución uniforme de la muestra natural en el volumen total del horno, (c) Encendido de quemadores, (d) Control de temperatura, (e) Sellado del horno, presencia de alta

- **Fibras naturales:** Las fibras de Aphandra Natalia fueron sometidas a un pretratamiento para la incorporación de éstas en la matriz de cemento, este proceso se desarrolló en el laboratorio adoptando metodologías aplicadas para fibras de origen natural, adicionalmente se realizó una observación bajo un estereoscopio de la fibra, ver Figura 2.8, para identificar la forma que tiene ésta



**Figura 2.8 Observación de la fibra de Aphandra Natalia bajo el lente del estereoscopio**

1. **Lavado y limpieza:** Las fibras fueron sumergidas en agua destilada a una temperatura ambiente ( $23\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) durante 30 minutos para eliminar impurezas superficiales y/o polvo que puedan interferir en la hidratación del cemento; posteriormente estas fibras fueron sometidas a un pretratamiento con una solución de NaOH (hidróxido de sodio) al 5% con un tiempo de exposición de 30 minutos acorde (Anteneh, 2021) y (Balcázar, 2020) en su tesis doctoral sobre la fibra Aphandra Natalia.
2. **Secado:** Finalizado el pretratamiento se secaron en un horno a una temperatura de  $60\text{ }^{\circ}\text{C}$  durante 24 horas para alcanzar una masa constante, se optó por esta temperatura puesto que evita la degradación térmica de la composición de la fibra (celulosa, hemicelulosa, lignina)
3. **Corte y clasificación:** Una vez secas se cortaron mecánicamente a longitudes de 30 y 50 mm, mediante un análisis visual se descartaron fibras con daños morfológicos evidentes como roturas, nudos o desgastes.



a



b



c

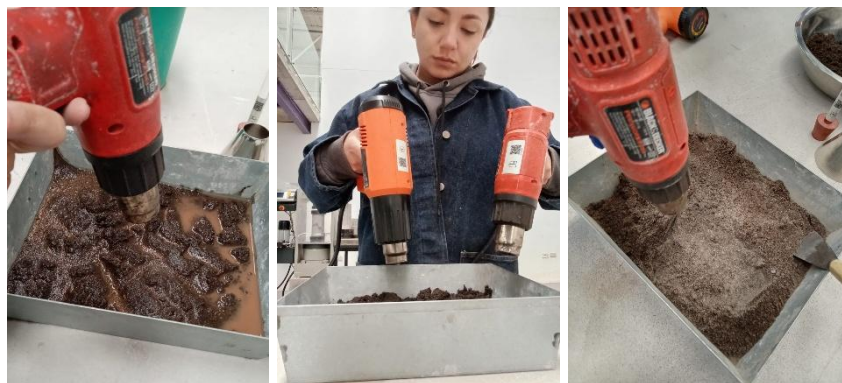


d

**Figura 2.9 Proceso de corte de las fibras naturales: (a) fibra Aphandra Natalia obtenida de la Amazonía, (b) Verificación de método de corte correcto, (c) Mejoramiento de corte con el uso de plástico film stretch, (d) corte de fibra a 50 mm de manera uniforme**

Las propiedades físicas de las fibras fueron tomadas de la investigación y caracterización realizada por (Balcázar, 2020) en su investigación doctoral, características que se consideraron para el diseño de la mezcla puesto que influyen en la absorción de la mezcla y su adherencia en la matriz.

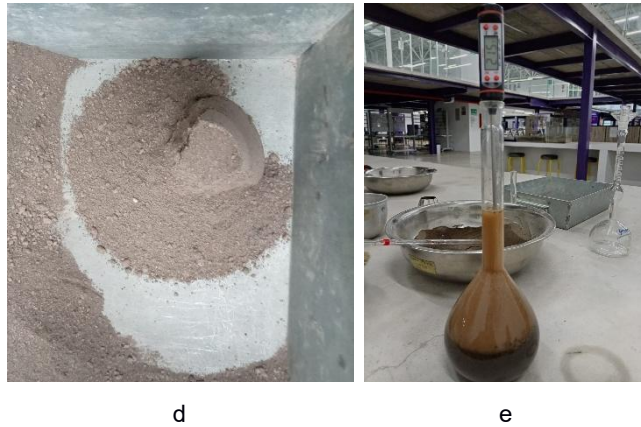
- **Agregados:** Los agregados finos y gruesos fueron caracterizados mediante ensayos de laboratorio como contenido de humedad (NTE INEN 690/ ASTM D2216), densidad y absorción (NTE INEN 856, 857/ ASTM C127, C128).



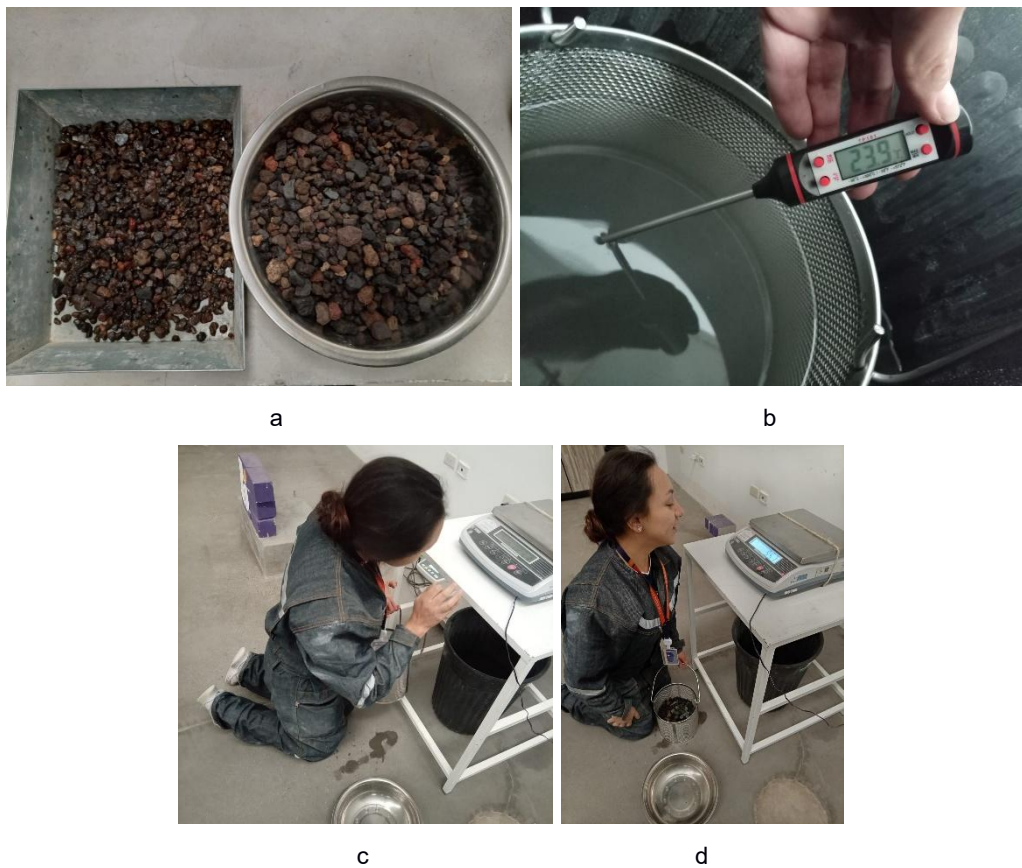
a

b

c



**Figura 2.10 Determinación de la densidad del árido fino: (a) Muestra saturada por 24 horas, (b) Secado de muestra constante, (c) Obtención de muestra superficialmente saturada, (d) Verificación de estado superficialmente saturado, (e) Control de temperatura para la probeta**

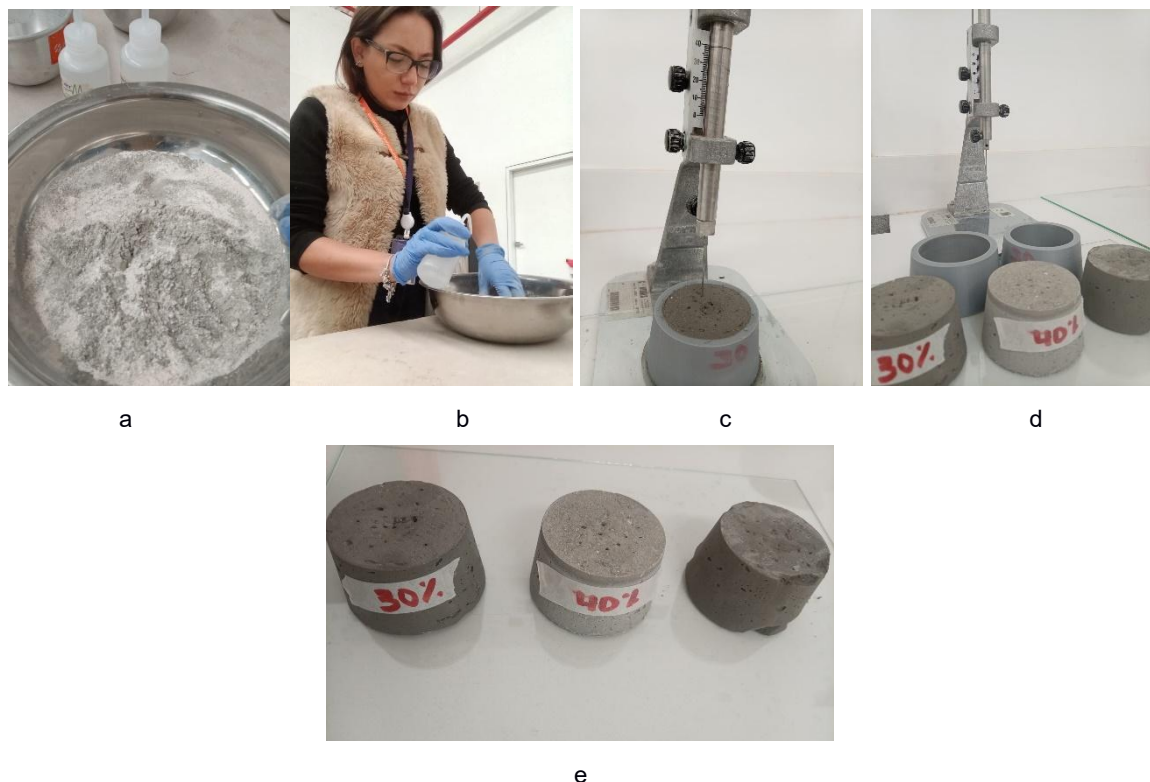


**Figura 2.11 Determinación de la densidad del árido grueso: (a) Muestra saturada durante 24 horas, (b) Verificación de temperatura para toma de datos, (c) Calibración de pesos sumergidos antes de introducir la muestra, (d) Introducción de muestra sumergida**

- **Cemento:** El cemento portland utilizado fue de la marca Holcim cuyas características físicas y químicas fueron usadas mediante su ficha técnica.

### 2.2.2.2 Diseño de mezclas

Se procedió a realizar un diseño base con las características obtenidas de los materiales según el método de dosificación del ACI con una resistencia de diseño objetivo de 21 MPa. A partir del diseño base se realizaron mezclas experimentales con sustitución parcial de cemento por arcilla calcinada en tres porcentajes (30% y 40% en peso) y adición de fibras naturales al 1% en volumen. Se realizó un ensayo previo a la mezcla de tiempo de fraguado según la norma NTE INEN 158/ ASTM C191 para determinar el impacto de las arcillas calcinas en este proceso de endurecimiento del cemento. Para cada mezcla se realizó ensayos de trabajabilidad mediante el ensayo de asentamiento o método de slump test según la norma NTE INEN 1578 / ASTM C143.



**Figura 2.12** Ensayo de tiempo de fraguado con el método de Vicat: (a) mezcla del reemplazo de arcilla con cemento, (b) adición de agua, (c) toma de medidas de

penetración de aguja Vicat, (d) resultados obtenidos de las tres muestras, (e) identificación de penetración



Figura 2.13 Control de asentamiento de las dosificaciones en estado fresco

### 2.2.2.3 Elaboración y curado de probetas

Se optó el moldeado de 3 cilindros de 100x200 mm por cada diseño establecido (6 dosificaciones) y los días de evaluación (7, 14, 28 días) dando un total de 54 probetas para ensayos de compresión y 12 vigas de 150x150x600 mm para ensayos de flexión. El mezclado se realizó de manera manual tomando en consideración recomendaciones definidas en la norma NTE INEN 1763/ ASTM C172, ver Anexo 4 y Anexo 5.

El desencofrado de las muestras se dio a las 24 horas finalizado el moldeado, fueron etiquetadas y transportadas a un tanque de curado con cal hidratada hasta el momento de los ensayos de compresión y flexión.

### 2.2.2.4 Ensayos realizados

Para poder garantizar la repetibilidad y confiabilidad de los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio, se siguieron estrictamente los protocolos establecidos en la norma ecuatoriana NTE INEN o la normativa internacional ASTM, así como también las recomendaciones establecidas en un control de calidad según la normativa ISO/IEC 17025 según lo indicado por el personal técnico de laboratorio.

- **Resistencia a la compresión:** Se utilizó una máquina de ensayos de compresión de cilindros CONTROLS C32C04 con una capacidad de 3000 kN siguiendo las

indicaciones de la norma NTE INEN 1573/ ASTM C39 y con personal técnico capacitado en el desarrollo de estas pruebas, dicha maquina cuenta con certificado de calibración y mantenimiento vigente para una mejor validación de resultados obtenidos.

- **Resistencia a la flexión:** Se utilizó un maquina universal utilizando los accesorios necesarios para realizar el montaje de flexión en 3 puntos según lo establecido en la norma NTE INEN 2554/ ASTM C78 con el acompañamiento de personal técnico capacitado.
- **Cemento Hidráulico (Determinación de la densidad):** Basado en el método estándar para determinar la densidad de materiales cementantes finos (como cemento, puzolanas, filler calizo, etc.) es la Norma ASTM C188 - Standard Test Method for Density of Hydraulic Cemen

### 2.2.3 Tabulación de datos

Los resultados brutos obtenidos luego de realizar los ensayos de laboratorio fueron registrados en hojas de cálculo de Microsoft Excel tomando en consideración los métodos de cálculo indicado en cada normativa a seguir según el ensayo realizado.

### 2.2.4 Difracción de Rayos X

Una vez obtenidas las muestras de arcillas en los 3 puntos indicados en la sección Marco metodológico se procedió a secar las muestras, triturarlas para llegar al tamaño de partícula aproximado a 15 micrómetros, obteniendo esta característica fueron enviadas al laboratorio CIDNA, Centro de Investigación y Desarrollo en Nanotecnología, dando los siguientes resultados:

#### **Equipo utilizado para los ensayos**

Equipo: Difractómetro de Rayos X (XRD)

Marca: Panalytical

Modelo: X' Pert PRO

#### **Parámetros de ensayo**

Goniómetro: PW3050/60 (Theta/2Theta)

Posición inicial ( $^{\circ}2\theta$ ): 5,0251

Posición final ( $^{\circ}2\theta$ ): 79,9751

Tamaño de paso: 0.050

Ánodo del material: Cobalto

Configuración de generador: 20 mA, 40 kV

### **Procedimiento del ensayo**

El objetivo fundamental del ensayo es identificar y cuantificar la fase cristalina de las muestras sólidas obtenidas de nuestro material a evaluar, en este caso la arcilla calcinada. Se realiza en los siguientes pasos:

- La muestra por analizar debe de estar en un estado seco, posterior al retiro de la mayor cantidad de humedad que tenga la muestra.
- El tamaño de las partículas del material por analizar debe de un máximo de 15 micrómetros, el cual nuestra muestra cumplía al realizarle una abrasión directa por el método de los ángeles. Esto con el fin de mejorar la estadística de resultado y evitar tensiones durante el proceso.
- La muestra del material por analizar debe de ser colocada evitando una orientación preferente, debemos de rellenar el porta muestras desde la parte posterior y sin alisar, posterior a la colocación se utiliza un razor con mínima presión. Se deben de llenar todos los espacios de la porta muestra.
- El espesor de la muestra con un máximo de 2mm, grosor óptimo para la acción de la radiación.
- Teniendo lista la muestra con los parámetros físicos, se procede a insertarla en la máquina, cerra la cubierta y verificar los parámetros del ensayo previamente mencionados.
- Durante el ensayo se revisan los conteos generados, los picos que se producen en el difractograma en donde se muestra la distancia interplanar de ciertos planos de la red cristalina (Ley de Bragg). Estos picos mientras más estrechos se presenten dan señales a mayores planos cristalinos y sirven para identificar las fases y relaciones de intensidad. Los picos denominados de "Joroba ancha", indican el halo amorfo, lo que nos da presencia de material amorfo no identificado por el ensayo realizado.
- El informe dado por el ensayo prácticamente es su distribución porcentual de los compuestos que contiene el material analizado.

Al realizarle este ensayo a 3 muestras de arcillas tomadas en 3 localidades distintas procedimos a compararlas y tomar la muestra con mejor caracterización para procederla a calcinarla y repetir el ensayo.

## CAPÍTULO 3

### RESULTADOS

#### 3.1. M. PUYO 1

La arcilla denominada “M. PUYO 1”, ubicada dentro de la zona urbana de la ciudad del Puyo – Tena, presenta un patrón difractométrico en donde presenta una composición en mayor porcentaje por minerales del grupo de la Kaolinita y Halloysita, parcialmente acompañado por una fracción amorfa y una pequeña porción de Sílice. Los porcentajes reportados corresponden a la fracción cristalina y amorfa presentes en la muestra analizada. El resumen de los resultados los podemos visualizar en la Tabla 3.5 y el patrón difractométrico en la Figura 3.15

**Tabla 3.5 Porcentaje de cada compuesto en la muestra M. PUYO 1**

Código de referencia	Nombre del compuesto	Fórmula química	Porcentaje (%)
00-029-1488	Kaolinita	$Al_2 Si_2 O_5 (OH)_4$	59,4
00-033-1161	Sílica	$Si O_2$	2,3
00-013-0375	Halloysita	$Al_2 Si_2 O_5 (OH)_4$	17,6
	Amorfo		20,8

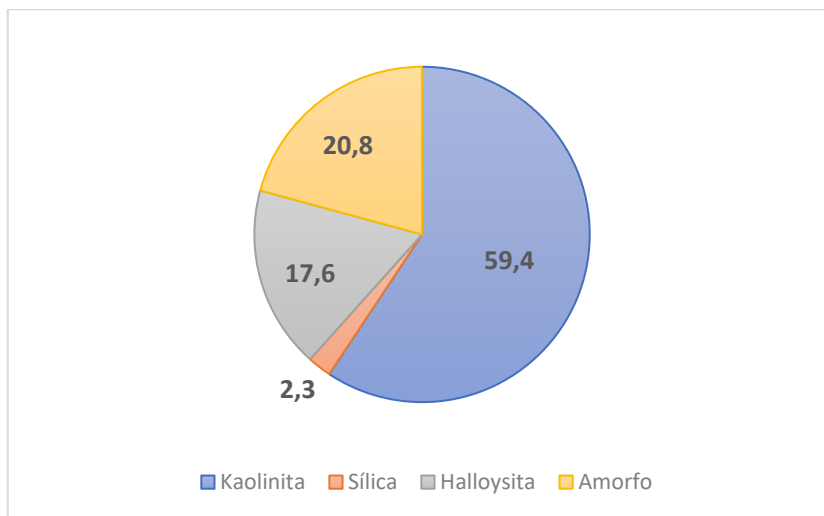


Figura 3.14 Gráfico porcentual de compuestos químicos de la muestra M. PUYO 1

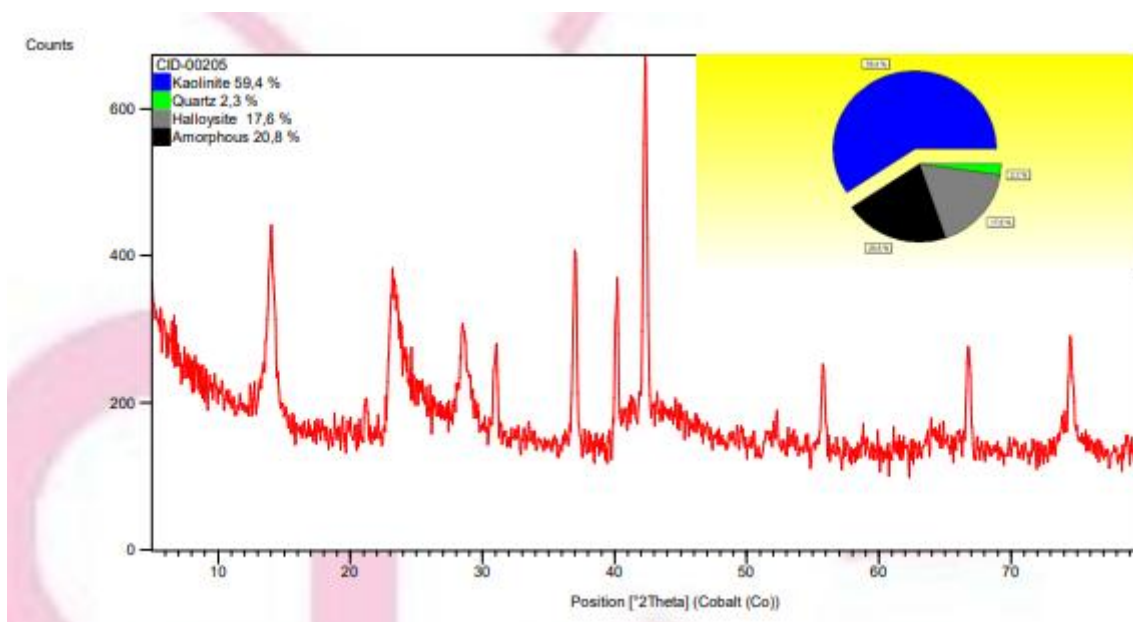


Figura 3.15 Patrón difractométrico M. PUYO 1

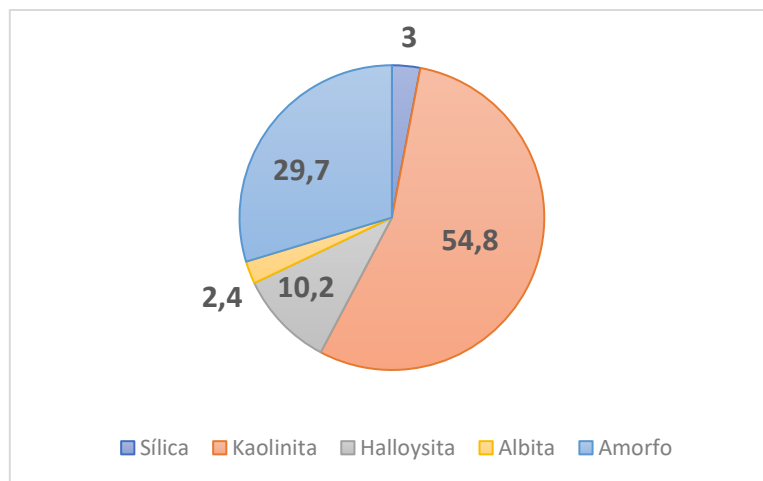
### 3.2. M. PUYO 2

La arcilla denominada “M. PUYO 2”, ubicada dentro de la zona urbana de la ciudad del Puyo – Tena, presenta un patrón difractométrico en donde presenta un ensamble dominante entre la Kaolinita y Halloysita, acompañado por la Sílica y una fracción menor de Albita. La porción amorfa en el material es significativa, indicativo de material desordenado. Los porcentajes reportados corresponden a la fracción cristalina y amorfa

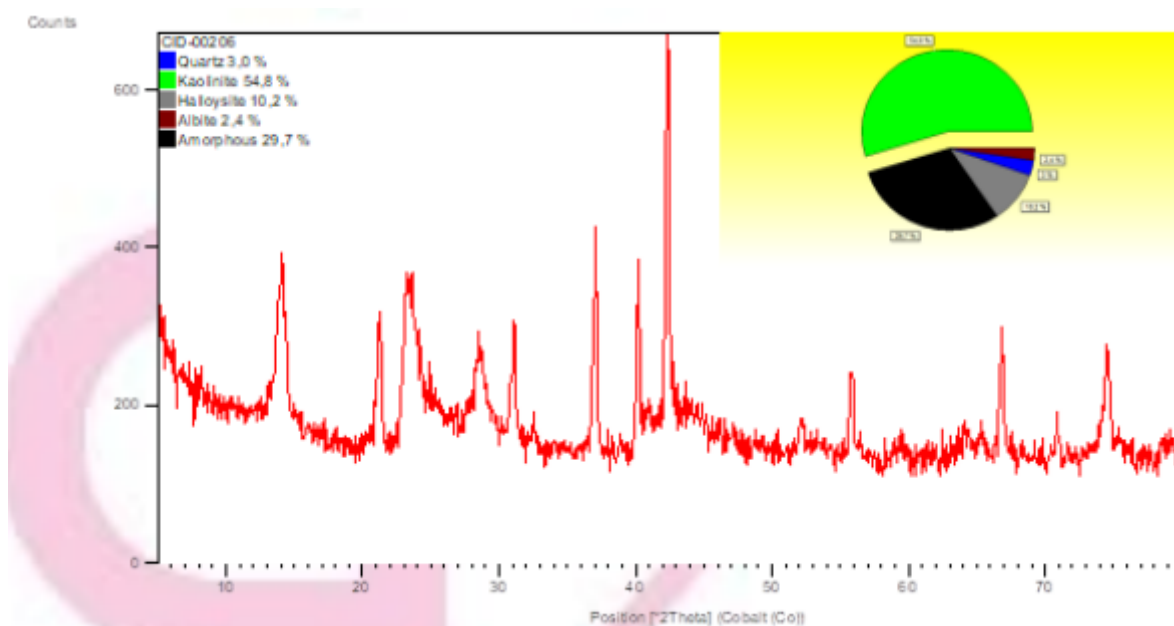
presentes en la muestra analizada. El resumen de los resultados los podemos visualizar en la Tabla 3.6 y el patrón difractométrico en la Figura 3.17.

**Tabla 3.6 Porcentaje de cada compuesto en la muestra M. PUYO 2**

Código de referencia	Nombre del compuesto	Fórmula química	Porcentaje (%)
00-033-1161	silica	Si O <sub>2</sub>	3
00-029-1488	Kaolinita	Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>	54,8
00-013-0375	Halloysita	Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>	10,2
00-041-1480	Albita	(Na, Ca) Al (Si, Al) <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	2,4
	Amorfo		29,7



**Figura 3.16 Gráfico porcentual de compuestos químicos de la muestra M. PUYO 2**



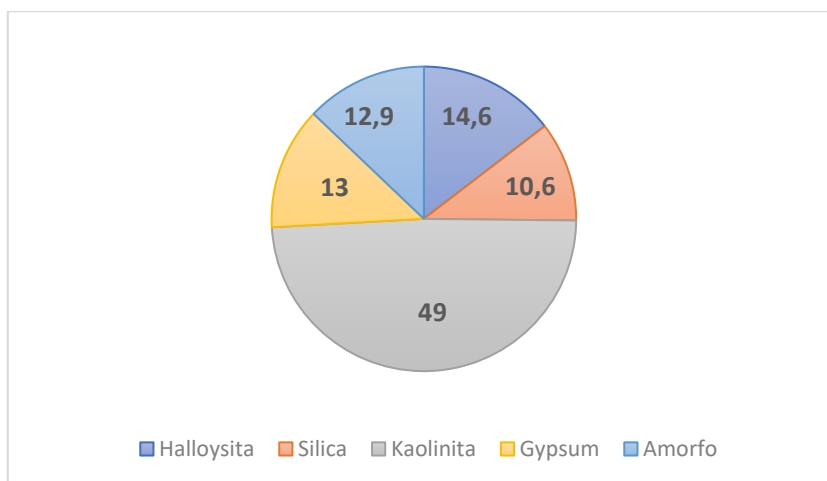
**Figura 3.17 Patrón difractométrico M. PUYO 2**

### 3.3. M. VERACRUZ

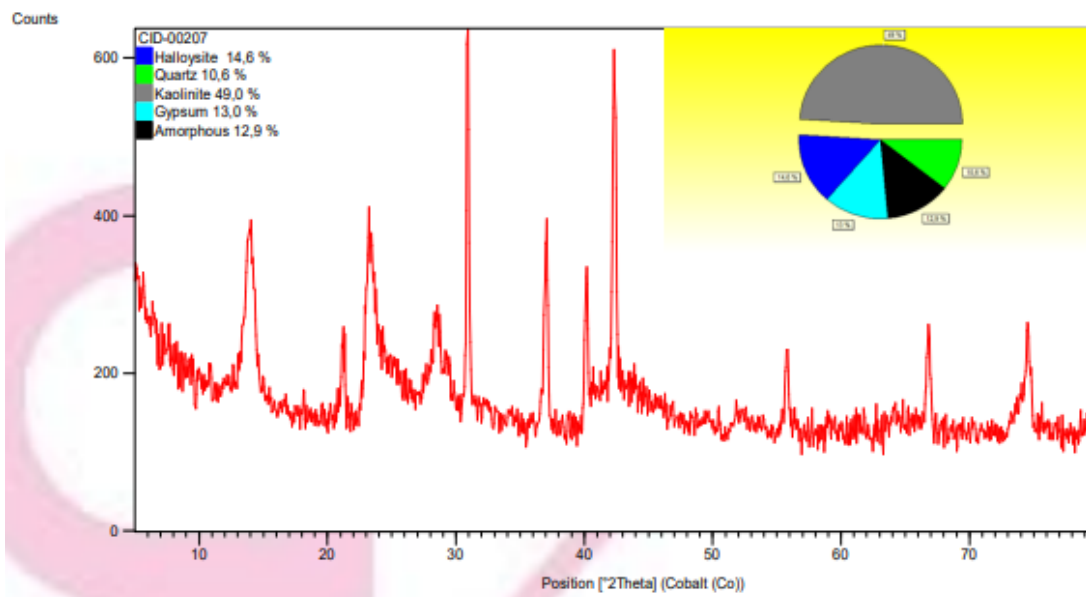
La arcilla denominada “M. VERACRUZ”, ubicada dentro de la zona periférica de la ciudad del Puyo – Tena, presenta un patrón difractométrico en donde presenta un ensamble dominante entre la Kaolinita y Halloysita, acompañado por la Sílice y la presencia de Sulfato Cálcico Hidratado, comercialmente conocido como Yes. La porción amorfa en el material es apreciable, indicativo de material desordenado. Los porcentajes reportados corresponden a la fracción cristalina y amorfa presentes en la muestra analizada. El resumen de los resultados los podemos visualizar en la Tabla 3.7 y el patrón difractométrico en la Figura 3.19.

**Tabla 3.7 Porcentaje de cada compuesto en la muestra M. VERACRUZ**

Código de referencia	Nombre del compuesto	Fórmula química	Porcentaje (%)
00-13-0375	Halloysita	Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>	14,6
00-033-1161	Silica	Si O <sub>2</sub>	10,6
00-029-1488	Kaolinita	Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>	49
00-36-0432	Gypsum	Ca S O <sub>4</sub> !2 Ha O	13
	Amorfo		12,9



**Figura 3.18 Gráfico porcentual de compuestos químicos de la muestra M. VERACRUZ**



**Figura 3.19 Patrón difractométrico M. VERACRUZ**

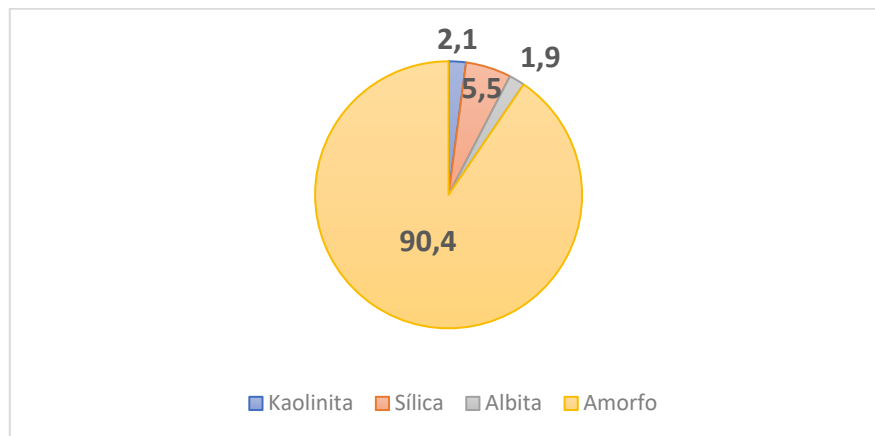
Al recibir los resultados de las 3 muestras, se revisó la información de los compuestos y se llegó a la elección de continuar con los estudios a la muestra “M. PUYO 1”, al ser la muestra con mayor porcentaje del compuesto Kaolinita con 59,4%. Posterior a la elección de la muestra, se calcinará para determinar el cambio que se genera en su composición química. A continuación, presentaremos los resultados de la muestra en estado calcinado.

### **3.4. M. PUYO 1 CALCINADA**

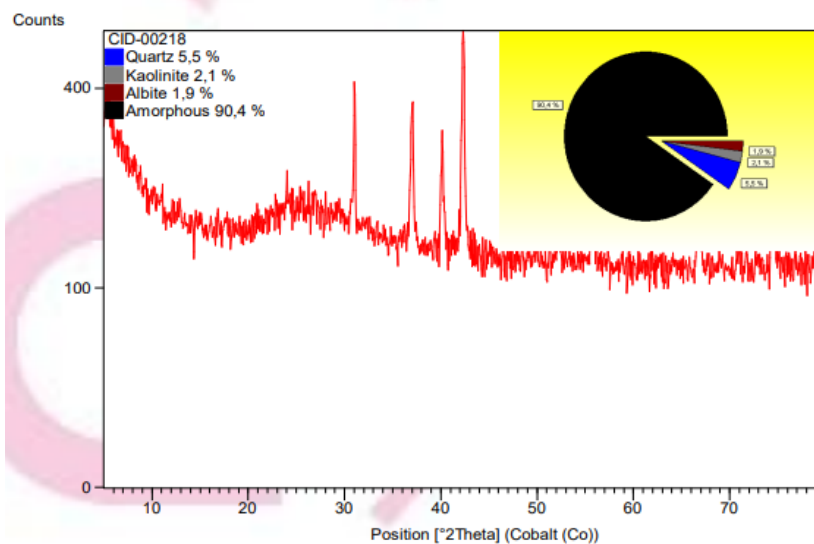
La arcilla M. PUYO 1, posterior a la calcinación nos dio los resultados que muestra la Tabla 3.8, mostrando la transformación del conjunto entre Kaolinita y Halloysita en Amorfo, aumento de la cantidad de Sílice y la formación de Albita. El patrón difractométrico a la post-calcinación da como resultado un 90.4% de compuesto Amorfo consistente con un Metacaolín bien formado prometedor para ser utilizado como reemplazo parcial del cemento Portland en una mezcla de hormigón. El resumen de los resultados los podemos visualizar en la Tabla 3.8 y el patrón difractométrico en la Figura 3.21

**Tabla 3.8 Porcentaje de cada compuesto en la muestra M. PUYO 1 CALCINADA**

Código de referencia	Nombre del compuesto	Fórmula química	Porcentaje (%)
00-029-1488	Kaolinita	Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>	2,1
00-033-1161	Sílica	Si O <sub>2</sub>	5,5
00-013-0393	Albita	Sin (Si <sub>3</sub> Al) O <sub>8</sub>	1,9
	Amorfo		90,4



**Figura 3.20 Gráfico porcentual de compuestos químicos de la muestra M. PUYO 1 CALCINADA**



**Figura 3.21 Patrón difractométrico M. PUYO 1 CALCINADA**

### 3.5. Contenido de humedad:

Se realizó un cálculo del contenido de humedad que presenta la arcilla en su estado natural correspondiente al punto 1 de extracción puesto que presenta las mejores propiedades para una arcilla como suplemento parcial del cemento, en la Tabla 3.9 se indica los datos obtenidos dando como resultado un contenido de humedad promedio de 61.0% lo que indica un material con alta humedad, característica típica para una arcilla.

**Tabla 3.9 Resultados del contenido de humedad NTE INEN 690- arcilla en estado natural**

MUESTRA	Recipiente #	Masa (g)	Rec. + Suelo Hum.	Rec. + Suelo Seco	Contenido de Agua
MPUYO1	AR2	17,5	35,6	28,7	61,6
MPUYO1	AR3	18,6	58,4	43,2	61,8
MPUYO1	G2H3	18,2	52,2	39,6	58,9
MPUYO1	G3#3	18,3	47,9	36,6	61,7
<b>Promedio W =</b>				61,0	

Se realiza un cálculo adicional para determinar la masa seca para dosificación previa a su proceso de calcinación, con el fin de determinar un aproximado de la cantidad a obtener de arcilla en su estado natural; la misma será sometida a una temperatura de  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  antes de su proceso de trituración y calcinación, con el fin de obtener una muestra representativa para los procesos mencionados según la dosificación:

$$W(\%) = \frac{M_w}{M_s}$$

#### **Ecuación 5: Porcentaje de cantidad de agua**

$$W(\%) = \frac{\text{Masa del agua}}{\text{Masa del sólido seco}}$$

$$M_w = \text{Masa del agua}$$

$$M_s = \text{Masa del sólido seco}$$

$$\text{Masa total húmeda} = M_w + M_s$$

$$\text{Masa total} = M_s + M_w$$

$$\text{Masa total} = 175.00 \text{ kg}$$

$$W(\%) = 0.61$$

$$M_w = 0.61 * M_s$$

$$(0.61 * M_s) + M_s = 175$$

$$M_s = \frac{175}{1.61} = 108.69 \text{ kg}$$

### 3.6. Densidad del cemento

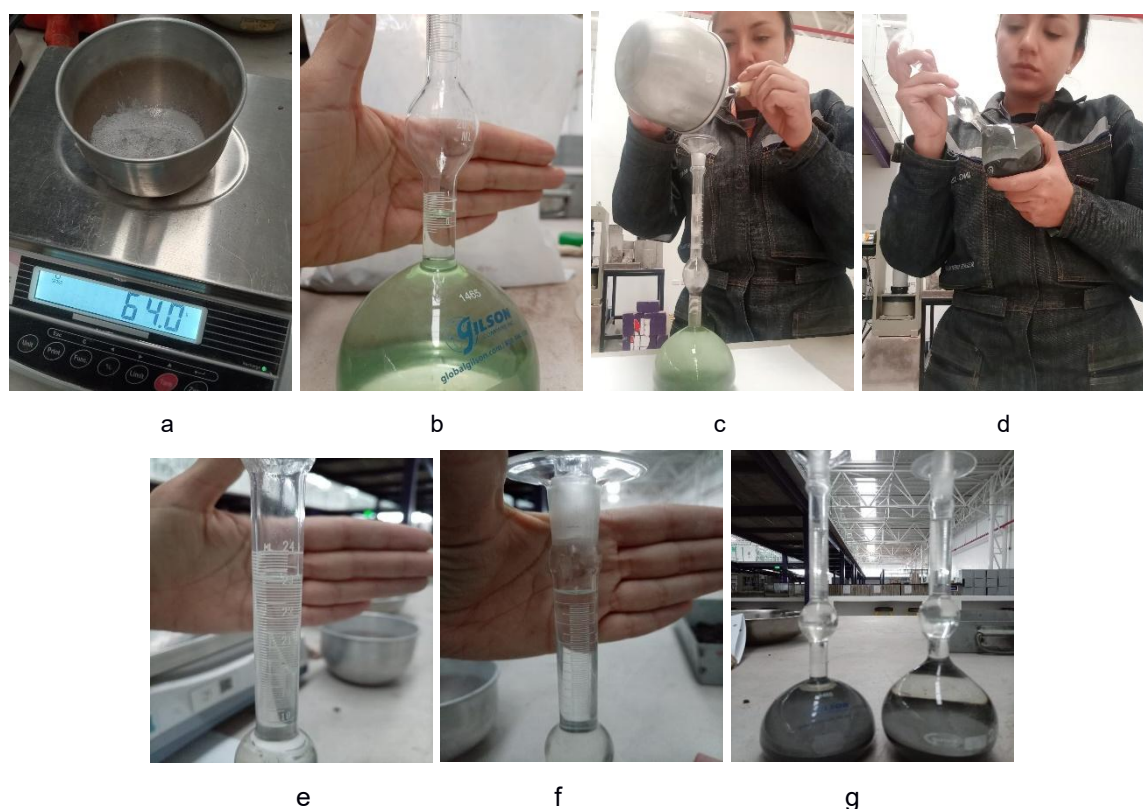
Obtenida la muestra de arcilla calcinada a la temperatura de 750°C en la Tabla 3.10, se puede observar los resultados obtenidos luego de la determinación de la densidad de la arcilla calcinada como material cementante, siguiendo las recomendaciones y parámetros establecidos en la norma NTE INEN 156.

**Tabla 3.10 Resultados del ensayo NTE INEN 156 – Densidad de la arcilla calcinada**

<b>Norma de referencia</b>	NTE INEN 156:2009		
<b>Método de Ensayo</b>	Picnómetro de Le Chatelier		
<b>Descripción de la muestra</b>	Material cementante (arcilla calcinada a 750°C)		
<b>Fecha de muestreo</b>	5/9/2025		
<b>Temperatura ambiente</b>	14 °C		
<b>Humedad relativa</b>	No especificada		
<b>Observación</b>	1 mL = 1 cm <sup>3</sup>		
<b>Parámetro</b>	<b>Ensayo 1</b>	<b>Ensayo 2</b>	<b>Promedio (Resultado final)</b>
Masa del cemento (g)	64	59	-
Lectura inicial (mL)	0,5	0,2	-
Lectura final (mL)	24,5	23,1	-
Volumen desplazado (mL)	24	22,9	-
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	2,67	2,58	<b>2,62</b>

Según el desarrollo del ensayo mencionado, se recomienda utilizar una masa de 64 gr, sin embargo, como se lo puede ver en la Tabla 3.10 existe una diferencia de lo establecido en normativa en la masa de material usado; esto debido a que al momento de realizar el método de ensayo según lo establecido por normativa se presentan inconvenientes en la toma de lectura final del picnómetro como se lo muestra en la Figura 3.22; de esta manera se realiza una pequeña variación en la cantidad de masa utilizada para constatar correctamente la variación de volúmenes y determinar de mejor manera la densidad característica del material en análisis.

Siguiendo estos resultados bajo la norma NTE INEN 156 se concluye que la densidad real del material cementante en análisis basado en arcilla calcinada a 750°C es de 2.63 g/cm<sup>3</sup>. Este valor presenta una variación a la densidad característica de un cemento Portland convencional (valores entre 3 a 3.15 g/cm<sup>3</sup>) lo que indica que este material cementante posee una naturaleza física distinta al cemento, es menos denso y más poroso lo que influye directamente con las cantidades a usar en la dosificación. De esta manera se debe realizar un correcto cálculo de dosificación basado en el volumen absoluto del material cementante para mantener la mezcla constante en el reemplazo parcial de cemento propuesto; un reemplazo directo por masa altera la relación agua/cemento y la estructura de la pasta.



**Figura 3.22 Densidad de la arcilla calcinada: (a) peso de la muestra inicial -Ensayo 1, (b) lectura inicial-Ensayo 1, (c) introducción de la muestra en el frasco de Le Chatelier, (d) agitación manual de la muestra, (e) lectura final-Ensayo 2, (f) inconsistencia en**

### 3.7. Densidad el árido fino

Tabla 3.11 Densidad de árido fino

<b>Fecha de Ensayo</b>	4/9/2025
<b>Norma de Ensayo</b>	NTE INEN 856
<b>Tipo de muestra</b>	Árido de la mina "Constructora Vargas Soria"-Baño de Agua Santa
<b>Coordenadas</b>	-----
<b>Temperatura del agua</b>	21 °C

Descripción	Símbolo	Ensayo 1	Ensayo 2	Unidad
Masa de la muestra seca al horno	A	493,4	497,8	g
Masa del picnómetro lleno con agua hasta marca de calibración	B	663,8	664,2	g
Masa picnómetro + muestra sss + agua	C	945,3	949,8	g
Masa en estado SSS	S	500	500	g
Densidad del agua	yh	0,998	0,998	gr/cm <sup>3</sup>

Densidad Relativa	Símbolo	Ensayo 1	Ensayo 2	Promedio	Unidad
Densidad Relativa (Gravedad específica)	SH	2,26	2,32	2,29	-
Densidad Relativa (Gravedad específica)	SSS	2,29	2,33	2,31	-
Densidad Relativa Aparente	-	2,33	2,35	2,34	-
Densidad	Símbolo	Ensayo 1	Ensayo 2	Promedio	Unidad
Densidad (árido seco)	SH	2253,61	2317,18	2285,40	kg/m <sup>3</sup>
Densidad (condición saturada)	SSS	2283,75	2327,43	2305,59	kg/m <sup>3</sup>
Densidad Aparente	SSS	2323,80	2341,21	2332,50	kg/m <sup>3</sup>
Muestra SSS para absorción	S2	500,00	500,00	500,00	g
Masa de la muestra seca al horno para absorción	A2	496,80	497,40	497,10	g
<b>Absorción</b>	-	0,64	0,52	0,58	%

### 3.8. Densidad del árido grueso

Tabla 3.12 Densidad de árido grueso

<b>Fecha de Ensayo</b>	9/9/2025
<b>Norma de Ensayo</b>	NTE INEN 857
<b>Tipo de muestra</b>	Árido de la mina "Constructora Vargas Soria"-Baño de Agua Santa
<b>Coordenadas</b>	
<b>Temperatura del agua</b>	23,8 °C

Descripción	Símbolo	Ensayo 1	Unidad
Masa en aire de la muestra seca al horno	A	2949,7	g

Masa en aire de la muestra saturada superficialmente seca	B	3000	g
Masa aparente en agua de la muestra saturada	C	1831,8	g
Densidad del agua	$\gamma_h$	0,9971	gr/cm <sup>3</sup>
<b>Densidad Relativa</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Ensayo</b>	<b>Unidad</b>
Densidad Relativa (Gravedad específica)	SH	2,52	-
Densidad Relativa (Gravedad específica)	SSS	2,57	-
Densidad Relativa Aparente	-	2,64	-
<b>Densidad</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Ensayo</b>	<b>Unidad</b>
Densidad (árido seco)	SH	2517,67	kg/m <sup>3</sup>
Densidad (condición saturada)	SSS	2560,61	kg/m <sup>3</sup>
Densidad Aparente	SSS	2630,96	kg/m <sup>3</sup>
<b>Absorción</b>	-	1,71	%

### 3.9. Caracterización del cemento HOLCIM FUERTE

Tabla 3.13 Caracterización de Cemento

ENSAYOS	PARÁMETRO	UNIDAD	CEMENTO HIDRÁULICO HOLCIM FUERTE TIPO GU	REQUISITOS NTP 334.082 / ASTM C-1157
Ensayos físicos	Contenido de aire	%	6.0 - 9.0	Máximo 12
	Densidad	g/cm <sup>3</sup>	2.85 - 3.00	No especifica
	Superficie específica	cm <sup>2</sup> /g	4500 - 4800	No especifica
	Retenido en malla 325 (45 $\mu$ m)	%	5.0 - 6.0	No especifica
Resistencia a la compresión	Resistencia a la compresión - 1 día	kg/cm <sup>2</sup>	120 - 130	No especifica
	Resistencia a la compresión - 3 días	kg/cm <sup>2</sup>	160 - 180	Mínimo 132
	Resistencia a la compresión - 7 días	kg/cm <sup>2</sup>	240 - 270	Mínimo 204
	Resistencia a la compresión - 28 días	kg/cm <sup>2</sup>	330 - 350	Mínimo 285
Tiempo de fraguado	Fraguado Inicial	min	120 - 140	45 a 420
Durabilidad	Expansión en Barras a 14 días	%	0.001 - 0.003	Máximo 0.02

### 3.10. Diseño de hormigón

Se empleó como base el diseño de hormigón estándar de 21 MPa respaldado por la norma ASTM C143 la dosificación de los componentes del hormigón. Para el diseño se consideraron los siguientes requerimientos técnicos.

- Resistencia: 210 kg/cm<sup>2</sup>

- Revenimiento: 5 – 10cm
- Tamaño máx. De agregado: ¾" – 19mm
- Relación a/c= 0.58

La dosificación con respecto a los pesos de cada componente se hará en referencia a la producción de  $1m^3$  de hormigón, dándonos como resultado lo expuesto en la Tabla 3.14:

**Tabla 3.14 Tabla de dosificación para hormigón 21 MPa**

ELEMENTO	PESO (kg)
Cemento	382,25
Agua	221,71
Piedra	916,84
Arena	708,01

### 3.10.1. Diseño de hormigón para las mezclas propuestas

Al definir los 3 porcentajes se mostrará la cantidad de cada elemento de la mezcla de hormigón con referencia a  $1m^3$ .

Tomando como referencia el diseño establecido, en la Tabla 3.15 se presenta la cantidad de material necesario para  $1m^3$  y para llevar a cabo el moldeado de probetas necesarias para evaluar las características del hormigón:

**Tabla 3.15 Tabla de dosificación con reemplazo parcial de cemento Portland con arcilla calcinada y fibras naturales**

REEMPLAZO	PESO (kg)		
	0%	30%	40%
Cemento	382,25	267,58	229,35
Arcilla calcinada	-	114,68	152,90
Agua	221,71	221,71	221,71
Piedra	916,84	916,84	916,84
Arena	708,01	708,01	708,01

<b>Cantidad de Material para ensayo de Compresión</b>										
Reemplazo de arcilla	Cantidad de Fibra	Vol. (m3) cilindro	Vol. 9 cilindros (m3)	Cemento (Kg)	Cemento real (Kg)	Arena (Kg)	Piedra (Kg)	Agua (lt)	Arcilla (Kg)	Fibra (Kg)
0%	0%	0,0016	0,0144	5,50	5,50	10,20	13,20	3,19	-	-
0%	1%	0,0016	0,0144	5,50	5,50	10,20	13,20	3,19	-	0,055
30%	0%	0,0016	0,0144	5,50	3,85	10,20	13,20	3,19	1,65	-
30%	1%	0,0016	0,0144	5,50	3,85	10,20	13,20	3,19	1,65	0,055
40%	0%	0,0016	0,0144	5,50	3,30	10,20	13,20	3,19	2,20	-
40%	1%	0,0016	0,0144	5,50	3,30	10,20	13,20	3,19	2,20	0,055

<b>Cilindros totales</b>	<b>54</b>
<b>Cilindros con fibra</b>	<b>27</b>

<b>Sub TOTAL</b>	25,32	61,17	79,21	19,16	7,71	0,17
<b>Desperdicio 10%</b>	2,53	6,12	7,92	1,92	0,77	0,02
<b>TOTAL</b>	<b>27,85</b>	<b>67,29</b>	<b>87,14</b>	<b>21,07</b>	<b>8,48</b>	<b>0,18</b>

<b>Cantidad de Material para ensayo de Flexión</b>										
Reemplazo de arcilla	Cantidad de Fibra	Vol. (m3) cilindro	Vol. 9 cilindros (m3)	Cemento (Kg)	Cemento real (Kg)	Arena (Kg)	Piedra (Kg)	Agua (lt)	Arcilla (Kg)	Fibra (Kg)
0%	0%	0,0135	0,0270	10,32	10,32	19,12	24,75	5,99	-	-
0%	1%	0,0135	0,0270	10,32	10,32	19,12	24,75	5,99	-	0,103
30%	0%	0,0135	0,0270	10,32	7,22	19,12	24,75	5,99	3,10	0,000
30%	1%	0,0135	0,0270	10,32	7,22	19,12	24,75	5,99	3,10	0,103
40%	0%	0,0135	0,0270	10,32	6,19	19,12	24,75	5,99	4,13	0,000
40%	1%	0,0135	0,0270	10,32	6,19	19,12	24,75	5,99	4,13	0,103

<b>Vigas totales</b>	<b>12</b>
<b>Vigas con fibra</b>	<b>6</b>

<b>Sub TOTAL</b>	47,48	114,70	148,53	35,92	14,45	0,31
<b>Desperdicio 10%</b>	4,75	11,47	14,85	3,59	1,44	0,03
<b>52,22</b>	<b>126,17</b>	<b>163,38</b>	<b>39,51</b>	<b>15,89</b>	<b>0,34</b>	<b>0,18</b>

### 3.11. Trabajabilidad del hormigón en estado fresco

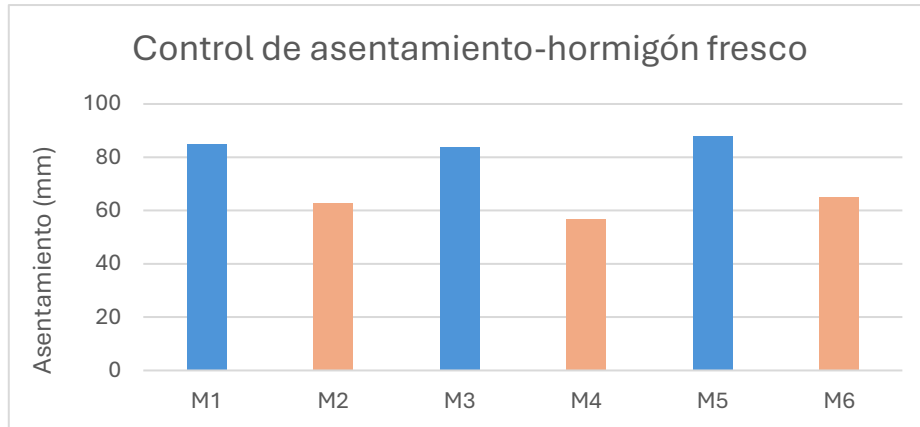
Para la determinación de la trabajabilidad del hormigón en estado fresco se realiza el ensayo de asentamiento o ensayo de cono de Abrams.

**Tabla 3.16 Resultados del Ensayo NTE INEN 1578- Control de asentamiento o slump test para las dosificaciones planteadas**

Mezcla	Descripción	Relación A/C	Asentamiento (mm)	Clasificación (EHE-08)
M1	0% Arcilla y 0% Fibra	0,58	8,5	Blanda
M2	0% Arcilla y 1% Fibra	0,58	6,3	Blanda
M3	30% Arcilla y 0% Fibra	0,58	8,4	Blanda
M4	30% Arcilla y 1% Fibra	0,58	5,7	Blanda
M5	40% Arcilla y 0% Fibra	0,58	8,8	Blanda
M6	40% Arcilla y 1% Fibra	0,58	6,5	Blanda

En los resultados obtenidos se puede evidenciar que todas las dosificaciones planteadas cumplen con el asentamiento de diseño establecido en los requerimientos técnicos, sin embargo, es evidente como la presencia de las fibras naturales presentan una pasta con menor trabajabilidad por su asentamiento obtenido; al contrario de la arcilla la misma que presentan un asentamiento similar al hormigón tradicional puesto que la arcilla tiene propiedades plásticas lo que facilita su moldeabilidad.

Las variaciones son relativamente mínimas en cuanto al control de asentamiento y siguiendo la clasificación emitida por el código español EHE-08 la docilidad del hormigón fresco en sus diferentes dosificaciones es considerada “blanda”, identificado en la Tabla 3.16, por lo que no presenta un impedimento su aplicación en obra.



**Figura 3.23 Comparación de asentamientos obtenidos**



**Figura 3.24 Control de asentamiento de las dosificaciones en estado fresco**

### 3.12. Tiempo de fraguado

El control de tiempo de fraguado se lo realiza únicamente para los reemplazos de cemento por el material cementante, arcilla calcinada, de esta manera en la Tabla 3.17 a la Tabla 3.19, se puede evidenciar los resultados obtenidos para los reemplazos parciales del 30 y 40%.

**Tabla 3.17 Resultados del Ensayo NTE INEN 158- Tiempo de fraguado para la mezcla de control**

<b>Norma Vigente</b>	NTE INEN 158	<b>Temperatura</b>	22 °C
<b>Muestra</b>	Cemento con 0% de sustitución parcial del cemento		
<b>Fecha de ensayo</b>	29/9/2025	<b>Hora de inicio</b>	9:00
<b>Hora de lectura</b>	<b>Tiempo Transcurrido (min)</b>	<b>Penetración desde la base (mm)</b>	<b>Observación</b>

9:30	30	7	Consistencia normal
9:45	45	11	-
10:00	60	16	-
10:15	75	21	Cerca al fraguado inicial
10:30	90	26	Pasado el fraguado inicial
10:45	105	30	-
11:00	120	33	-
11:15	135	35	-
11:30	150	37	-
11:45	165	38	-
12:00	180	no deja marca	<b>Fraguado final</b>
<b>Interpolación entre puntos (tiempo de fraguado inicial)</b>			
T1	75	Penetración 1	21
T2	90	Penetración 2	26
<b>Fraguado inicial (min)</b>		87,00	
<b>Parámetro</b>	<b>Resultados (min)</b>	<b>Requisitos NTE INEN (min)</b>	<b>Estado</b>
Tiempo de fraguado inicial	87	49	Cumple
Tiempo de fraguado final	180	312	Cumple

**Tabla 3.18 Resultados del Ensayo NTE INEN 158- Tiempo de fraguado para sustitución del 30% de cemento con arcilla calcinada**

<b>Norma Vigente</b>	NTE INEN 158	<b>Temperatura</b>	22 °C
<b>Muestra</b>	Cemento con 30% de sustitución parcial del cemento		
<b>Fecha de ensayo</b>	29/9/2025	<b>Hora de inicio</b>	9:21
<b>Hora de lectura</b>	<b>Tiempo Transcurrido (min)</b>	<b>Penetración desde la base (mm)</b>	<b>Observación</b>
9:51	30	7	Consistencia normal
10:06	45	11	-
10:21	60	20	Cerca al fraguado inicial
10:36	75	28,5	Pasado el fraguado inicial
10:51	90	38	-
11:06	105	39	-
11:21	120	39,5	-
11:36	135	39,5	-
11:51	150	no deja marca	<b>Fraguado final</b>
<b>Interpolación entre puntos (tiempo de fraguado inicial)</b>			
T1	60	Penetración 1	20
T2	75	Penetración 2	28,5
<b>Fraguado inicial (min)</b>		68,82	

Parámetro	Resultados (min)	Requisitos NTE INEN (min)	Estado
Tiempo de fraguado inicial	69	49	Cumple
Tiempo de fraguado final	150	312	Cumple

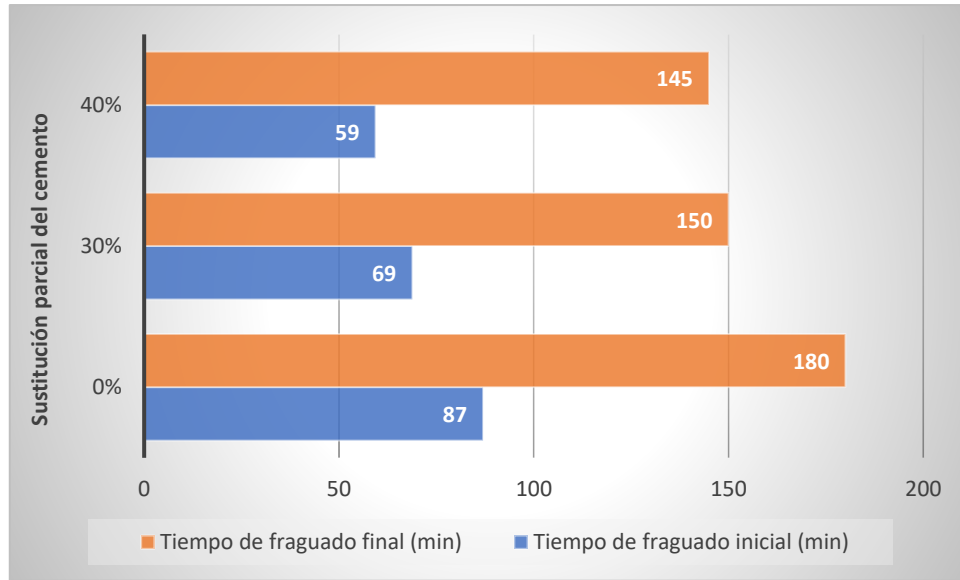
**Tabla 3.19 Resultados del Ensayo NTE INEN 158- Tiempo de fraguado para sustitución del 40% de cemento con arcilla calcinada**

<b>Norma Vigente</b>	NTE INEN 158	<b>Temperatura</b>	21 °C
<b>Muestra</b>	Cemento con 40% de sustitución parcial del cemento		
<b>Fecha de ensayo</b>	26/9/2025	<b>Hora de inicio</b>	12:25

Hora de lectura	Tiempo Transcurrido (min)	Penetración desde la base (mm)	Observación
12:55	30	7	Consistencia normal
13:22	57	23	Cerca al fraguado inicial
13:35	70	34	Pasado el fraguado inicial
13:52	87	39	-
14:06	101	39	-
14:20	115	39	-
14:36	131	39,5	-
14:50	145	No deja marca	<b>Fraguado final</b>

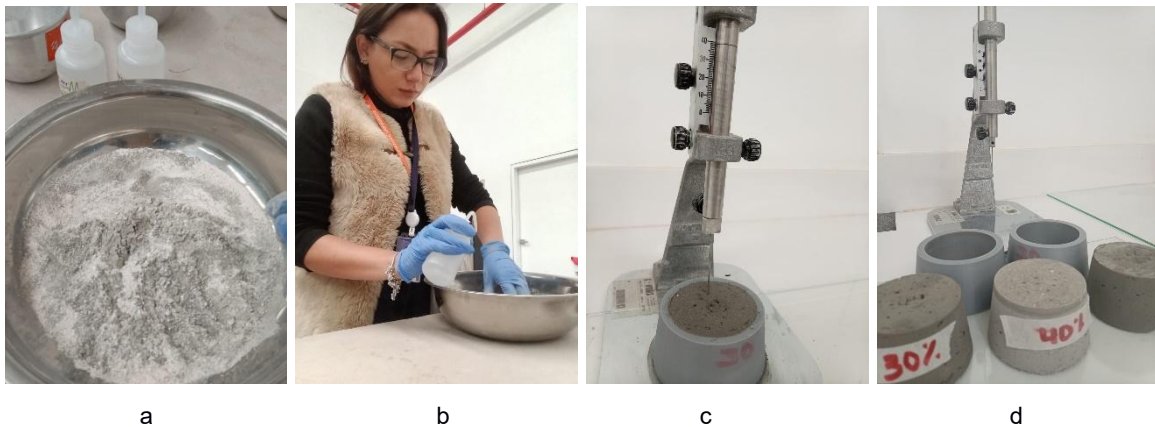
Interpolación entre puntos (tiempo de fraguado inicial)			
T1	57	Penetración 1	23
T2	70	Penetración 2	34
<b>Fraguado inicial (min)</b>	59,36		

Parámetro	Resultados (min)	Requisitos NTE INEN (min)	Estado
Tiempo de fraguado inicial	59	49	Cumple
Tiempo de fraguado final	145	312	Cumple



**Figura 3.25 Comparativa de resultados obtenidos del ensayo Vicat**

Obtenidos los tiempos de fraguado, aquellas muestras que poseen un reemplazo parcial del cemento alcanzan un fraguado inicial en menor tiempo que el cemento tradicional, de igual forma el fraguado final se alcanza en menores tiempos para aquellas que poseen arcilla calcinada, sin embargo, los resultados obtenidos se encuentran dentro de los parámetros aprobados por la normativa NTE INEN 518 para ser considerado como material cementante.





e

**Figura 3.26** Ensayo de tiempo de fraguado con el método de Vicat: (a) mezcla del reemplazo de arcilla con cemento, (b) adición de agua, (c) toma de medidas de penetración de aguja Vicat, (d) resultados obtenidos de las tres muestras, (e) identificación de penetración

### **3.13. Comportamiento mecánico de hormigón con reemplazo parcial de cemento por arcilla calcinada y fibra vegetal de la Amazonía**

Para evaluar el comportamiento mecánico de la arcilla calcinada definimos emplear 3 distintos porcentajes de reemplazo de cemento Portland por el material mencionado.

#### **3.13.1. Ensayo a compresión con reemplazo parcial de Cemento por Arcilla Calcinada y fibra vegetal de la Amazonía**

Para realizar los ensayos a compresión utilizando la arcilla calcinada previamente evaluada, definimos considerar 2 cantidades de reemplazo parcial. Se realizarán ensayos estandarizados a 7, 14 y 28 días, con una cantidad de 3 probetas por tiempo indicado, esto con los distintos porcentajes de reemplazo establecidos y cantidad de fibra definido. A continuación, se mostrará el detalle de la cantidad de probetas a ensayar en la Tabla 3.20:

**Tabla 3.20** Cantidad de probetas – Ensayo de Compresión

<b>Porcentaje de reemplazo con arcilla</b>	<b>Cantidad de fibra</b>	<b>7 días</b>	<b>14 días</b>	<b>28 días</b>
0%	0	3	3	3
	Fibra #1	3	3	3
30%	0	3	3	3

	Fibra #1	3	3	3
40%	0	3	3	3
	Fibra #1	3	3	3

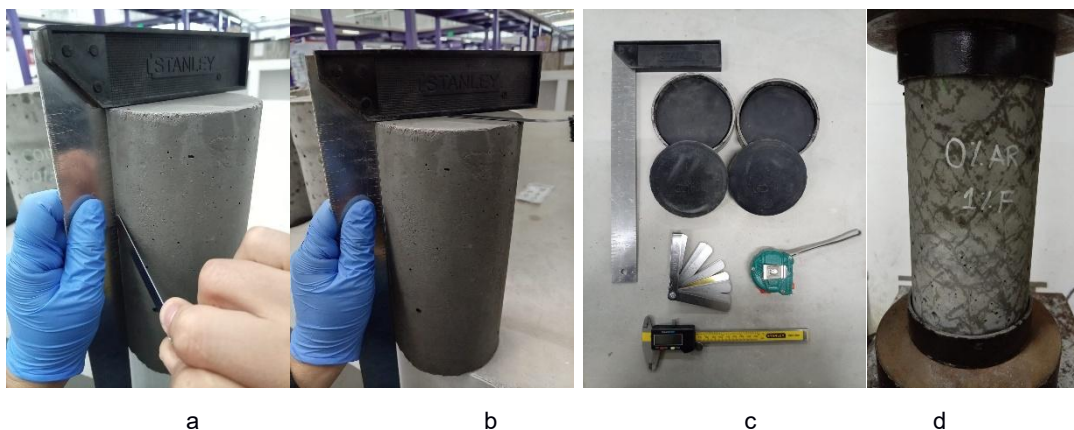
El total de probetas a ensayar es de 54 de las cuales obtendremos información del comportamiento mecánico de las distintas mezclas propuestas, con el reemplazo parcial de cemento por arcilla calcinada y la intervención de las fibras vegetales de la Amazonía.

### 3.13.2. Resultados de Resistencia a la compresión

Se obtuvieron los resultados del ensayo de compresión de cilindros a los 7, 14 y 28 días de las dosificaciones planteadas, debido a la complejidad de la elaboración de las probetas de hormigón las diferentes dosificaciones fueron realizadas en dos días de moldeado.

De esta manera el moldeado de cilindros, Anexo 4, de las dosificaciones de: Control, 30% Arcilla con 0% Fibra, 0% Arcilla con 1% Fibra fueron elaborados en la fecha de 22/09/2025 denominadas en la tabulación de resultados como “Primeras dosificaciones”. El moldeado de cilindros de las dosificaciones de: 30% Arcilla con 1% Fibra, 40% Arcilla con 0% Fibra, 40% Arcilla con 1%Fibra fueron elaborados en la fecha de 23/09/2025 denominadas en la tabulación de resultados como “Segundas dosificaciones”.

Una vez definido el proceso obtenido en la moldeada de cilindros de hormigón, a continuación, en la Tabla 3.21 a la Tabla 3.32 se presentan los resultados obtenidos, de igual manera en la Figura 3.27 se puede evidenciar los controles y resultados obtenidos:





**Figura 3.27 Ensayo de Compresión de Cilindros de hormigón: (a) control de perpendicularidad de la probeta, (b) control de planicidad de la probeta, (c) equipo usado para control de calidad, (d) probeta con fibra ensayada, (e) toma de medidas de diámetros, (f) resultados en la pantalla de la máquina, (g) estado de la probeta posterior al ensayo**

Siguiendo las recomendaciones indicadas en la norma NTE INEN 1573 para un correcto control de calidad de cada una de las probetas/muestras a ensayar, se adiciona un cuadro de observación donde se indica diferentes letras de etiquetado según el error de control identificado, las observaciones principales que se ven al inicio de la Tabla 3.21 a la Tabla 3.32 son denominaciones que se han tomado como criterio personal siguiendo las indicaciones de medidas que muestra la norma NTE INEN 1573 para observación de dicho control en la tabla de acompañamiento en la toma de resultados.

**Tabla 3.21 Informe de acompañamiento en la toma de datos del ensayo NTE INEN 1573 a los 7 días– Resistencia a la Compresión de cilindros de hormigón “Primeras dosificaciones”**

Observaciones: La letra "E" significa que el etiquetado es incorrecto/ausente en la cara del cilindro; la letra "R" indica una variación entre diámetros >2% (medidos en la parte media y perpendicularmente) no cumpliendo la tolerancia dimensional; la letra "A" indica que la altura no cumple la relación  $h/\phi = 2:1$

N° de probeta	Codificación de la muestra	f'c de diseño (kg/cm²)	Dimensiones (mm)		Área (mm²)	Edad de la muestra (días)	Temp. del Lab	Humedad relativa	Carga máxima (N)	Tipo de falla	Obsv.	Fecha y hora de ensayo
			Diámetro (mm)	Altura (mm)								
1	Control	210	103,36	220	8383,33	7	18 °C	73%	121600	3	-	29/09 a las 17h00
			103,27	220								
				220								
2	Control	210	104,14	210	8548,86	7	18 °C	73%	120500	3	-	29/09 a las 17h07
			104,52	220								
				210								

3	Control	210	103,53	220	8433,72	7	18 °C	73%	120700	2	-	29/09 a las 17h12
			103,72	220								
				210								
1	30% AR / 0% F	210	100,99	210	7963,53	7	18 °C	73%	67900	3	-	29/09 a las 17h27
			100,40	210								
				215								
2	30% AR / 0% F	210	101,58	210	8093,76	7	18 °C	73%	63900	2	-	29/09 a las 17h44
			101,45	220								
				220								
3	30% AR / 0% F	210	100,58	210	7973,82	7	18 °C	73%	65800	3	-	29/09 a las 17h46
			100,94	210								
				210								
1	0% AR / 1% F	210	104,50	215	8613,72	7	18 °C	73%	137100	5	-	29/09 a las 17h57
			104,95	220								
				220								
2	0% AR / 1% F	210	103,49	210	8488,33	7	18 °C	73%	129800	2	-	29/09 a las 18h03
			104,43	200								
				210								
3	0% AR / 1% F	210	104,01	200	8441,86	7	18 °C	73%	148400	3	-	29/09 a las 17h50
			103,34	210								
				200								

**Tabla 3.22 Informe de acompañamiento en la toma de datos del ensayo NTE INEN 1573 a los 7 días – Resistencia a la Compresión de cilindros de hormigón “Segundas dosificaciones”**

Observaciones: La letra "E" significa que el etiquetado es incorrecto/ausente en la cara del cilindro; la letra "R" indica una variación entre diámetros >2% (medidos en la parte media y perpendicularmente) no cumpliendo la tolerancia dimensional; la letra "A" indica que la altura no cumple la relación  $h/\phi = 2:1$

N° de probeta	Codificación de la muestra	f <sub>c</sub> de diseño (kg/cm <sup>2</sup> )	Dimensiones (mm)		Área (mm <sup>2</sup> )	Edad de la muestra (días)	Temp. del Lab	Humedad relativa	Carga máxima (N)	Tipo de falla	Obs v.	Fecha y hora de ensayo
			Diámetro (mm)	Altura (mm)								
1	30%AR /1% F	210	106,22	220	8866,41	7	16,50	56%	76400	3	-	30/09 a las 18h03
			106,28	230								
				225								
2	30%AR /1% F	210	106,45	230	8875,59	7	16,50	56%	92000	2	-	30/09 a las 18h11
			106,16	220								
				230								

3	30%AR / 1% F	210	105,54	220	8735,0 5	7	16,4 0	57%	73000	3	-	30/09 a las 18h1 6
			105,38	230								
				230								
1	40% AR / 0% F	210	105,78	220	8798,1 1	7	16,4 0	57%	54700	3	-	30/09 a las 18h2 3
			105,90	230								
				220								
2	40% AR / 0% F	210	106,53	230	8886,4 5	7	16,4 0	57%	56000	2	-	30/09 a las 18h2 7
			106,21	230								
				220								
3	40% AR / 0% F	210	105,34	210	8754,9 4	7	16,4 0	57%	55200	3	-	30/09 a las 17h0 0
			105,82	220								
				210								
1	40% AR / 1% F	210	102,60	200	8296,7 3	7	16,3 0	57%	33600	2	-	30/09 a las 18h3 3
			102,96	200								
				200								
2	40% AR / 1% F	210	106,29	220	8850,5 6	7	16,2 0	57%	37800	2	-	30/09 a las 18h3 9
			106,02	230								
				220								
3	40% AR / 1% F	210	102,62	210	8210,5 8	7	16,1 0	57%	35400	3	-	30/09 a las 18h4 5
			101,87	220								
				210								

**Tabla 3.23 Informe de acompañamiento en la toma de datos del ensayo NTE INEN 1573 a los 14 días– Resistencia a la Compresión de cilindros de hormigón “Primeras dosificaciones”**

Observaciones: La letra "E" significa que el etiquetado es incorrecto/ausente en la cara del cilindro; la letra "R" indica una variación entre diámetros >2% (medidos en la parte media y perpendicularmente) no cumpliendo la tolerancia dimensional; la letra "A" indica que la altura no cumple la relación  $h/\phi = 2:1$

N° de probeta	Codificación de la muestra	f <sub>c</sub> de diseño (kg/cm <sup>2</sup> )	Dimensiones (mm)		Área (mm <sup>2</sup> )	Edad de la muestra (días)	Temp. del Lab	Humedad relativa	Carga máxima (N)	Tipo de falla	Obs v.	Fecha y hora de ensayo
			Diámetro (mm)	Altura (mm)								
1	Control	210	107,04	201	9034,09	14	13,40	63%	178200	2	-	06/10 a las 11h2 5
			107,46	202								
				201								
2	Control	210	107,58	187	9104,14	14	13,60	65%	175900	3	-	06/10 a las 11h3 3
			107,75	186								
				186								

3	Control	210	107,05	201	9013,89	14	13,60	65%	171800	2	-	06/10 a las 11h41
			107,21	202								
				201								
1	30% AR / 0% F	210	99,27	202	7708,58	14	13,60	65%	91500	5	-	06/10 a las 11h53
			98,87	201								
				201								
2	30% AR / 0% F	210	102,12	201	8133,67	14	13,80	65%	89600	2	-	06/10 a las 12h01
			101,41	202								
				202								
3	30% AR / 0% F	210	101,28	201	8124,09	14	13,80	65%	90200	3	-	06/10 a las 12h05
			102,13	200								
				201								
1	0% AR / 1% F	210	106,43	201	8864,74	14	13,80	65%	174500	2	-	06/10 a las 12h08
			106,05	201								
				202								
2	0% AR / 1% F	210	106,10	203	8855,56	14	13,70	65%	180800	3	-	06/10 a las 12h25
			106,27	203								
				203								
3	0% AR / 1% F	210	106,08	201	8769,04	14	13,70	65%	181600	3	-	06/10 a las 12h38
			105,25	200								
				201								

**Tabla 3.24 Informe de acompañamiento en la toma de datos del ensayo NTE INEN 1573 a los 14 días – Resistencia a la Compresión de cilindros de hormigón “Segundas dosificaciones”**

Observaciones: La letra "E" significa que el etiquetado es incorrecto/ausente en la cara del cilindro; la letra "R" indica una variación entre diámetros >2% (medidos en la parte media y perpendicularmente) no cumpliendo la tolerancia dimensional; la letra "A" indica que la altura no cumple la relación  $h/\phi = 2:1$

N° de probeta	Codificación de la muestra	f'c de diseño (kg/cm <sup>2</sup> )	Dimensiones (mm)		Área (mm <sup>2</sup> )	Edad de la muestra (días)	Temp. del Lab	Humedad relativa	Carga máxima (N)	Tipo de falla	Obsv.	Fecha y hora de ensayo
			Diámetro (mm)	Altura (mm)								
1	30%AR /1% F	210	107,37	203	8917,39	14	13,60	68%	111800	3	-	07/10 a las 12h45
			105,74	202								
				202								
2	30%AR /1% F	210	105,17	202	8726,77	14	13,60	69%	119800	3	-	07/10 a las 12h48
			105,65	204								
				203								
3	30%AR /1% F	210	106,76	203	8813,91	14	13,60	69%	122200	3	-	

			105, 11	202								07/10 a las 12h56
				202								
1	40% AR / 0% F	210	104, 14	202	8608, 78	14	14,20	67%	75800	3	-	07/10 a las 13h15
			105, 25	201								
				200								
2	40% AR / 0% F	210	104, 81	201	8663, 14	14	14,20	66%	78900	3	-	07/10 a las 13h18
			105, 24	203								
				202								
3	40% AR / 0% F	210	107, 52	203	9018, 94	14	14,20	66%	83400	2	-	07/10 a las 13h21
			106, 80	201								
				201								
1	40% AR / 1% F	210	105, 56	201	8738, 36	14	14,20	66%	58800	3	-	07/10 a las 13h25
			105, 40	202								
				201								
2	40% AR / 1% F	210	104, 11	202	8561, 98	14	14,40	65%	54500	3	-	07/10 a las 13h40
			104, 71	201								
				200								
3	40% AR / 1% F	210	106, 75	203	8878, 93	14	14,40	65%	54000	3	-	07/10 a las 13h42
			105, 90	202								
				202								

**Tabla 3.25 Informe de acompañamiento en la toma de datos del ensayo NTE INEN 1573 a los 28 días– Resistencia a la Compresión de cilindros de hormigón “Primeras dosificaciones”**

Observaciones: La letra "E" significa que el etiquetado es incorrecto/ausente en la cara del cilindro; la letra "R" indica una variación entre diámetros >2% (medidos en la parte media y perpendicularmente) no cumpliendo la tolerancia dimensional; la letra "A" indica que la altura no cumple la relación  $h/\phi = 2:1$

N° de probeta	Codificación de la muestra	f'c de diseño (kg/cm <sup>2</sup> )	Dimensiones (mm)		Área (mm <sup>2</sup> )	Edad de la muestra (días)	Temp. del Lab	Humedad relativa	Carga máxima (N)	Tipo de falla	Obsv.	Fecha y hora de ensayo
1	Control	210	105, 44	204	8733, 39	28	16,90	57%	165600	3	-	20/10 a las 17h00
			105, 46	203								
				203								
2	Control	210	105, 12	203	8715, 18	28	16,80	57%	223900	5	-	20/10 a las 17h05
			105, 56	202								

				203								
3	Control	210	105,50	186	8768,21	28	16,80	56%	212700	5	-	20/10 a las 17h09
			105,82	187								
				186								
1	30% AR / 0% F	210	103,20	205	8302,38	28	16,80	57%	142400	2	-	20/10 a las 17h16
			102,43	204								
				204								
2	30% AR / 0% F	210	102,10	203	8164,87	28	16,50	56%	135900	2	-	20/10 a las 17h20
			101,82	204								
				203								
1	0% AR / 1% F	210	106,21	203	8819,74	28	16,00	56%	213500	3	-	20/10 a las 17h30
			105,73	205								
				204								
2	0% AR / 1% F	210	104,36	203	8657,37	28	16,00	57%	222400	3	-	20/10 a las 17h37
			105,62	204								
				204								

**Tabla 3.26 Informe de acompañamiento en la toma de datos del ensayo NTE INEN 1573 a los 28 días – Resistencia a la Compresión de cilindros de hormigón “Segundas dosificaciones”**

Observaciones: La letra "E" significa que el etiquetado es incorrecto/ausente en la cara del cilindro; la letra "R" indica una variación entre diámetros >2% (medidos en la parte media y perpendicularmente) no cumpliendo la tolerancia dimensional; la letra "A" indica que la altura no cumple la relación  $h/\phi = 2:1$

N° de probeta	Codificación de la muestra	f'c de diseño (kg/cm <sup>2</sup> )	Dimensiones (mm)		Área (mm <sup>2</sup> )	Edad de la muestra (días)	Temp. del Lab	Humedad relativa	Carga máxima (N)	Tipo de falla	Obsv	Fecha y hora de ensayo
1	30%AR / 1% F	210	106,38	204	8840,56	28	15,40	57%	138600	3	-	21/10 a las 15h25
			105,81	204								
				204								
2	30%AR / 1% F	210	105,63	203	8766,55	28	15,40	58%	175900	3	-	21/10 a las 15h32
			105,67	204								
				204								
1		210	106,53	202	8909,02	28	15,20	57%	133600	3	-	

	40% AR / 0% F		106, 48	202								21/10 a las 15h40
				203								
2	40% AR / 0% F	210	104, 51	202	8636, 76	28	15,10	58%	133600	3	-	21/10 a las 15h50
			105, 22	202								
				203								
1	40% AR / 1% F	210	104, 73	203	8718, 49	28	15,60	56%	96000	2	-	21/10 a las 16h12
			105, 99	202								
				203								
2	40% AR / 1% F	210	101, 96	202	8159, 27	28	15,60	56%	89400	3	-	21/10 a las 16h18
			101, 89	202								
				203								

**Tabla 3.27 Resultados del ensayo NTE INEN 1573 - Resistencia a la compresión a los 7 días (1eras dosificaciones)**

Temperatura:	18 °C
Humedad Relativa:	73%
Fecha de ensayo:	lunes, 29 de septiembre de 2025
Prueba realizada:	Compresión de Cilindros de hormigón
Norma de ensayo:	NTE INEN 1573

Codificación de la muestra	Edad de la muestra	Datos del espécimen		Área de sección transversal (mm <sup>2</sup> )	Carga máxima (kN)	Resistencia (MPa)	Tipo de fractura
		Diámetro (mm)	Altura (mm)				
Control	7 días	103,32	220	8383,33	121,6	14,50	3
Control	7 días	104,33	213	8548,86	120,5	14,10	3
Control	7 días	103,63	217	8433,72	120,7	14,31	2
30%Ar y 0% F	7 días	100,70	212	7963,53	67,9	8,53	3
30%Ar y 0% F	7 días	101,52	217	8093,76	63,9	7,89	2
30%Ar y 0% F	7 días	100,76	210	7973,82	65,8	8,25	3
0% Ar y 1% F	7 días	104,73	218	8613,72	137,1	15,92	5
0% Ar y 1% F	7 días	103,96	207	8488,33	129,8	15,29	2
0% Ar y 1% F	7 días	103,68	203	8441,86	148,4	17,58	3

**Tabla 3.28 Resultados del ensayo NTE INEN 1573 - Resistencia a la compresión a los 7 días (2das dosificaciones)**

Temperatura:	16 °C
--------------	-------

Humedad Relativa:	57%
Fecha de ensayo:	martes, 30 de septiembre de 2025
Prueba realizada:	Compresión de Cilindros de hormigón
Norma de ensayo:	NTE INEN 1573

Codificación de la muestra	Edad de la muestra	Datos del espécimen		Área de sección transversal (mm <sup>2</sup> )	Carga máxima (kN)	Resistencia (MPa)	Tipo de fractura
		Diámetro (mm)	Altura (mm)				
30%Ar /1% F	7 días	106,25	225	8866,41	76,4	8,62	3
30%Ar /1% F	7 días	106,31	227	8875,59	92	10,37	2
30%Ar /1% F	7 días	105,46	227	8735,05	73	8,36	3
40% Ar / 0% F	7 días	105,84	223	8798,11	54,7	6,22	3
40% Ar / 0% F	7 días	106,37	227	8886,45	56	6,30	2
40% Ar / 0% F	7 días	105,58	213	8754,94	55,2	6,31	3
40% Ar / 1% F	7 días	102,78	200	8296,73	33,6	4,05	2
40% Ar / 1% F	7 días	106,16	223	8850,56	37,8	4,27	2
40% Ar / 1% F	7 días	102,25	213	8210,58	35,4	4,31	3

**Tabla 3.29 Resultados del ensayo NTE INEN 1573 - Resistencia a la compresión a los 14 días (1eras dosificaciones)**

Temperatura:	13,67 °C
Humedad Relativa:	65%
Fecha de ensayo:	lunes, 06 de octubre de 2025
Prueba realizada:	Compresión de Cilindros de hormigón
Norma de ensayo:	NTE INEN 1573

Codificación de la muestra	Edad de la muestra	Datos del espécimen		Área de sección transversal (mm <sup>2</sup> )	Carga máxima (kN)	Resistencia (MPa)	Tipo de fractura
		Diámetro (mm)	Altura (mm)				
Control	14 días	107,25	201	9034,09	178,2	19,73	2
Control	14 días	107,67	186	9104,14	175,9	19,32	3
Control	14 días	107,13	201	9013,89	171,8	19,06	2
30%Ar y 0% F	14 días	99,07	201	7708,58	91,5	11,87	5
30%Ar y 0% F	14 días	101,77	202	8133,67	89,6	11,02	2
30%Ar y 0% F	14 días	101,71	201	8124,09	90,2	11,10	3
0% Ar y 1% F	14 días	106,24	201	8864,74	174,5	19,68	2
0% Ar y 1% F	14 días	106,19	203	8855,56	180,8	20,42	3
0% Ar y 1% F	14 días	105,67	201	8769,04	181,6	20,71	3

**Tabla 3.30 Resultados del ensayo NTE INEN 1573 - Resistencia a la compresión a los 14 días (2das dosificaciones)**

Temperatura:	14 °C
Humedad Relativa:	67%
Fecha de ensayo:	martes, 07 de octubre de 2025
Prueba realizada:	Compresión de Cilindros de hormigón
Norma de ensayo:	NTE INEN 1573

Codificación de la muestra	Edad de la muestra	Datos del espécimen		Área de sección transversal (mm <sup>2</sup> )	Carga máxima (kN)	Resistencia (MPa)	Tipo de fractura
		Diámetro (mm)	Altura (mm)				
30%AR /1% F	14 días	106,56	202	8917,39	111,8	12,54	3
30%AR /1% F	14 días	105,41	203	8726,77	119,8	13,73	3
30%AR /1% F	14 días	105,94	202	8813,91	122,2	13,86	3
40% AR / 0% F	14 días	104,70	201	8608,78	75,8	8,80	3
40% AR / 0% F	14 días	105,03	202	8663,14	78,9	9,11	3
40% AR / 0% F	14 días	107,16	202	9018,94	83,4	9,25	2
40% AR / 1% F	14 días	105,48	201	8738,36	58,8	6,73	3
40% AR / 1% F	14 días	104,41	201	8561,98	54,5	6,37	3
40% AR / 1% F	14 días	106,33	202	8878,93	54	6,08	3

**Tabla 3.31 Resultados del ensayo NTE INEN 1573 - Resistencia a la compresión a los 28 días (1eras dosificaciones)**

Temperatura:	16,54 °C
Humedad Relativa:	57%
Fecha de ensayo:	lunes, 20 de octubre de 2025
Prueba realizada:	Compresión de Cilindros de hormigón
Norma de ensayo:	NTE INEN 1573

Codificación de la muestra	Edad de la muestra	Datos del espécimen		Área de sección transversal (mm <sup>2</sup> )	Carga máxima (kN)	Resistencia (MPa)	Tipo de fractura
		Diámetro (mm)	Altura (mm)				
Control	28 días	105,45	203	8733,39	165,6	18,96	3
Control	28 días	105,34	203	8715,18	223,9	25,69	5
Control	28 días	105,62	198	8761,58	212,7	24,28	5
30%Ar y 0% F	28 días	102,82	204	8302,38	142,4	17,15	2
30%Ar y 0% F	28 días	101,96	203	8164,87	135,9	16,64	2
0% Ar y 1% F	28 días	105,97	204	8819,74	213,5	24,21	3
0% Ar y 1% F	28 días	104,99	204	8657,37	222,4	25,69	3

**Tabla 3.32 Resultados del ensayo NTE INEN 1573 - Resistencia a la compresión a los 28 días (2das dosificaciones)**

Temperatura:	15 °C
Humedad Relativa:	57%
Fecha de ensayo:	martes, 21 de octubre de 2025
Prueba realizada:	Compresión de Cilindros de hormigón
Norma de ensayo:	NTE INEN 1573

Codificación de la muestra	Edad de la muestra	Datos del espécimen		Área de sección transversal (mm <sup>2</sup> )	Carga máxima (kN)	Resistencia (MPa)	Tipo de fractura
		Diámetro (mm)	Altura (mm)				
30%AR /1% F	28 días	106,10	204	8840,56	138,6	15,68	3
30%AR /1% F	28 días	105,65	204	8766,55	175,9	20,06	3
40% AR / 0% F	28 días	106,51	202	8909,02	133,6	15,00	3
40% AR / 0% F	28 días	104,87	202	8636,76	133,6	15,47	3
40% AR / 1% F	28 días	105,36	203	8718,49	96	11,01	2
40% AR / 1% F	28 días	101,93	202	8159,27	89,4	10,96	3

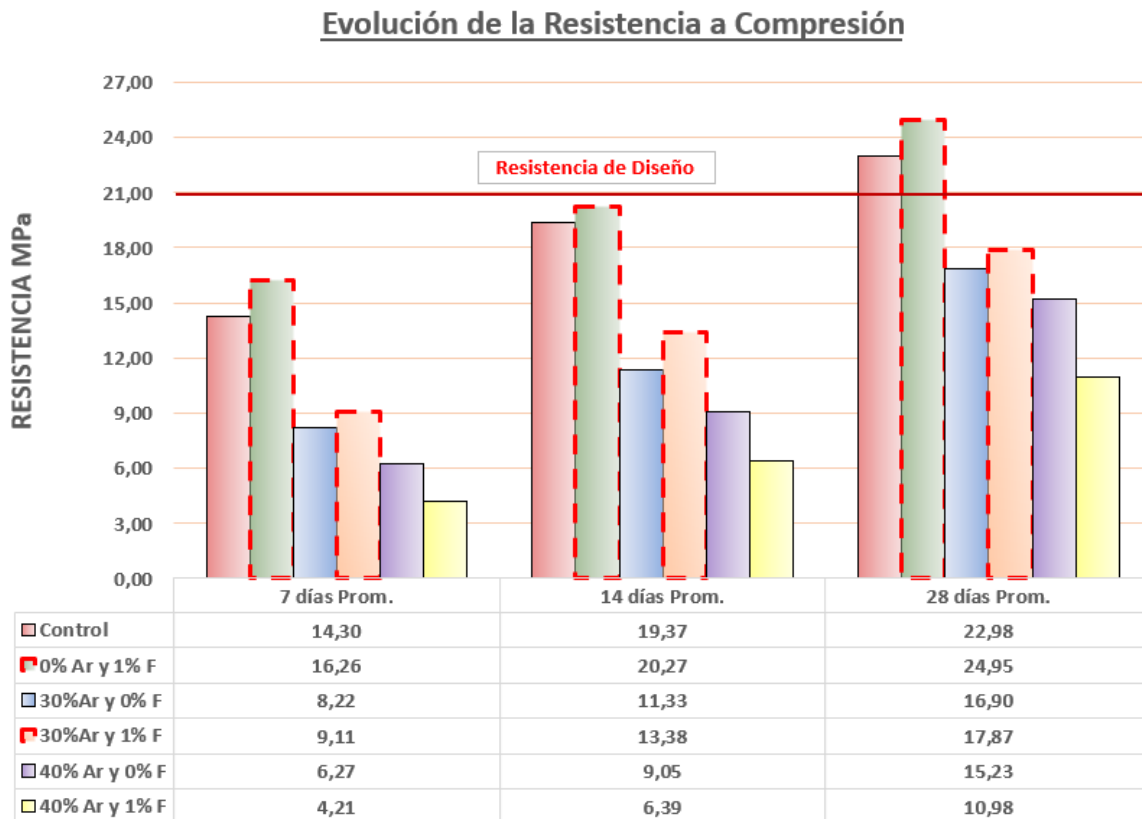
Obtenidos los resultados de compresión de cilindros de hormigón de cada una de las dosificaciones, en la Tabla 3.33 se presenta un resumen de los resultados obtenidos con sus resistencias promedios para una mejor comprensión de la obtención de resultados.

**Tabla 3.33 Resistencia a la compresión de las dosificaciones propuestas a los 7, 14, 28 días**

N° Mezcla	Dosificación	7 días	7 días Prom.	14 días	14 días Prom.	28 días	28 días Prom.
1	Control	14,50	14,30	19,73	19,37	18,96	22,98
		14,10		19,32		25,69	
		14,31		19,06		24,28	
2	0% Ar y 1% F	15,92	16,26	19,68	20,27	24,21	24,95
		15,29		20,42		25,69	
		17,58		20,71			
3	30%Ar y 0% F	8,53	8,22	11,87	11,33	17,15	16,90
		7,89		11,02		16,64	
		8,25		11,10			
4	30%Ar y 1% F	8,62	9,11	12,54	13,38	15,68	17,87
		10,37		13,73		20,06	
		8,36		13,86			
5	40% Ar y 0% F	6,22	6,27	8,80	9,05	15,00	15,23

		6,30		9,11		15,47	
		6,31		9,25			
6	40% Ar y 1% F	4,05	4,21	6,73	6,39	11,01	10,98
		4,27		6,37		10,96	
		4,31		6,08			

Para una mejor visualización de cómo influye los porcentajes de reemplazo, en la Figura 3.28 se evidencia las dosificaciones que más cercanas se encuentran a cumplir con la resistencia de diseño sin embargo se puede denotar que a mayor reemplazo de cemento las resistencias bajan asimismo el uso de fibras ayuda al incrementar la resistencia a compresión del hormigón.

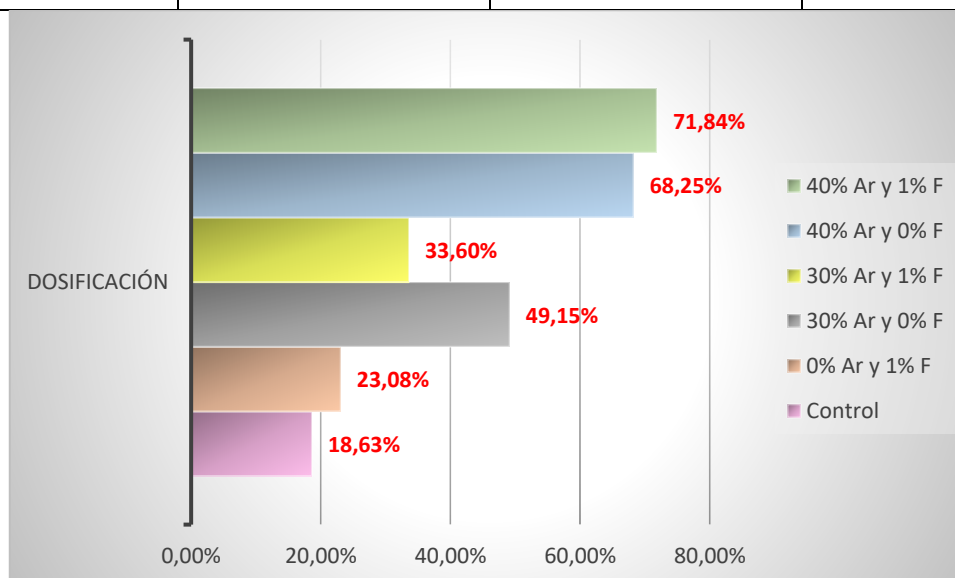


**Figura 3.28 Resumen comparativo de las resistencias a compresión obtenidas a los 7,14,28 días por dosificación**

Sin embargo, aunque vemos que no se llega a cumplir con la resistencia de diseño con las dosificaciones propuestas, podemos evidenciar un incremento de resistencia significativo entre las edades del hormigón son sus respectivos reemplazos de arcilla y adición de fibras naturales. En la Tabla 3.34 se puede evidenciar lo mencionado:

**Tabla 3.34 Obtención del porcentaje de aumento de resistencia entre los 14 y 27 días de edad del hormigón**

Dosificación	Resistencia 14 días (MPa)	Resistencia 28 días (MPa)	Aumento
Control	19,37	22,98	18,63 %
0% Ar y 1% F	20,27	24,95	23,08 %
30% Ar y 0% F	11,33	16,90	49,15 %
30% Ar y 1% F	13,38	17,87	33,60 %
40% Ar y 0% F	9,05	15,23	68,25 %
40% Ar y 1% F	6,39	10,98	71,84 %



**Figura 3.29 Porcentaje de aumento en comparación de las diferentes dosificaciones propuestas**

Como se identifica en la Figura 3.29 dentro de un análisis del porcentaje de aumento correspondiente a la resistencia obtenida en las diferentes dosificaciones en las edades de 14 y 28 días se puede observar que a pesar de que las muestras que presentan un reemplazo parcial del cemento por arcilla indican una resistencia a compresión inferior a la dosificación de control; éstas muestran una ganancia porcentual significativamente superior durante el periodo de curado. Esto indica que existe una activación de la arcilla dentro de la mezcla de manera tardía lo que conlleva a desarrollar su resistencia final en una mayor edad a comparación a una dosificación de hormigón con parámetros de diseño normal o tradicionales.

### **3.13.3. Ensayo a flexión con reemplazo parcial de Cemento por Arcilla Calcinada y fibra vegetal de la Amazonía**

Para realizar los ensayos a flexión utilizando la arcilla calcinada previamente evaluada, definimos considerar 2 cantidades de reemplazo parcial. Se realizarán ensayos estandarizados a los 28 días, con una cantidad de 2 probetas por tiempo indicado, esto con los distintos porcentajes de reemplazo establecidos y cantidad de fibra definido. A continuación, se mostrará en la Tabla 3.35 el detalle de la cantidad de probetas a ensayar:

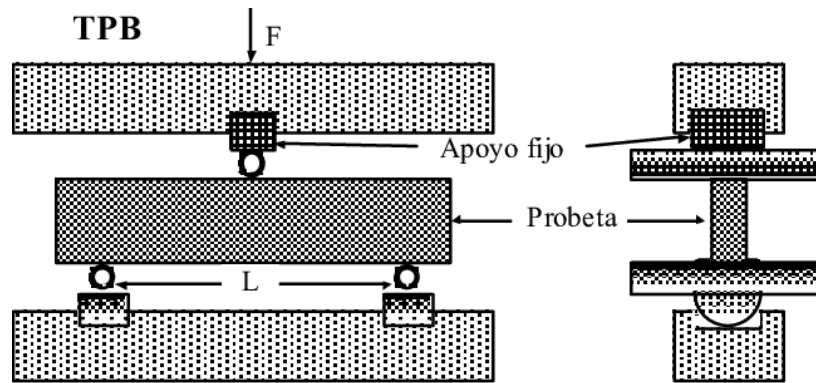
**Tabla 3.35 Cantidad de probetas – Ensayo de Flexión**

<b>Porcentaje de arcilla</b>	<b>Cantidad de fibra</b>	<b>28 días</b>
0%	0	2
	Fibra 1%	2
30%	0	2
	Fibra 1%	2
40%	0	2
	Fibra 1%	2

El total de probetas a ensayar es de 12 de las cuales obtendremos información del comportamiento mecánico de las fibras vegetales de la Amazonía en el hormigón de las distintas mezclas propuestas.

#### **3.13.3.1. Parámetros de ensayo a flexión en 3 puntos**

Este ensayo tuvo como objetivo el determinar la resistencia a la flexión en vigas de hormigón con reemplazo parcial de cemento por arcillas calcinadas, con refuerzo de fibras naturales de la Amazonía. Son vigas estandarizadas de dimensiones 150x150x500mm de longitud, este ensayo radica en someter a la viga a una carga constante puntual ubicada en el centro de la luz.



**Figura 3.30 Esquema de la aplicación de la carga para el módulo de rotura (Presas, Pastor, Sepúlveda, & Llorca, 1995)**

Fuente: *Comportamiento mecánico de materiales compuestos biomorficos SiC/C en función de la temperatura*. Universidad Politécnica de Madrid.

### **3.13.3.2. Cálculo del módulo de rotura**

Lo que mencionamos como módulo de rotura  $f_r$ , no es más que la tensión en la cara externa en el instante de la falla de la viga prismática al someterse a flexión. Se lo reconoce como indicador indirecto de la resistencia a la tracción del hormigón. La norma aplicada para este ensayo fue ASTM C293 – AASHTO T117

Norma conocida por su nombre “Método de ensayo para la resistencia a flexión del concreto (viga simple con carga central)”, la cual consistió en someter a la viga simplemente apoyada a una carga central.

El cálculo de este módulo se da con la siguiente fórmula, con base a la carga registrada en el ensayo.

$$f_r = \frac{3 P L}{2 b d^2}$$

#### **Ecuación 6: Módulo de rotura con carga central**

Donde:

P= Carga de rotura en kN

L= luz en mm

b, d= ancho y altura en mm

Para el presente caso de investigación la falla presentó las siguientes características por el cual se definiría que tuvo una “falla flexional”:

- La rotura ocurrió dentro del tercio central de la viga, lejos d ellos apoyos.

- El recorrido de la grieta no tuvo ningún patrón diagonal, induciendo a ser cortante.
- La carga estuvo centrada y alineada, acorde al procedimiento estándar.



a



b

c

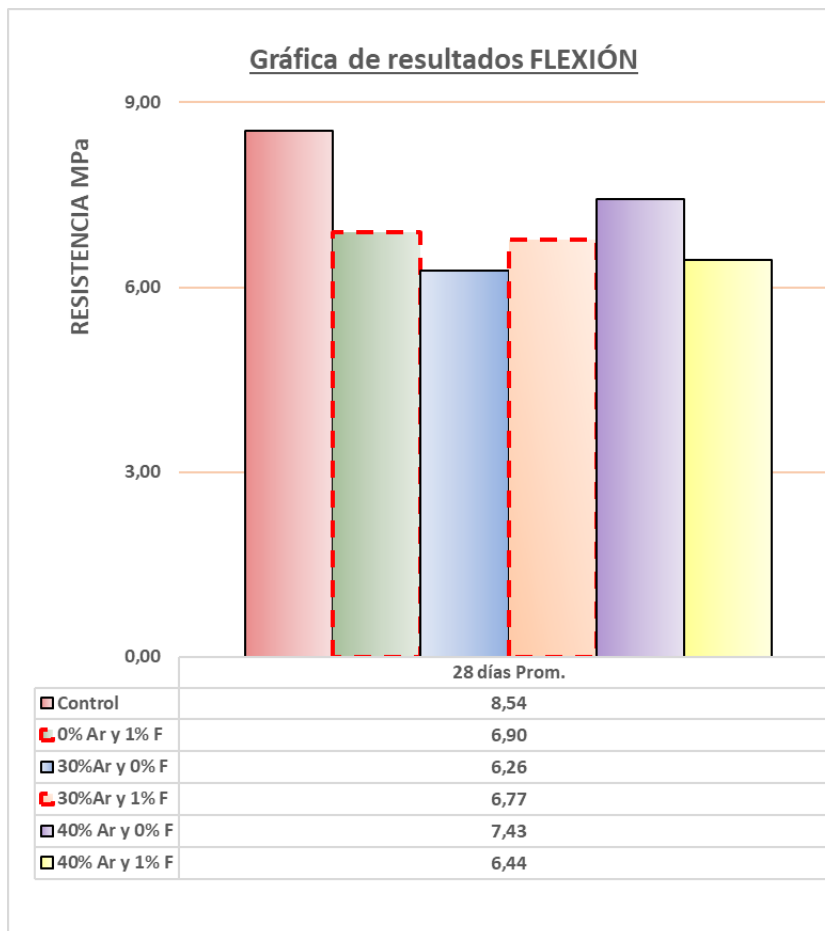
**Figura 3.31 (a) Ensayo de viga con la aplicación de la carga en el centro, (b) Viga posterior al ensayo, grieta ubicada en el centro, (c) Vista transversal de la viga post aplicación de carga**

### **3.13.3.3. Resultados de ensayo a Flexión**

Posterior a la realización de los ensayos a flexión a las vigas previamente mencionadas con las distintas dosificaciones, se procede a obtener los datos, tabularlos y calcular la resistencia a la flexión. Se pueden corroborar los resultados en la Tabla 3.36

**Tabla 3.36 Resistencia a la Flexión de las dosificaciones propuestas a los 28 días**

N° Mezcla	Dosificación	Carga de rotura kN	Resistencia a la flexión MPa	Resistencia a la flexión MPa Prom.
1	Control	38,77	8,62	8,54
		38,10	8,47	
2	0% Ar y 1% F	33,60	7,47	6,90
		28,49	6,33	
3	30%Ar y 0% F	31,15	6,92	6,26
		25,23	5,61	
4	30%Ar y 1% F	29,65	6,59	6,77
		31,29	6,95	
5	40% Ar y 0% F	33,51	7,45	7,43
		33,39	7,42	
6	40% Ar y 1% F	26,58	5,91	6,44
		31,39	6,98	

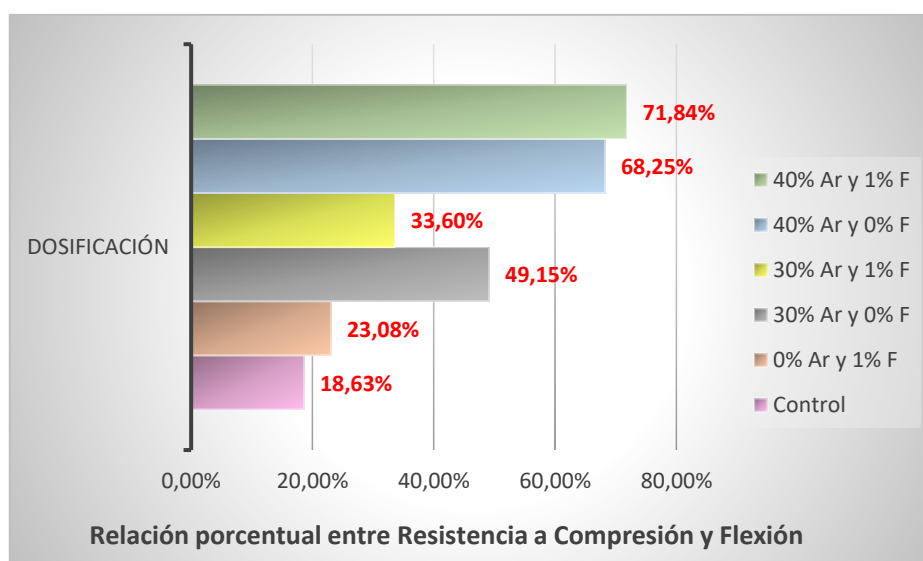


**Figura 3.32 Resumen comparativo de las resistencias a flexión obtenidas a los 28 días por dosificación**

Revisando los resultados en la gráfica de barras mostrados en la Figura 3.32, se evidencia que el comportamiento a flexión de la dosificación de Control es mayor en comparación a las otras dosificaciones las cuales presentan reemplazo parcial de cemento por la arcilla calcinada evaluada durante el proyecto, sin embargo, al realizar una relación porcentual con la resistencia a la compresión que se obtuvo a los 28 días mostrado en la Tabla 3.37 y en la gráfica de barras de la Figura 3.33, las dosificaciones con presencia de arcilla calcinada presentan un porcentaje elevado en comparación al hormigón convencional denominado "Control"

**Tabla 3.37 Tabla de relación porcentual entre Compresión y Flexión**

Dosificación	Resistencia Compresión 28 días (MPa)	Resistencia Flexión 28 días (MPa)	Aumento
Control	23,00	8,54	37%
0% Ar y 1% F	25,00	6,90	28%
30% Ar y 0% F	16,90	6,26	37%
30% Ar y 1% F	17,87	6,77	38%
40% Ar y 0% F	15,23	7,43	49%
40% Ar y 1% F	10,98	6,44	59%



**Figura 3.33 Relación porcentual entre la Resistencia a la Compresión y Flexión.**

## **CAPÍTULO 4**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES DEL PROYECTO**

El desarrollo del proyecto investigativo permitió validar el potencial técnico y medio ambiental de los materiales de origen natural que se encuentran en nuestra Amazonía, los cuales tienen una gran factibilidad de obtención y disponibilidad para la elaboración de hormigones sostenibles. La arcilla calcinada obtenida a partir de recursos minerales abundantes y las fibras naturales amazónicas, representan alternativas de fácil acceso, bajo costo y mínima producción de huella de carbono al medio ambiente, esto frente a la gran magnitud de uso de cemento Portland y refuerzos sintéticos.

#### **4.1. Conclusiones**

El uso de arcillas naturales para ser sometidas a calcinación depende del porcentaje de caolinita que ésta posea, siendo importante que la muestra a considerar para la dosificación presente al menos un 40% de caolinita, la cual al ser sometida a altas

temperaturas durante el proceso de calcinación se transformará a metacaolín, un alto porcentaje de caolinita asegura la formación de metacaolin durante la calcinación de la muestra, lo que brinda las propiedades puzolánicas necesarias para usarlo como material suplementario.

Una arcilla en estado natural con un color característico blanco sugiere indicar la presencia de caolinita en su composición, no obstante, la confirmación de este estado mineralógico solo es posible mediante el análisis de su composición química como el ensayo de DRX para asegurar su contenido puesto que la presencia de otros minerales como el yeso puede influir en el desempeño y las propiedades finales del material.

Se consideró el uso de 30 a 40% de reemplazo parcial del cemento por arcillas calcinadas debido a que los resultados obtenidos en el DRX de la muestra de arcilla calcinada del punto 1 de extracción "M.Puyo 1" indican un alto contenido de material amorfo, lo que significa que la mayor parte de la caolinita presente en la arcilla natural (59.4%) se transformó en un metacaolin de características amorfas por la presencia de 2.1% de caolinita luego de la calcinación y un 90.4% de compuesto amorfo lo que hace aplicable altos reemplazos en la dosificación.

Un hormigón que presenta el uso de fibras naturales y un alto contenido de arcilla indican una menor trabajabilidad al momento de realizar la mezcla, sin embargo, con el uso de maquinaria esto no representa un problema si se realiza un adecuado orden de mezclado de los materiales a usar.

La presencia de arcilla en la dosificación indica un menor tiempo de fraguado a comparación con el cemento portland, esto se debe a las propiedades puzolánicas que presenta el metacaolin. Este material acelera las reacciones químicas y a su vez consume los productos de hidratación que normalmente retardan este proceso de fraguado.

La combinación del 30 % de arcilla calcinada como reemplazo parcial del cemento Portland y el 1 % de fibra natural evidenció un comportamiento mecánico prometedor, estos resultados sugieren que incluso con porcentajes relativamente elevados de

sustitución, es posible mantener buenas prestaciones estructurales, destacando así la sinergia efectiva entre el material puzolánico y el refuerzo fibroso.

A pesar de que los porcentajes elevados de reemplazo de cemento por arcilla calcinada no alcanzaron valores óptimos de resistencia a compresión a los 28 días en comparación con el hormigón convencional, se observó una tendencia positiva en la evolución mecánica, las mezclas con alto contenido de arcilla calcinada presentaron un mayor incremento relativo de resistencia entre los 14 y 28 días de curado. Este comportamiento indica que el desarrollo de resistencia es más progresivo, posiblemente asociado a una hidratación secundaria más activa y a una mayor participación de las reacciones puzolánicas en etapas posteriores del curado.

Los resultados experimentales demuestran que la incorporación de arcilla calcinada como sustituto parcial del cemento genera una ligera reducción en la resistencia máxima a la flexión, respecto al hormigón control sin adiciones. Esta tendencia es coherente con el comportamiento típico de los cementos compuestos con materiales puzolánicos, en los que parte del clinker se reemplaza por un componente con menor reactividad inicial.

Desde el punto de vista microestructural, la arcilla calcinada actúa como material puzolánico, estas reacciones mejoran la densificación de la matriz y la durabilidad a largo plazo, aunque a edades tempranas pueden reducir la resistencia mecánica inicial debido a la menor cantidad de fases hidráulicas primarias disponibles.

En función de los resultados obtenidos, la ligera disminución en la resistencia a compresión observada en las mezclas con arcilla calcinada no representa una pérdida de desempeño estructural, sino que responde a una variación en la cinética de ganancia de resistencia, asociada al comportamiento progresivo de las reacciones puzolánicas que, con el avance del curado, contribuyen a la densificación de la matriz cementante mediante el refinamiento de la estructura porosa, lo cual favorece la cohesión interna del hormigón y potencia su durabilidad a largo plazo.

El impacto del uso de fibras naturales para mejorar la ductilidad y resistencia post fisuración del hormigón no se logró determinar mediante ensayos de laboratorio debido

a diferentes limitaciones dentro del aspecto logístico de las probetas a ensayar; debido a la carencia de un laboratorio que brinde el servicio de ensayos de flexo tracción y tracción directa dentro de las zonas 3, 5 y 8 del Ecuador (Guayaquil y Ambato donde se desarrolló la investigación) sumado a la dificultad del transporte de las probetas a diferentes ciudades generó un impedimento de obtener mejores datos para este análisis; de esta manera se evidenció una gran barrera que enfrenta el área de investigación de nuevos materiales el mismo que presenta un acceso limitado a una infraestructura especializada para análisis específicos de calidad resaltando la necesidad de desarrollar nuevas metodologías adaptadas a las condiciones que presenta nuestra región para futuros casos de estudio.

#### **4.2. Recomendaciones**

Es indispensable continuar con la caracterización mecánica de las muestras que presentan un alto porcentaje de reemplazo del cemento con arcilla calcinada para de esta manera poder determinar la edad en la que éstas muestras llegan a desarrollar o mejorar la resistencia de diseño a comparación con un hormigón tradicional, de esta manera obtendremos una evolución del hormigón sostenible que puede ser aplicado en futuras investigaciones.

Un análisis químico de la muestra calcinada de arcilla que abarque más allá de un DRX, es decir, realizar un ensayo de Espectroscopía Infrarroja por Transformada de Fourier “FTIR”, Resonancia Magnética Nuclear “NMR”, Análisis Termogravimétrico “TGA”, Microscopía Electrónica de Barrido “SEM”, puesto que estos análisis permiten ver el cambio físico y morfológico de la arcilla calcinada a comparación con la arcilla natural.

Se deben optimizar los parámetros de tiempo y temperatura de calcinación con la finalidad de maximizar la transformación de la caolinita en fases amorfas reactivas. La presencia residual de aproximadamente 2,1 % de caolinita en la muestra calcinada sugiere que las condiciones térmicas actuales (750 °C por 2 horas) no fueron completamente eficaces, por lo que se propone evaluar tiempos de exposición más prolongados o un ligero incremento en la temperatura para mejorar la eficiencia del proceso y potenciar la reactividad puzolánica del material resultante.

Evaluar las propiedades de transporte del hormigón, como la permeabilidad, la absorción capilar, la resistencia a la penetración de iones cloruro y la carbonatación, esto determinará cómo la sustitución parcial del cemento por arcilla calcinada impacta la protección de la armadura de refuerzo contra la corrosión.

## BIBLIOGRAFÍA

- ASTM International. . (2019). *ASTM C293/C293M – Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Center-Point Loading)*.
- MIDUVI. (2015). *Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC-SE-HM: Estructuras de Hormigón Armado*. Quito, Ecuador.
- Abizanda Buisán, A. (2023). *Análisis del comportamiento cerámico de arcillas carbonatadas y alumínicas: Variaciones composicionales y en las propiedades físicas con la temperatura de calcinación*. Retrieved from <https://zaguan.unizar.es/record/134432/files/TAZ-TFG-2023-3745.pdf>
- Alani, A. H. (2025). *Mechanical properties of novel green high-strength fly ash concrete incorporating hemp fibers*. Retrieved from Journal of Building Engineering: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2025.113500>
- Andrew, R. M. (2018). *Global CO2 emissions from cement production*. Retrieved from Earth System Science Data: <https://doi.org/10.5194/essd-10-195-2018>
- Anteneh, G. P. (2021). *Treatment of Natural Fiber for Application in Concrete Pavement*. Retrieved from Advances in Civil Engineering: <https://doi.org/https://doi.org/10.1155/2021/6667965>
- ASTM International. (2019). *ASTM C78/C78M – Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)*. West Conshohocken.
- Badogiannis, E. K. (2005). *Metakaolin as supplementary cementitious material*. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s10973-005-0806-3>
- Balcázar, C. (2020). *Caracterización de fibras de Aphandra Natalia para refuerzo de morteros cementicios de edificación*. Retrieved from [Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid]: [https://oa.upm.es/66751/1/CRISTIAN\\_BALCAZAR\\_ARCINIEGA\\_1.pdf](https://oa.upm.es/66751/1/CRISTIAN_BALCAZAR_ARCINIEGA_1.pdf)

- Batista, R. D. (2022, Diciembre). *Environmental performance of a cement composite reinforced with vegetable fibers. Case Studies in Construction Materials*. Retrieved from ELSEVIER: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2772801322000306>
- Bediako, M. A. (2025). *Incorporation of natural coconut fibers in concrete for sustainable construction: Mechanical and durability behavior*. Retrieved from Case Studies in Construction Materials: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e04867>
- Cao, Y. W. (2021). *Recent progress of utilization of activated kaolinitic clay in cementitious construction materials*. Retrieved from In Composites Part B: Engineering: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.108636>
- Cepeda Torres, A. A. (2023). *Caracterización mecánica y durabilidad de cementos sostenibles con adición de caliza, arcilla calcinada y metacaolín*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid. Retrieved from [https://oa.upm.es/81340/1/TFM\\_Ana\\_Alexandra\\_Cepeda\\_Torres.pdf](https://oa.upm.es/81340/1/TFM_Ana_Alexandra_Cepeda_Torres.pdf)
- Christófolli, J. L. (2025). *Use of high-energy milling for reducing CO2 emissions in quaternary blends of Portland cement*. Retrieved from Construction and Building Materials: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.139470>
- Córdoba, G. C. (2017). *Caracterización física de arcillas calcinadas para su empleo como material cementicio suplementario en hormigones*. Retrieved from ResearchGate: [https://www.researchgate.net/publication/334770446\\_Caracterizacion\\_fisica\\_de\\_arcillas\\_calcinadas\\_para\\_su\\_empleo\\_como\\_material\\_cementicio\\_suplementario\\_en\\_hormigones](https://www.researchgate.net/publication/334770446_Caracterizacion_fisica_de_arcillas_calcinadas_para_su_empleo_como_material_cementicio_suplementario_en_hormigones)
- G. Cordeiro, T. A. (2016). Influencia de la adición de fibras de carbono sobre las propiedades del hormigón de alto desempeño.
- González Esteban, L. (2021). *Estudio para la reducción del impacto medioambiental y la huella de carbono ocasionada en la producción del clínker*. Retrieved from <https://oa.upm.es/68795/>
- He, Z. S. (2020). *Effect of wollastonite microfibers as cement replacement on the properties of cementitious composites: A review. Construction and Building Materials*. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119920>
- Henrik, P. (1996). *Production and harvest of fibers from *Aphandra natalia* (Palmae) in Ecuador*. Retrieved from Forest Ecology and Management: [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0378-1127\(95\)03632-6](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0378-1127(95)03632-6)

- Hosen, K. &. (2025). *Limestone calcined clay cement (LC3): A review of materials, properties, production and environmental impact*. Retrieved from Journal of Building Engineering: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2025.113672>
- INEN. (2018). *NTE INEN 1574: Hormigón – Método de ensayo de resistencia a la flexión de probetas prismáticas*. Quito, Ecuador.
- Jaskulski, R., Józwiak-Niedźwiedzka, D., & Yakymchko, Y. (2020). Calcined clay as supplementary cementitious material. In *Materials*. (Vol. 13, Issue 21, pp. 1–36). MDPI AG. Retrieved from <https://doi.org/10.3390/ma13214734>
- Landa Gómez, A. E. (2022). *Materiales cementantes suplementarios como alternativa para la disminución del fenómeno de corrosión en estructuras de hormigón reforzado*. Retrieved from Nova Scientia: <https://doi.org/10.21640/ns.v14i29.3027>
- Madlool, N. A. (2011). A critical review on energy use and savings in the cement industries. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Massoumi, B. E. (2025). *A comprehensive analysis of process-related CO2 emissions from Iran's cement industry*. Retrieved from Cleaner Environmental Systems: <https://doi.org/10.1016/j.cesys.2024.100251>
- Mohamad, N. M. (2022). *Environmental impact of cement production and Solutions: .* Retrieved from A review. Materialstoday: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.212>
- Mousavi, S. S.-P. (2021). *Clay as a Sustainable Binder for Concrete—A Review*. In *Construction Materials*. Retrieved from Multidisciplinary Digital Publishing Institute : <https://doi.org/10.3390/constrmater1030010>
- Presas, M., Pastor, J. Y., Sepúlveda, R., & Llorca, J. (1995, abril 1). *ResearchGate*. Retrieved from [https://www.researchgate.net/publication/237676829\\_COMPORTAMIENTO\\_MECANICO\\_DE\\_MATERIALES\\_COMPUESTOS\\_BIOMORFICOS\\_SiCC\\_EN\\_FUNCION\\_DE\\_LA\\_TEMPERATURA](https://www.researchgate.net/publication/237676829_COMPORTAMIENTO_MECANICO_DE_MATERIALES_COMPUESTOS_BIOMORFICOS_SiCC_EN_FUNCION_DE_LA_TEMPERATURA)
- Raghav, M. P.-M.-Y.-S. (2021). *Review of the effects of supplementary cementitious materials and chemical additives on the physical, mechanical and durability properties of hydraulic concrete*. Retrieved from <https://doi.org/10.3390/ma14237270>

- Reddy, S. S. (2021). *LIME CALCINED CLAY CEMENT (LC3): A Review*. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Retrieved from <https://doi.org/10.1088/1755-1315/796/1/012037>
- Ridier, J. &. (2024). *Bloques ecológicos amazónicos: mejora con fibra de Aphandra natalia y aceite de chonta de San Juan de Muyuna*.
- Scrivener, K. L. (2018). *Sustainable cementitious materials*. *Nature Materials*. Retrieved from <https://doi.org/10.1038/s41563-018-0117-0>
- Sui, H. Z. (2023). *Limestone calcined clay cement (LC<sup>3</sup>): Mechanical properties, crystallography, and microstructure development*. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*. Clayton.
- Tolga, M. (2022). *Investigation of mechanical properties of red pine needle fiber reinforced self-compacting ultra high performance concrete*. . Retrieved from *Case Studies in Construction Materials*: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00970>
- Ventures, C. (2025, 02 27). *Cemex Ventures*. Retrieved from *Cemex Ventures*: <https://www.cemexventures.com/es/hormigon-sostenible/>
- Yan, J. Y. (2025). *Effect of modified jute fibre on mechanical and microstructural properties of recycled aggregate concrete*. Retrieved from *Construction and Building Materials*: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.143008>
- Zaid, O. A.-D. (2025). *Optimizing natural fiber content and types for enhanced strength and long-term durability in high-performance concrete*. . Retrieved from *Cleaner Engineering and Technology*: <https://doi.org/10.1016/j.clet.2025.100983>
- Zunino, F. B.-C. (2020). *The impact of calcite impurities in clays containing kaolinite on their reactivity in cement after calcination*. . Retrieved from *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*: <https://doi.org/10.1617/s11527-020-01478-9>

## ANEXOS

### Anexo 1 Resultados de Ensayos de Densidad de las fibras de de Aphandra Natalia; (Balcázar, 2020)

Tabla 11. Densidad de las fibras piassaba de *Aphandra natalia* a temperatura ambiente (contenido de humedad de las fibras 12.63%).

Muestras	Masa del sólido (g)	Masa del vaso con agua (g)	Masa del vaso con agua más el sólido introducido (g)	Masa del agua desalojada (g)	Densidad del agua destilada (g/cm <sup>3</sup> )	Densidad del sólido (g/cm <sup>3</sup> )	Densidad del sólido (Promedio) (g/cm <sup>3</sup> )	Desviación estándar ±
1	0.138	216.788	216.938	0.150	0.99795	0.91811		
2	0.115	216.698	216.818	0.120	0.99795	0.95637		
3	0.123	216.639	216.760	0.121	0.99795	1.01445		
4	0.107	216.573	216.687	0.114	0.99795	0.93667		
5	0.101	216.531	216.632	0.101	0.99795	0.99795		
6	0.109	216.483	216.597	0.114	0.99795	0.95418	0.94297	0.0428
7	0.070	216.417	216.494	0.077	0.99795	0.90723		
8	0.075	216.374	216.453	0.079	0.99795	0.94742		
9	0.059	216.312	216.380	0.068	0.99795	0.86587		
10	0.140	216.251	216.401	0.150	0.99795	0.93142		

Tabla 12. Densidad de las fibras piassaba de *Aphandra natalia* a temperatura ambiente (contenido de humedad de las fibras 22.62).

Muestra	Masa del sólido (g)	Masa del vaso con agua (g)	Masa del vaso con agua más el sólido introducido (g)	Masa del agua desalojada (g)	Densidad del agua destilada (g/cm <sup>3</sup> )	Densidad del sólido (g/cm <sup>3</sup> )	Densidad del sólido (Promedio) (g/cm <sup>3</sup> )	Desviación estándar
1	0.195	217.041	217.215	0.174	0.99795	1.11839		
2	0.187	216.971	217.14	0.169	0.99795	1.10424		
3	0.187	216.923	217.09	0.167	0.99795	1.11746		
4	0.163	216.878	217.015	0.137	0.99795	1.18734		
5	0.153	216.808	216.937	0.129	0.99795	1.18362		
6	0.155	216.748	216.883	0.135	0.99795	1.14579	1.16084	0.0489
7	0.108	216.598	216.687	0.089	0.99795	1.21100		
8	0.127	216.456	216.571	0.115	0.99795	1.10208		
9	0.093	216.649	216.726	0.077	0.99795	1.20532		
10	0.194	216.541	216.698	0.157	0.99795	1.23314		

### Anexo 2 Resultados de Ensayos de Tracción de las fibras de de Aphandra Natalia; (Balcázar, 2020)

Tabla 13. Características mecánicas de las fibras piassaba de *Aphandra natalia* para un rango de grosor entre 0.10 mm y 0.19 mm.

Muestra	Grosor (mm)	Área en el plano de fractura (mm <sup>2</sup> )	Carga de rotura (L) (N)	Resistencia a la tracción (σ) (MPa)	Deformación de rotura (ε%) (%)	Límite Elástico (σ <sub>y</sub> ) (MPa)	Deformación unitaria hasta el límite elástico (ε <sub>y</sub> )	Módulo de Young (E) (GPa)
1	0.10	0.0167	7.75	464.072	6.75	104.79	0.0070	14.9701
2	0.10	0.0151	8.25	546.358	6.45	115.89	0.0035	33.1126
3	0.10	0.0162	7.25	447.531	5.95	108.02	0.0045	24.0055
4	0.13	0.0248	13.75	554.435	5.25	70.56	0.0070	10.0806
5	0.13	0.0211	13.75	651.659	6.90	82.94	0.0040	20.7346
6	0.10	0.0180	7.75	430.556	5.25	97.22	0.0045	21.6049
7	0.10	0.0146	7.75	530.822	6.15	291.10	0.0175	16.6341
8	0.10	0.0113	6.75	597.345	6.75	376.11	0.0100	37.6106
9	0.10	0.0122	8.75	717.213	5.95	348.36	0.0150	23.2240
10	0.10	0.0119	8.25	693.277	7.90	357.14	0.0120	29.7619

Tabla 14. Características mecánicas de las fibras piassaba de *Aphandra natalia* para un rango de grosor entre 0.20 mm y 0.29 mm.

Muestra	Grosor	Área en el plano de fractura	Carga de rotura	Resistencia a la tracción	Deformación de rotura	Límite Elástico	Deformación unitaria hasta el límite elástico	Módulo de Young
	(mm)	(mm <sup>2</sup> )	(L) (N)	(σ) (MPa)	(ε%) (%)	(σ <sub>y</sub> ) (MPa)	(ε <sub>y</sub> )	(E) (GPa)
1	0.21	0.0425	19.75	464.706	5.80	111.76	0.0050	22.3529
2	0.20	0.0466	18.75	402.361	4.15	101.93	0.0050	20.3863
3	0.24	0.0897	20.75	231.327	5.30	52.95	0.0025	21.1817
4	0.26	0.1075	21.75	202.326	6.20	81.40	0.0035	23.2558
5	0.27	0.1195	25.75	215.481	9.50	73.22	0.0045	16.2715
6	0.24	0.1291	25.75	199.458	8.50	67.78	0.0055	12.3231
7	0.23	0.0776	19.75	254.510	4.50	112.76	0.0085	13.2656
8	0.27	0.1129	21.75	192.648	7.75	28.79	0.0025	11.5146
9	0.25	0.0994	21.75	218.813	6.50	88.03	0.0115	7.6546
10	0.20	0.0554	15.75	284.296	8.80	76.71	0.0115	6.6709

Tabla 15. Características mecánicas de las fibras piassaba de *Aphandra natalia* para un rango de grosor entre 0.30 mm y 0.39 mm.

Muestra	Grosor	Área en el plano de fractura	Carga de rotura	Resistencia a la tracción	Deformación de rotura	Límite Elástico	Deformación unitaria hasta el límite elástico
	(mm)	(mm <sup>2</sup> )	(L) (N)	(σ) (MPa)	(ε%) (%)	(σ <sub>y</sub> ) (MPa)	(ε <sub>y</sub> )
1	0.33	0.1723	26.75	155.252	7.25	50.78	0.0085
2	0.30	0.1379	14.75	106.962	4.60	63.45	0.0115
3	0.30	0.0900	20.75	230.556	7.10	97.22	0.0140
4	0.38	0.1636	24.75	151.284	7.15	84.05	0.0195
5	0.36	0.1967	34.75	176.665	8.90	69.90	0.0040
6	0.34	0.0858	34.75	405.012	8.80	218.53	0.0195
7	0.30	0.1052	16.75	159.221	7.85	83.17	0.0140
8	0.39	0.1387	30.25	218.097	6.80	27.76	0.0055
9	0.38	0.1244	35.75	287.379	6.85	70.34	0.0065
10	0.38	0.1470	29.75	202.381	7.05	59.52	0.0060

Tabla 16. Características mecánicas de las fibras piassaba de *Aphandra natalia* para un rango de grosor entre 0.40 mm y 0.49 mm.

Muestra	Grosor	Área en el plano de fractura	Carga de rotura	Resistencia a la tracción	Deformación de rotura	Límite Elástico	Deformación unitaria hasta el límite elástico	Módulo de Young
	(mm)	(mm <sup>2</sup> )	(L) (N)	(σ) (MPa)	(ε%) (%)	(σ <sub>y</sub> ) (MPa)	(ε <sub>y</sub> )	(E) (GPa)
1	0.42	0.2668	37.75	141.492	11.10	70.28	0.0195	3.6040
2	0.44	0.2698	34.75	128.799	9.40	32.43	0.0025	12.9726
3	0.46	0.2776	34.75	125.180	8.95	31.52	0.0085	3.7083
4	0.47	0.1899	37.75	198.789	7.55	72.41	0.0100	7.2407
5	0.44	0.2121	37.75	177.982	7.85	41.25	0.0100	4.1254
6	0.44	0.2028	36.75	181.213	8.05	67.80	0.0050	13.5602
7	0.45	0.2273	34.25	150.682	4.85	82.49	0.0130	6.3454
8	0.45	0.1879	34.75	184.939	7.65	46.57	0.0070	6.6525
9	0.46	0.2101	37.75	179.676	4.90	41.65	0.0075	5.5529
10	0.40	0.1658	22.75	137.214	5.95	52.77	0.0130	4.0596

Tabla 17. Características mecánicas de las fibras piassaba de *Aphandra natalia* para un rango de grosor entre 0.50 mm y 0.59 mm.

Muestra	Grosor	Área en el plano de fractura	Carga de rotura	Resistencia a la tracción	Deformación de rotura	Límite Elástico	Deformación unitaria hasta el límite elástico	Módulo de Young
	(mm)	(mm <sup>2</sup> )	(L) (N)	(σ) (MPa)	(ε%) (%)	(σ <sub>y</sub> ) (MPa)	(ε <sub>y</sub> )	(E) (GPa)
1	0.50	0.3833	33.75	88.051	10.80	48.92	0.0145	3.3736
2	0.50	0.4927	33.75	68.500	10.35	38.06	0.0050	7.6111
3	0.55	0.3163	38.75	122.510	7.75	59.28	0.0085	6.9740
4	0.57	0.3815	41.75	109.436	4.70	49.15	0.0055	8.9360
5	0.52	0.2695	41.75	154.917	11.85	69.57	0.0075	9.2764
6	0.58	0.2874	39.75	138.309	9.85	82.64	0.0110	7.5125
7	0.57	0.3743	41.75	111.542	12.85	50.09	0.0185	2.7078
8	0.58	0.3627	41.75	115.109	5.15	51.70	0.0090	5.7440
9	0.57	0.3620	41.75	115.331	5.90	51.80	0.0085	6.0936
10	0.58	0.7210	41.75	57.906	7.60	26.01	0.0065	4.0009

### Anexo 3 Resultados parciales del ensayo de Difracción de Rayos x de las muestras de arcillas en estado natural



#### 3. INFORMACIÓN DE LOS ENSAYOS Y RESULTADOS.

##### 3.1 ENSAYOS DE DIFRACCIÓN DE RAYOS X

###### EQUIPO UTILIZADO PARA LOS ENSAYOS

Equipo: Difractómetro de Rayos X (XRD)  
 Marca: Panalytical  
 Modelo: X' Pert PRO

###### PARÁMETROS DE ENSAYOS

Gonímetro: PW3050/60 (Theta/2Theta)  
 Posición inicial (°2Th): 5,0251  
 Posición final (°2Th): 79,9751  
 Tamaño de paso: 0.050  
 Ánodo del material: Cobalto  
 Configuración de generador: 20 mA, 40 kV



Porcentaje de cada compuesto en la muestra CID-0205 (M. PUYO 1)

Código de referencia	Nombre de compuesto	Formula química	Porcentaje (%)
00-029-1488	Kaolinita	Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>	59,4
00-033-1161	Silica	Si O <sub>2</sub>	2,3
00-013-0375	Halloysita	Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>	17,6
	Amorfo		20,8

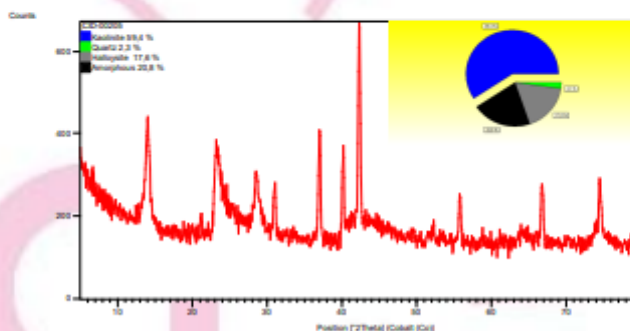


Gráfico porcentual de compuestos químicos de la muestra CID-0205

Porcentaje de cada compuesto en la muestra CID-0206  
(M. PUYO 2)

Código de referencia	Nombre de compuesto	Formula química	Porcentaje (%)
00-033-1161	silica	Si O <sub>2</sub>	3,0
00-029-1488	Kaolinita	Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ( O H ) <sub>4</sub>	54,8
00-013-0375	Halloysita	Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ( O H ) <sub>4</sub>	10,2
00-041-1480	Albita	( Na , Ca ) Al ( Si , Al ) <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	2,4
	Amorfo		29,7

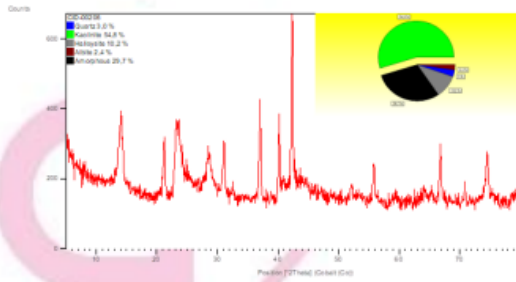


Gráfico porcentual de compuestos químicos de la muestra CID-0206

Porcentaje de cada compuesto en la muestra CID-0207  
(M. VERACRUZ)

Código de referencia	Nombre de compuesto	Formula química	Porcentaje (%)
00-013-0375	Halloysita	Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ( O H ) <sub>4</sub>	14,6
00-033-1161	Silica	Si O <sub>2</sub>	10,6
00-029-1488	Kaolinita	Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> ( O H ) <sub>4</sub>	49,0
00-036-0432	Gypsum	Ca S O <sub>4</sub> I <sub>2</sub> H <sub>2</sub> O	13,0
	Amorfo		12,9

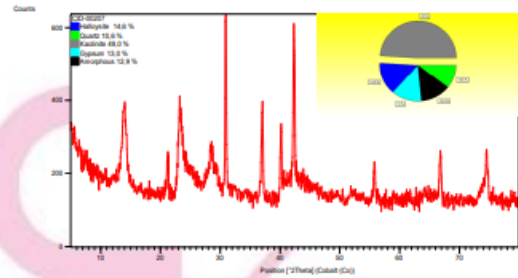


Gráfico porcentual de compuestos químicos de la muestra CID-0207

### Anexo 4 Moldeado y curado de probetas cilíndricas- Previo a la realización del ensayo a compresión de cilindros de hormigón





**Anexo 5 Moldeado de probetas de vigas- Previo a la realización del ensayo a flexión**





## Anexo 6 Resultados de ensayo a Flexión en el laboratorio





**LABORATORIO DE ENSAYOS DE MATERIALES & CONSTRUCCIONES**  
Especializados en Mecánica de Suelos

### RESISTENCIA A LA FLEXION DE VIGAS DE HORMIGON

**Obra:** Tesis Espol  
**Ordena:** Ing. Walter Naranjo  
**Fecha:** 25 de octubre de 2025  
**Lugar:** Guayaquil

Resultados de las prueba de resistencia a la flexión del hormigón

Norma Aplicada: ASTM C293

Vigas N°	Fecha de Toma	Fecha de Rotura	Rotura a los días	CARGA Kn	Resistencia MPa	Resistencia a la flexión prom.	Referencia
1	27 - 09 - 2025	25 - 10 - 2025	28	33.60	7.47	6.90	Elemento Control más fibra 0% Ar y 1% F
2	27 - 09 - 2025	25 - 10 - 2025	28	28.49	6.33		

Luis E. Figueroa R.  
Ingeniero Civil



**LABORATORIO DE ENSAYOS DE MATERIALES & CONSTRUCCIONES**  
Especializados en Mecánica de Suelos

### RESISTENCIA A LA FLEXION DE VIGAS DE HORMIGON

**Obra:** Tesis Espol  
**Ordena:** Ing. Walter Naranjo  
**Fecha:** 25 de octubre de 2025  
**Lugar:** Guayaquil

Resultados de las prueba de resistencia a la flexión del hormigón

Norma Aplicada: ASTM C293

Vigas N°	Fecha de Toma	Fecha de Rotura	Rotura a los días	Carga Kn	Resistencia MPa	Resistencia a la flexión prom.	Referencia
1	27 - 09 - 2025	25 - 10 - 2025	28	38.77	8.62	8.54	Elemento Control
2	27 - 09 - 2025	25 - 10 - 2025	28	38.10	8.47		

Luis E. Figueroa R.  
Ingeniero Civil



**LABORATORIO DE ENSAYOS DE MATERIALES & CONSTRUCCIONES**  
Especializados en Mecánica de Suelos

**RESISTENCIA A LA FLEXION DE VIGAS DE HORMIGON**

**Obra:** Tesis Espol  
**Ordena:** Ing. Walter Naranjo  
**Fecha:** 25 de octubre de 2025  
**Lugar:** Guayaquil

Resultados de las prueba de resistencia a la flexión del hormigón

Norma Aplicada: ASTM C293

Vigas N°	Fecha de Toma	Fecha de Rotura	Rotura a los días	Carga Kn	Resistencia MPa	Resistencia a la flexión prom.	Referencia
1	27 - 09 - 2025	25 - 10 - 2025	28	33.51	7.45	7.43	Elemento 40% Ar y 0%F
2	27 - 09 - 2025	25 - 10 - 2025	28	33.39	7.42		

Luis E. Figueroa R.  
Ingeniero Civil



**LABORATORIO DE ENSAYOS DE MATERIALES & CONSTRUCCIONES**  
Especializados en Mecánica de Suelos

**RESISTENCIA A LA FLEXION DE VIGAS DE HORMIGON**

**Obra:** Tesis Espol  
**Ordena:** Ing. Walter Naranjo  
**Fecha:** 25 de octubre de 2025  
**Lugar:** Guayaquil

Resultados de las prueba de resistencia a la flexión del hormigón

Norma Aplicada: ASTM C293

Vigas N°	Fecha de Toma	Fecha de Rotura	Rotura a los días	Carga Kn	Resistencia MPa	Resistencia a la flexión prom.	Referencia
1	27 - 09 - 2025	25 - 10 - 2025	28	26.58	5.91	6.44	Elemento 40% Ar y 1% F
2	27 - 09 - 2025	25 - 10 - 2025	28	31.39	6.98		

Luis E. Figueroa R.  
Ingeniero Civil



**RESISTENCIA A LA FLEXION DE VIGAS DE HORMIGON**

**Obra:** Tesis Espol  
**Ordena:** Ing. Walter Naranjo  
**Fecha:** 25 de octubre de 2025  
**Lugar:** Guayaquil

Resultados de las prueba de resistencia a la flexión del hormigón

Norma Aplicada: ASTM C293

Vigas N°	Fecha de Toma	Fecha de Rotura	Rotura a los días	Carga Kn	Resistencia MPa	Resistencia a la flexión prom.	Referencia
1	27 - 09 - 2025	25 - 10 - 2025	28	31.15	6.92	6.26	Elemento 30% Ar y 0% F
2	27 - 09 - 2025	25 - 10 - 2025	28	25.23	5.61		

Luis E. Figueroa R.  
Ingeniero Civil



**RESISTENCIA A LA FLEXION DE VIGAS DE HORMIGON**

**Obra:** Tesis Espol  
**Ordena:** Ing. Walter Naranjo  
**Fecha:** 25 de octubre de 2025  
**Lugar:** Guayaquil

Resultados de las prueba de resistencia a la flexión del hormigón

Norma Aplicada: ASTM C293

Vigas N°	Fecha de Toma	Fecha de Rotura	Rotura a los días	Carga Kn	Resistencia MPa	Resistencia a la flexión prom.	Referencia
1	27 - 09 - 2025	25 - 10 - 2025	28	29.65	6.59	6.77	Elemento 30% Ar y 1 %F
2	27 - 09 - 2025	25 - 10 - 2025	28	31.29	6.95		

Luis E. Figueroa R.  
Ingeniero Civil