



UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

Evaluación de resistencia y densidad del hormigón con sustitución parcial de cemento por
flujos piroclásticos del volcán Tungurahua y Sangay

Trabajo de Titulación para optar al título de
INGENIERO CIVIL

Autor:

Maiza Yanchaguano Darwin Lizandro

Tutor:

Ing. Marco Javier Palacios Carvajal, Mgs.

Riobamba, Ecuador. 2026

DECLARATORIA DE AUTORÍA

Yo, **Darwin Lizandro Maiza Yanchaguano**, con cédula de ciudadanía **1850361120**, autor del trabajo de investigación titulado: **“EVALUACIÓN DE RESISTENCIA Y DENSIDAD DEL HORMIGÓN CON SUSTITUCIÓN PARCIAL DE CEMENTO POR FLUJOS PIROCLÁSTICOS DEL VOLCÁN TUNGURAHUA Y SANGAY”**, certifico que la producción, ideas, opiniones, criterios, contenidos y conclusiones son de mi exclusiva responsabilidad.

Asimismo, cedo a la Universidad Nacional de Chimborazo, en forma no exclusiva, los derechos para su uso, comunicación pública, distribución, divulgación y/o reproducción total o parcial, por medio físico o digital; en esta cesión se entiende que el cesionario no podrá obtener beneficios económicos. La posible reclamación de terceros respecto a los derechos de autor de la obra referida, será de mi entera responsabilidad; librando a la Universidad Nacional de Chimborazo de posibles obligaciones.

En Riobamba, 29 de Junio de 2026.

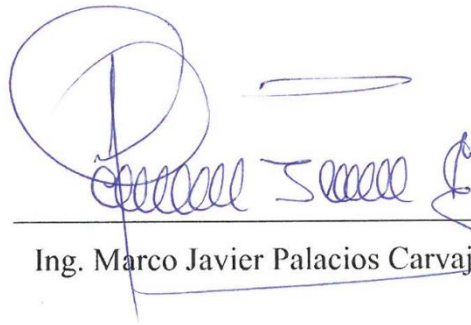


Darwin Lizandro Maiza Yanchaguano
C.I: 1850361120

DICTAMEN FAVORABLE DEL PROFESOR TUTOR

Quien suscribe, Ing. Marco Palacios, Mgs. catedrático adscrito a la Facultad de Ingeniería por medio del presente documento certifico haber asesorado y revisado el desarrollo del trabajo de investigación titulado: **“EVALUACIÓN DE RESISTENCIA Y DENSIDAD DEL HORMIGÓN CON SUSTITUCIÓN PARCIAL DE CEMENTO POR FLUJOS PIROCLÁSTICOS DEL VOLCÁN TUNGURAHUA Y SANGAY”**, bajo la autoria de Darwin Lizandro Maiza Yanchaguano; por lo que se autoriza los tramites legales para su sustentación.

Es todo cuanto informar en honor a la verdad; en Riobamba, a los 29 días del mes de Junio de 2026.



Ing. Marco Javier Palacios Carvajal, Mgs.

CERTIFICADO DE LOS MIEMBROS DE TRIBUNAL

Quienes suscribimos, catedráticos designados Miembros del Tribunal de Grado para la evaluación del trabajo de investigación “**EVALUACIÓN DE RESISTENCIA Y DENSIDAD DEL HORMIGÓN CON SUSTITUCIÓN PARCIAL DE CEMENTO POR FLUJOS PIROCLÁSTICOS DEL VOLCÁN TUNGURAHUA Y SANGAY**”, presentado por Darwin Lizandro Maiza Yanchaguano, con cédula de identidad número 1850361120, bajo la tutoría de Ing. Marco Javier Palacios Carvajal, Mgs; certificamos que recomendamos la APROBACIÓN de este con fines de titulación. Previamente se ha evaluado el trabajo de investigación y escuchada la sustentación por parte de su autor; no teniendo más nada que observar.

De conformidad a la normativa aplicable firmamos, en Riobamba 29 de junio de 2026.

Ing. Tito Oswaldo Castillo Campoverde, PhD
PRESENTE DEL TRIBUNAL DE GRADO



Ing. Oscar Alfredo Cevallos Velasquez, PhD
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO



Ing. Andrea Natalí Zárate Villacrés, Mgs
MIEMBRO DEL TRIBUNAL DE GRADO

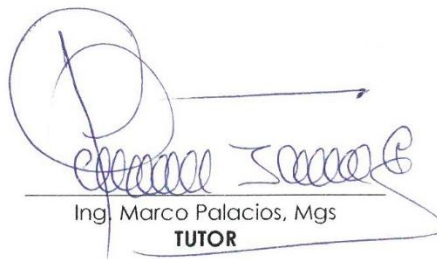




CERTIFICACIÓN

Que, **MAIZA YANCHAAGUANO DARWIN LIZANDRO** con CC: **1850361120**, estudiante de la Carrera **INGENIERÍA CIVIL**, Facultad de **INGENIERÍA**; ha trabajado bajo mi tutoría el trabajo de investigación titulado "**EVALUACIÓN DE RESISTENCIA Y DENSIDAD DEL HORMIGÓN CON SUSTITUCIÓN PARCIAL DE CEMENTO POR FLUJOS PIROCLÁSTICOS DEL VOLCÁN TUNGURAHUA Y SANGAY**", cumple con el **7 %**, de acuerdo al reporte del sistema Anti plagio **Compilatio**, porcentaje aceptado de acuerdo a la reglamentación institucional, por consiguiente autorizo continuar con el proceso.

Riobamba, 19 de Junio de 2026



Ing. Marco Palacios, Mgs
TUTOR

DEDICATORIA

Para mi familia (Silvia, Luis, Jonathan & Estefania), mi futura familia (Katherin & Matias), amigos (Iván & Nick) y personas que aprecio.

AGRADECIMIENTO

A Dios, mi familia (Silvia, Luis, Jonathan & Estefania), mi futura familia (Katherin & Matias), amigos (Iván & Nick) y personas que aprecio.

ÍNDICE GENERAL

PORTADA

DECLARATORIA DE AUTORÍA

DICTAMEN FAVORABLE DEL TUTOR Y MIEMBROS DEL TRIBUNAL

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTO

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE TABLAS

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE ANEXOS

RESUMEN

ABSTRACT

CAPÍTULO I.....	16
1.1. Introducción.....	16
1.2. Planteamiento del problema	17
1.3. Pregunta de investigación.....	17
1.4. Planteamiento de hipótesis	17
1.5. Justificación	18
1.6. Objetivos.....	19
1.6.1. Objetivo general	19
1.6.2. Objetivos específicos	19
CAPÍTULO II	20
2.1. Estado del arte	20
2.2. Marco teórico.....	20
2.2.1. Naturaleza de los flujos piroclásticos	20
2.2.2. Composición y reactividad de las puzolanas	21
2.2.3. Impacto ambiental	21
2.3. Marco conceptual	21

2.3.1.	Reactividad puzolánica.....	21
2.3.2.	Efecto filler	21
2.3.3.	Coeficiente de permeabilidad	22
2.3.4.	Módulo de finura	22
CAPÍTULO III		23
3.1.	Metodología.....	23
3.1.1.	Enfoque de investigación.....	23
3.1.2.	Tipo de investigación	23
3.1.3.	Alcance de la investigación	23
3.1.4.	Diseño experimental	24
3.1.4.1.	Obtención de material piroclástico	24
3.1.4.2.	Caracterización de materiales	25
3.1.4.2.1.	Molienda de roca volcánica	25
3.1.4.2.2.	Colorimetría.....	26
3.1.4.2.3.	Módulo de finura	26
3.1.4.3.	Caracterización química	26
3.1.4.4.	Diseño de mezclas	26
3.1.4.4.1.	Nomenclatura de las mezclas de hormigón	27
3.1.4.5.	Fabricación de probetas	27
3.1.4.5.1.	Fase piloto	27
3.1.4.5.2.	Fase final	27
3.1.4.6.	Ensayos del hormigón en estado fresco.....	27
3.1.4.6.1.	Asentamiento del hormigón	28
3.1.4.6.2.	Vibrado manual.....	28
3.1.4.7.	Ensayos del hormigón en estado endurecido.....	28
3.1.4.7.1.	Resistencia a la compresión.....	28
3.1.4.7.2.	Densidad	29
3.1.4.7.3.	Permeabilidad	29
3.1.5.	Población de estudio	30
3.1.6.	Variables de investigación.....	30
3.1.6.1.	Variable independiente	30

3.1.6.2.	Variable dependiente	30
3.1.7.	Técnicas e instrumentos de recolección de datos	31
3.1.8.	Método de análisis procesamiento de datos	31
3.1.8.1.	Método analítico	31
3.1.8.2.	Criterio de depuración de datos experimentales	31
3.1.8.3.	Análisis estadístico de fase piloto.....	32
3.1.9.	Cronograma de trabajo de investigación	32
CAPÍTULO IV		34
4.1.	Resultados y discusión	34
4.1.1.	Caracterización de los piroclastos y agregados	34
4.1.1.1.	Granulometría	34
4.1.1.2.	Colorimetría.....	37
4.1.1.3.	Fluorescencia de rayos X (FRX)	38
4.1.2.	Propiedades del hormigón	39
4.1.2.1.	Selección del porcentaje óptimo de sustitución.....	39
4.1.2.2.	Asentamiento (Slump Test)	39
4.1.2.3.	Resistencia a la compresión.....	40
4.1.2.4.	Densidad	48
4.1.2.5.	Permeabilidad	53
CAPÍTULO V		57
5.1.	Conclusiones.....	57
5.2.	Recomendaciones	59
BIBLIOGRAFÍA		60
ANEXOS		64

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Estructura de distribución de tareas (EDT)	33
Tabla 2. Módulos de finura obtenidos para los materiales evaluados	36
Tabla 3. Composición química obtenida mediante fluorescencia de rayos X (FRX) para los piroclastos triturados del Tungurahua y Sangay	38
Tabla 4. Resistencia a la compresión a los 7 días en mezclas piloto.....	39
Tabla 5. Asentamientos (Slump)	40
Tabla 6. Dosificación en peso (kg) de las mezclas de T-HE, S-HE y N-HE, con proporciones 1:1.53:1.65:0.52.....	40
Tabla 7. Resistencia a la compresión de la mezcla de T-HE con 4% de sustitución (dosificación 1:1.53:1.65:0.52) a diferentes edades	41
Tabla 8. Resultados depurados de resistencia a la compresión de la mezcla de T-HE con 4% de sustitución (dosificación 1:1.53:1.65:0.52) a diferentes edades	42
Tabla 9. Resistencia a la compresión de la mezcla de S-HE con 4% de sustitución (dosificación 1:1.53:1.65:0.52) a diferentes edades	43
Tabla 10. Resultados depurados de resistencia a la compresión de la mezcla de S-HE con 4% de sustitución (dosificación 1:1.53:1.65:0.52) a diferentes edades	44
Tabla 11. Resistencia a la compresión del N-HE (dosificación 1:1.53:1.65:0.52) a diferentes edades	45
Tabla 12. Resistencia a la compresión a 28 días y variación porcentual.....	48
Tabla 13. Densidad de la mezcla de T-HE con 4 % de sustitución a diferentes edades de curado.	49
Tabla 14. Densidad de la mezcla de S-HE con 4 % de sustitución a diferentes edades de curado.	49
Tabla 15. Densidad del N-HE a diferentes edades de curado	50
Tabla 16. Densidad promedio del hormigón a diferentes edades de curado para mezclas de S-HE, T-HE y N-HE.....	51
Tabla 17. Densidad final y variación porcentual.....	52
Tabla 18. Resultados del coeficiente de permeabilidad del N-HE	53
Tabla 19. Resultados del coeficiente de permeabilidad del S-HE con 4 % de sustitución. .	53
Tabla 20. Resultados del coeficiente de permeabilidad del T-HE con 4 % de sustitución. .	54
Tabla 21. Coeficiente de permeabilidad (k) y variación porcentual respecto al hormigón estándar	55

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Metodología de investigación de proyecto.	24
Figura 2. Ensayo de asentamiento (cono de Abrams) para mezclas de T-HE, S-HE y N-HE.	28
Figura 3. Registro de masa y dimensiones geométricas de la probeta para el cálculo de densidad.	29
Figura 4. Curva granulométrica de piroclasto triturado del volcán Tungurahua.	34
Figura 5. Curva granulométrica de piroclasto triturado del volcán Sangay.	35
Figura 6. Curva granulométrica de agregado fino lavado.	35
Figura 7. Curva granulométrica de agregado grueso $\frac{3}{4}$ ".	36
Figura 8. Ensayo colorimétrico ASTM C-40 de piroclasto triturado del volcán Tungurahua.	37
Figura 9. Ensayo colorimétrico ASTM C-40 de piroclasto triturado del volcán Sangay.	37
Figura 10. Desarrollo de resistencia de la mezcla de T-HE en función del tiempo de curado.	42
Figura 11. Desarrollo de resistencia de la mezcla de S-HE en función del tiempo de curado.	44
Figura 12. Desarrollo de resistencia del N-HE en función del tiempo de curado.	46
Figura 13. Resistencia a la compresión de mezclas de T-HE y S-HE respecto a la mezcla de N-HE.	46
Figura 14. Comparación de la densidad del T-HE y S-HE frente al N-HE.	52
Figura 15. Coeficiente de permeabilidad.	54

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Resultados cilindros T-HE-Ensayo a los 7 días.....	64
Anexo 2. Resultados cilindros S-HE-Ensayo a los 7 días	64
Anexo 3. Resultados cilindros N-HE-Ensayo a los 7 días	64
Anexo 4. Resultados cilindros T-HE-Ensayo a los 14 días.....	65
Anexo 5. Resultados cilindros S-HE-Ensayo a los 14 días	65
Anexo 6. Resultados cilindros N-HE-Ensayo a los 14 días	65
Anexo 7. Resultados cilindros T-HE-Ensayo a los 21 días.....	66
Anexo 8. Resultados cilindros S-HE-Ensayo a los 21 días	66
Anexo 9. Resultados cilindros N-HE-Ensayo a los 21 días	66
Anexo 10. Resultados cilindros T-HE-Ensayo a los 28 días.....	67
Anexo 11. Resultados cilindros S-HE-Ensayo a los 28 días	67
Anexo 12. Resultados cilindros N-HE-Ensayo a los 28 días	67
Anexo 13. Informe Técnico de fluorescencia de rayos X (FRX) – Análisis semicuantitativo de muestras de piroclasto triturado del volcán Tungurahua y del volcán Sangay.....	68
Anexo 14. Informe técnico Ensayo de permeabilidad para el hormigón normal	72
Anexo 15. Informe técnico Ensayo de permeabilidad para el hormigón con reemplazo parcial de piroclasto triturado del volcán Sangay	74
Anexo 16. Informe técnico Ensayo de permeabilidad para el hormigón con reemplazo parcial de piroclasto triturado del volcán Tungurahua	76
Anexo 17. Coordenadas de obtención de piroclasto del volcán Sangay	78
Anexo 18. Coordenadas de obtención de piroclasto del volcán Tungurahua.....	78

RESUMEN

Esta investigación evaluó la sustitución parcial de cemento HE Chimborazo por piroclasto triturado de los volcanes Tungurahua y Sangay. Inicialmente, los materiales fueron caracterizados mediante ensayos físicos y químicos, y se elaboraron mezclas con sustituciones del 3 %, 4 % y 5 % para determinar el porcentaje óptimo de reemplazo. Los resultados permitieron seleccionar el 4 %, debido a mayor resistencia a la compresión y un comportamiento uniforme. Posteriormente, se desarrolló la fase experimental definitiva con dosificación de 1:1.53:1.65:0.52 y se evaluaron propiedades del hormigón en estado fresco y endurecido a los 7, 14, 21 y 28 días.

El hormigón con piroclasto del volcán Tungurahua alcanzó una resistencia a la compresión de 37.65 MPa a los 28 días, superando en 4.27 % al hormigón convencional, mientras que el del Sangay un incremento de 1.16 %. Este comportamiento se asoció al contenido de SiO_2 y al efecto filler. Además, las mezclas con piroclasto presentaron ligeras reducciones de densidad y aumentos de permeabilidad, manteniendo valores de 10^{-5} cm/s, característicos de hormigones convencionales. Se concluyó que la sustitución parcial del 4 % de cemento por piroclasto triturado del volcán Tungurahua es técnicamente viable para su aplicación en hormigón estructural.

Palabras clave: piroclasto, sustitución de cemento, hormigón, densidad, resistencia a compresión, permeabilidad.

ABSTRACT

This study evaluated the partial replacement of HE Chimborazo cement with crushed pyroclastic material from the Tungurahua and Sangay volcanoes. Initially, the materials were characterized through physical and chemical tests, and concrete mixtures with 3%, 4%, and 5% cement replacement were prepared to determine the optimal substitution percentage. The results identified 4% as the optimal replacement level due to its higher compressive strength and more uniform performance. Subsequently, the definitive experimental phase was carried out using a mix proportion of 1:1.53:1.65:0.52, and fresh and hardened concrete properties were evaluated at 7, 14, 21, and 28 days of curing. Concrete incorporating Tungurahua pyroclastic material achieved a compressive strength of 37.65 MPa at 28 days, exceeding conventional concrete by 4.27%, while the Sangay material showed an increase of 1.16%. This behavior was associated with the SiO₂ content and the filler effect. In addition, the mixtures containing pyroclastic material exhibited slight reductions in density and increases in permeability, while maintaining values on the order of 10⁻⁵ cm/s, characteristic of conventional concrete. It was concluded that a 4% partial replacement of cement with crushed pyroclastic material from the Tungurahua volcano is technically feasible for structural concrete applications.

Keywords: pyroclast, cement replacement, concrete, density, compressive strength, permeability.



Reviewed by:
Mgs. Hugo Romero
ENGLISH PROFESSOR
C.C. 0603156258

CAPÍTULO I

1.1. Introducción

El hormigón es una combinación de agua, cemento, agregados finos y gruesos. Es el material más utilizado a nivel mundial, con una producción de 26 Gt/año en 2020, debido a su creciente implementación en edificación e infraestructura [1]. El cemento representa entre el 7 % y el 15 % del peso total de la mezcla, pero su participación tiene impacto negativo en el ambiente [2]. La producción de este componente genera una liberación significativa de dióxido de carbono (CO_2).

Ecuador, debido a su geografía volcánica, dispone de abundante material de piroclasto procedente de sus volcanes, como Tungurahua y Sangay. Una manera de disminuir el impacto ambiental por la producción de cemento es con la implementación de nuevos materiales con alto contenido de sílice SiO_2 . El uso de material puzolánico es una opción para la reducción de cemento y contribuye al aprovechamiento de materiales puzolánicos naturales [3].

En esta investigación se evalúa las propiedades mecánicas como resistencia a la compresión, densidad y permeabilidad en hormigones estructurales con sustitución parcial de cemento por piroclastos triturados. Además, se realiza un análisis químico de los piroclastos triturados del volcán Tungurahua y Sangay. En conjunto, esta experimentación se realiza con el objetivo de determinar la viabilidad técnica del uso de piroclastos triturados como sustituto parcial.

El presente trabajo impulsa el desarrollo de futuras investigaciones de ingeniería enfocadas en la producción de hormigón de alta resistencia que minimicen su impacto ambiental, como una estrategia para desarrollar hormigón sostenible mediante la reducción de emisiones de dióxido de carbono CO_2 [3], sin comprometer su resistencia a la compresión.

En una fase preliminar del estudio se evaluó el reemplazo parcial del cemento por piroclasto triturado de los volcanes Tungurahua y Sangay en proporciones del 3 %, 4 % y 5 % del peso del cemento, con el fin de determinar el porcentaje óptimo de sustitución. A partir de los resultados obtenidos, se seleccionó el 4 % como porcentaje óptimo para la fase experimental definitiva. El material utilizado será el piroclasto triturado que pasa por el tamiz N°200, el cual representa la fracción fina del material [4].

El número de probetas se determinó en función de las proporciones de piroclasto y el número de volcanes analizados, las cuales se evaluaron a los 7, 14, 21 y 28 días [5]. Trabajando con una dosificación de 1: 1.53: 1.65: 0.52 y piroclasto proveniente de dos fuentes, Tungurahua y Sangay, lo que resultó 48 probetas para evaluar la resistencia a la compresión y densidad. Además, 12 probetas para el ensayo de permeabilidad. Finalmente, los ensayos se llevaron a cabo siguiendo las normativas correspondientes.

1.2. Planteamiento del problema

A nivel global, el cemento es uno de los materiales más vendidos [6]. Sin embargo, su proceso de producción consume recursos naturales de forma excesiva y genera enormes cantidades de CO₂ [7]. Su fabricación es responsable de entre 8 % y 10 % de las emisiones de dióxido de carbono en escala mundial [8]. En Ecuador, la producción de cemento tipo HE genera entre 465.89 y 696.81 kg de dióxido de carbono por tonelada producida [9]. Esta situación no solo afecta al medio natural, sino que también vulnera los derechos de la naturaleza, reconocidos en la Constitución, que protege su existencia, mantenimiento, regeneración y restauración [10].

El uso de cemento tipo HE en Ecuador conlleva a un mayor consumo de clinker, lo que directamente incrementa la emisión de dióxido de carbono CO₂. La composición del cemento está dominada por el clinker, que representa el 72 % de su masa [11]. Esta situación no solo aumenta la huella de carbono, sino que también genera la necesidad de aplicar estrategias orientadas a reducir el uso de este componente.

En Ecuador existe una importante cantidad de piroclastos provenientes de la actividad volcánica de los volcanes Tungurahua y Sangay, pero estos materiales tienen una aplicación limitada en la industria concretera siendo aun dependientes del cemento convencional. Debido a sus propiedades puzolánicas [12], los piroclastos constituyen una alternativa potencial para el reemplazo parcial del cemento tipo Portland HE, por lo que resulta necesario investigar su efecto en las propiedades mecánicas del hormigón.

1.3. Pregunta de investigación

¿De qué manera influye la sustitución parcial del cemento tipo HE por piroclastos triturados de los volcanes Tungurahua y Sangay en las propiedades del hormigón y su potencial aprovechamiento como material cementante alternativo?

1.4. Planteamiento de hipótesis

El porcentaje de reemplazo parcial del cemento tipo HE Chimborazo por piroclastos triturados de los volcanes Tungurahua y Sangay mejora las propiedades mecánicas del hormigón, manteniendo sus propiedades físicas.

1.5. Justificación

La presente investigación se justifica por la necesidad de contribuir a la reducción del impacto ambiental generado por la producción de cemento tipo HE. La industria del hormigón ha enfocado sus esfuerzos en disminuir la huella de carbono asociada a la fabricación de clinker [13], debido a que es responsable de aproximadamente el 5 % de todas las emisiones de CO₂ a nivel global [14]. Considerando que el hormigón es el material más utilizado en la industria de la construcción [15], resulta necesario evaluar alternativas que permitan reducir el consumo de cemento convencional.

Los materiales puzolánicos aportan significativamente en la resistencia del hormigón, en especial en edades avanzadas [16]. En este contexto, el piroclasto triturado constituye una alternativa técnicamente viable, ya que cumple con los criterios de la norma ASTM C618 para puzolanas naturales, lo que avala su uso como material cementante suplementario en mezclas de hormigón [17]. Además, Ecuador dispone de importantes depósitos de este material debido a la actividad volcánica, como la registrada por el volcán Sangay desde 2019 [18], aunque su aprovechamiento en la industria de la construcción es limitado.

Asimismo, esta investigación se alinea con la Constitución del Ecuador, que reconoce el derecho a vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado, así como el derecho de la naturaleza a que se respete integralmente su existencia y a su restauración [10].

Por lo tanto, resulta de interés técnico, ambiental y constitucional evaluar la sustitución parcial del cemento por piroclasto triturado. Además, esta alterativa podría contribuir en la reducción de la huella de carbono y en términos económicos, disminuir costos al reducir el consumo de cemento tipo HE Chimborazo.

1.6. Objetivos

1.6.1. Objetivo general

- Evaluar las propiedades mecánicas, específicamente la densidad, permeabilidad y la resistencia a la compresión, de hormigones elaborados con una sustitución parcial del cemento Chimborazo tipo HE por flujos piroclásticos provenientes de los volcanes Tungurahua y Sangay.

1.6.2. Objetivos específicos

- Caracterizar física y químicamente los flujos piroclásticos de los volcanes Tungurahua y Sangay.
- Elaborar probetas de hormigón con diferentes porcentajes de sustitución parcial de cemento Chimborazo tipo HE por flujos piroclásticos y evaluar la resistencia a la compresión en distintas edades (7, 14, 21 y 28 días).
- Medir la densidad y permeabilidad del hormigón en las diferentes mezclas y comparar los resultados de resistencia a la compresión y densidad con las del hormigón convencional, para evaluar la viabilidad técnica de la sustitución.

CAPÍTULO II

2.1. Estado del arte

En la literatura internacional se destaca el interés por utilizar cenizas volcánicas (puzolanas naturales) como sustituto parcial del cemento para obtener hormigones más sostenibles, se ha demostrado que las propiedades finales del hormigón dependen de la composición química (principalmente contenido de SiO_2) y del porcentaje de puzolana empleada [19].

En Ecuador, [20] realizó un estudio comparativo con cenizas de cinco volcanes, incluido el Tungurahua, mediante un reemplazo del 20% del cemento en morteros, analizando su composición química y propiedades físicas para clasificar su reactividad puzolánica. Sin embargo, la investigación se limitó al análisis en morteros, sin evaluar propiedades del hormigón como densidad, permeabilidad y resistencia a la compresión en distintas edades de curado. Por ello, la presente investigación amplía este estudio al analizar la viabilidad técnica de los piroclastos de Tungurahua y Sangay en hormigón.

También [21] formularon hormigones de alta resistencia con ceniza del volcán Tungurahua, estableciendo un 20% de sustitución como porcentaje óptimo. Sin embargo, su estudio se enfocó principalmente en la resistencia mecánica, sin considerar propiedades como densidad y permeabilidad, aspectos que son abordados en la presente investigación. Del mismo modo, [22] empleó polvo de bloques de piedra pómez demolidos como sustitución parcial del cemento (0–15%), obteniendo un incremento del 5.56% en la resistencia a la compresión con un 6% de reemplazo, además de una reducción progresiva de las emisiones de CO_2 . No obstante, el estudio se desarrolló con residuos de piedra pómez y no con piroclastos provenientes de los volcanes Tungurahua y Sangay, materiales que presentan características mineralógicas y químicas diferentes.

No obstante, no se registran estudios que sustituyan cemento tipo HE por piroclastos triturados de los volcanes Tungurahua y Sangay en hormigón estructural. Esta carencia de investigaciones crea una brecha de conocimiento que el presente trabajo busca llenar con experimentación con esas puzolanas.

2.2. Marco teórico

2.2.1. Naturaleza de los flujos piroclásticos

Los flujos piroclásticos constituyen uno de los productos más representativos de las erupciones volcánicas explosivas. Se originan principalmente por el colapso gravitacional de columnas eruptivas o domos volcánicos inestables, generando corrientes de alta densidad compuestas por gases calientes, cenizas, pómez y fragmentos líticos que se desplazan a gran velocidad sobre la superficie terrestre [23]. Al asentarse, generan depósitos con vidrio volcánico amorfo y minerales cristalinos.

La composición mineralógica y química de los depósitos piroclásticos depende de factores como el tipo de magma, el mecanismo eruptivo y las condiciones de enfriamiento [24]. Por esta razón, es necesario caracterizar experimentalmente cada material antes de evaluar su incorporación en mezclas cementicias, ya que su comportamiento puede variar significativamente entre diferentes fuentes volcánicas

2.2.2. Composición y reactividad de las puzolanas

Las cenizas volcánicas han sido ampliamente estudiadas como materiales puzolánicos debido a su composición química, caracterizada por altos contenidos de dióxido de silicio (SiO_2), además de óxidos de aluminio (Al_2O_3) y hierro (Fe_2O_3) [19]. La presencia de estos compuestos es fundamental para el desarrollo de reacciones puzolánicas cuando el material se incorpora en sistemas cementicios.

La presencia de sílice amorfa implica uno de los factores para la reactividad de las puzolanas. En el transcurso de la hidratación del cemento Portland se libera hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) que, al reaccionar con sílice en las cenizas volcánicas, genera gel de silicato de calcio hidratado (C-S-H). Debido a ello, su estructura interna se vuelve más compacta, lo que puede contribuir a mejorar la durabilidad del hormigón [23].

2.2.3. Impacto ambiental

La producción de cemento Portland tradicional genera cerca de 1 tonelada de CO_2 por tonelada de cemento producido [21], lo que ha motivado la búsqueda de materiales alternativos que permitan reducir el consumo de clinker. En este contexto, las cenizas volcánicas y otras puzolanas naturales han sido estudiadas como sustitutos parciales del cemento debido a su potencial para disminuir las emisiones asociadas a la fabricación del hormigón. Diversos estudios han reportado que el incremento del porcentaje de sustitución contribuye a reducir la huella de carbono del material [21], [22].

2.3. Marco conceptual

2.3.1. Reactividad puzolánica

Capacidad de un material silíceo o aluminoso (puzolana) de reaccionar con hidróxido de calcio para formar compuestos hidratados cementantes [20]. Su implicación se da en altos contenidos de sílice amorfa en los flujos aumentan la resistencia progresiva del hormigón.

2.3.2. Efecto filler

Efecto de relleno que ocurre cuando partículas muy finas (no reactivas) se acomodan en la matriz cementante. Al mejorar el espacio y la unión de los materiales, acelera la hidratación inicial del cemento [25]. Esto se traduce en una ganancia de resistencia inicial más rápida y densificación de su microestructura.

2.3.3. Coeficiente de permeabilidad

Medida de la velocidad del flujo de agua a través del hormigón bajo un gradiente hidráulico dado (en cm/s) [26]. Un valor bajo indica que es un hormigón más impermeable pero lo inverso sugieren mayor conectividad de poros y penetración de agua.

2.3.4. Módulo de finura

Es un parámetro empírico que indica el tamaño promedio de las partículas de un agregado. Se calcula sumando los porcentajes acumulados retenidos en los tamices estándar y dividiendo el resultado entre 100.

CAPÍTULO III

3.1. Metodología

3.1.1. Enfoque de investigación

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, debido a que se basó en la obtención y análisis de datos numéricos obtenidos de ensayos de laboratorio aplicados al hormigón elaborado con sustitución parcial de cemento Chimborazo tipo HE por piroclastos provenientes de los volcanes Tungurahua y Sangay [27].

A través de ellos ensayos, se evaluaron experimentalmente las propiedades mecánicas y físicas del hormigón, analizando su resistencia a la compresión, densidad y permeabilidad mediante procedimientos normalizados y mediciones objetivas.

3.1.2. Tipo de investigación

De acuerdo con [27], la presente investigación fue de tipo experimental y aplicada. Fue experimental debido a que se manipuló intencionalmente la variable independiente correspondiente al porcentaje de sustitución parcial del cemento Chimborazo tipo HE por piroclastos provenientes de los volcanes Tungurahua y Sangay, con la finalidad de evaluar su efecto sobre las propiedades mecánicas y físicas del hormigón.

Asimismo, la investigación fue aplicada, porque los resultados buscan aportar una alternativa técnica para el aprovechamiento de materiales volcánicos naturales en la industria de la construcción.

3.1.3. Alcance de la investigación

El alcance fue de tipo explicativo, debido a que buscó determinar la influencia de la sustitución parcial del cemento Chimborazo tipo HE por piroclastos provenientes de los volcanes Tungurahua y Sangay sobre las propiedades mecánicas y físicas del hormigón, específicamente la resistencia a la compresión, densidad y permeabilidad [27].

Asimismo, el estudio presentó un componente descriptivo relacionado con la caracterización física y química de los piroclastos utilizados, mediante el análisis de sus propiedades y composición como material puzolánico potencial [27].

3.1.4. Diseño experimental

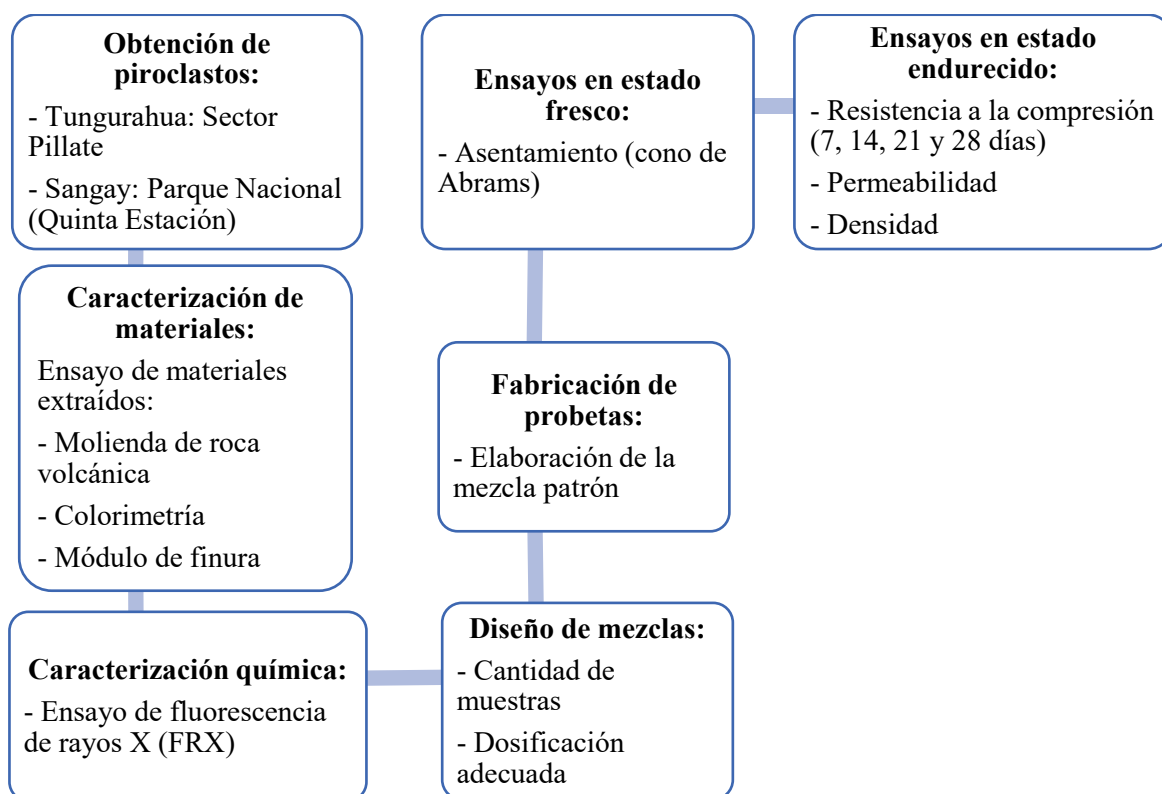


Figura 1. Metodología de investigación de proyecto.

La metodología experimental se estructuró en varias etapas secuenciales, iniciando con la obtención y caracterización (física-química) de piroclastos hasta la evaluación de las propiedades mecánicas del hormigón en su estado endurecido. La Figura 1 muestra el proceso metodológico aplicado durante la investigación.

3.1.4.1. Obtención de material piroclástico

La obtención de piroclastos volcánicos se realizó en zonas estratégicas de fácil acceso vehicular y peatonal, localizadas en sectores cercanos a los cauces de agua de cada volcán. Para el volcán Tungurahua, la obtención del material se efectuó en el sector Pillate, mientras que para el volcán Sangay se realizó en el Parque Nacional Sangay, específicamente en el sector Quinta Estación.

Para seleccionar los piroclastos a simple vista, se realizó considerando materiales de baja densidad aparente de color gris claro, que son las que se suelen encontrar en la superficie de los depósitos volcánicos.

Sin embargo, el material recolectado no corresponde completamente a un depósito representativo en su estado original, debido a que ha sido transportado naturalmente durante varios kilómetros desde el punto de emisión volcánica por acción hídrica y procesos de arrastre. Esta condición constituye una limitante en la representatividad geológica del material utilizado en la investigación.

Posteriormente, los piroclastos obtenidos fueron almacenados en costales de porcelana, recolectándose aproximadamente 50 kg de material pétreo para su posterior acondicionamiento, trituración y caracterización experimental.

Como referencia para la selección y manejo del material granular se consideraron los criterios establecidos en la norma ASTM C33, relacionados con la gradación granulométrica, limpieza del material y requisitos generales para agregados empleados en hormigón [28].

3.1.4.2. Caracterización de materiales

La caracterización de materiales comprendió el acondicionamiento físico de los piroclastos, así como la evaluación de los agregados, cemento y materiales complementarios empleados en la elaboración del hormigón. Los ensayos se ejecutaron conforme a las normas ASTM correspondientes, principalmente ASTM C136, ASTM C117 y ASTM C40, además de los criterios de preparación de materiales puzolánicos de la norma ASTM C618 [29], [30], [31], [32].

Los materiales utilizados en la presente investigación fueron seleccionados en función de sus propiedades físicas:

- Cemento Chimborazo tipo HE.
- Piroclastos del volcán Tungurahua y Sangay.
- Agregado fino: arena natural cuyas partículas fueron menores a 4.75 mm, de textura rodada y libre de impurezas a simple vista.
- Agregado grueso: piedras de río con tamaño promedio de $\frac{3}{4}$ ".

3.1.4.2.1. Molienda de roca volcánica

Una vez recolectadas las muestras de piroclastos, estas fueron sometidas a un proceso de secado en horno de laboratorio marca Humboldt, modelo H-30135, con control de temperatura analógico mediante termostato y un rango de operación de 150 °C a 550 °C, hasta alcanzar masa constante. Posteriormente, el material seco fue triturado mediante un molino mecánico manual de accionamiento por manivela, sin identificación de marca ni modelo, que opera mediante un sistema de compresión y fricción para la reducción del tamaño de partícula.

El material procesado fue almacenado en condiciones secas para evitar alteraciones por humedad. Este procedimiento se realizó como etapa previa de acondicionamiento del material, conforme a los criterios de preparación de materiales utilizados en la norma ASTM C618 [31].

3.1.4.2.2. Colorimetría

El ensayo de colorimetría se aplicó en las muestras de piroclastos triturados provenientes de Tungurahua y Sangay con el fin de detectar la presencia de impurezas orgánicas. El proceso consistió en mezclar el piroclasto triturado con la solución reactiva correspondiente y comparar la tonalidad obtenida con la escala estándar.

Este análisis se realizó conforme a la norma ASTM C40, la cual permite identificar la posible presencia de sustancias orgánicas que puedan afectar el comportamiento del hormigón [32].

3.1.4.2.3. Módulo de finura

El módulo de finura fue determinado a partir de la distribución granulométrica del material procesado, con el propósito de verificar su uniformidad y su adecuación como material complementario en la elaboración del hormigón. Para ello se utilizaron los procedimientos de tamizado establecidos en las normas ASTM C136 y ASTM C117, mediante los cuales se obtuvo la fracción retenida y la fracción fina pasante del material [29], [30].

3.1.4.3. Caracterización química

La caracterización química de los piroclastos se realizó mediante el ensayo de fluorescencia de rayos X (FRX), con el propósito de identificar la composición química elemental del material proveniente de los volcanes Tungurahua y Sangay. Este análisis fue ejecutado en la Universidad Nacional de Colombia, institución en la que se procesaron los piroclastos para determinar los óxidos y componentes químicos presentes.

El ensayo se efectuó tomando como referencia la norma ASTM C618, la cual establece criterios para la evaluación de materiales puzolánicos naturales y su posible utilización en materiales cementicios [31].

3.1.4.4. Diseño de mezclas

Con base en los resultados de la caracterización física y química, se procedió al diseño de mezclas de hormigón utilizando una dosificación de 1: 1.53: 1.65: 0.52, correspondiente a la relación cemento, agregado fino, agregado grueso y agua, respectivamente.

A partir de esta dosificación base, se reemplazó parte del cemento con piroclastos triturados de los volcanes Tungurahua y Sangay para analizar su comportamiento en la mezcla. Este diseño permitió establecer una fase piloto de comparación entre el N-HE y las mezclas experimentales T-HE y S-HE.

3.1.4.4.1. Nomenclatura de las mezclas de hormigón

Para la identificación de las mezclas de hormigón empleadas en la presente investigación, se estableció la siguiente nomenclatura:

- T-HE: hormigón elaborado con sustitución parcial de cemento por piroclastos triturados del volcán Tungurahua.
- S-HE: hormigón elaborado con sustitución parcial de cemento por piroclastos triturados del volcán Sangay.
- N-HE: hormigón convencional o patrón sin sustitución de cemento.

Con el fin de simplificar la presentación de los datos, estas siglas se emplearon a lo largo de los gráficos, tablas y análisis del estudio.

3.1.4.5. Fabricación de probetas

La fabricación de probetas se realizó bajo condiciones controladas de laboratorio, siguiendo la dosificación establecida y procurando la homogeneidad de la mezcla. Los materiales secos fueron mezclados de forma manual, incorporando posteriormente el agua de manera gradual hasta obtener una mezcla uniforme. El hormigón fue colocado en moldes cilíndricos de 10 cm de diámetro por 20 cm de altura, compactado mediante vibrado manual y desmoldado a las 24 horas, conforme a la norma ASTM C192 [33].

3.1.4.5.1. Fase piloto

En la fase piloto se elaboraron probetas con sustituciones parciales del 5 %, 4 % y 3 % de cemento por piroclastos de Tungurahua y Sangay, además de una mezcla control sin sustitución. Estas probetas se curaron en agua y se ensayaron a los 7 días para identificar el porcentaje más adecuado de reemplazo.

3.1.4.5.2. Fase final

Una vez definido el porcentaje óptimo de sustitución, se elaboraron las probetas definitivas para el análisis final. Estas probetas se curaron hasta las edades de 7, 14, 21 y 28 días, y fueron destinadas a los ensayos de resistencia, densidad y permeabilidad.

3.1.4.6. Ensayos del hormigón en estado fresco

Los ensayos en estado fresco permitieron evaluar la trabajabilidad de las mezclas antes del endurecimiento. El procedimiento se realizó siguiendo la norma ASTM C143 para el asentamiento del hormigón y ASTM C192 para la compactación de las probetas [33], [34].

3.1.4.6.1. Asentamiento del hormigón

El asentamiento se determinó mediante el cono de Abrams, con el fin de evaluar la consistencia y trabajabilidad de las mezclas elaboradas con sustitución parcial de piroclastos, conforme a la norma ASTM C143 [34].



Figura 2. Ensayo de asentamiento (cono de Abrams) para mezclas de T-HE, S-HE y N-HE.

3.1.4.6.2. Vibrado manual

La compactación de las probetas se realizó mediante vibrado manual, con el propósito de eliminar vacíos y asegurar una adecuada densificación de la mezcla, de acuerdo con la norma ASTM C192 [33].

3.1.4.7. Ensayos del hormigón en estado endurecido

Los ensayos se realizaron para evaluar el comportamiento mecánico y físico del hormigón con sustitución parcial de cemento tipo HE, aplicando las normas ASTM y ACI correspondientes a cada prueba

3.1.4.7.1. Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión del hormigón se determinó mediante ensayos realizados en probetas cilíndricas de 10 cm de diámetro y 20 cm de altura, conforme a la norma ASTM C39 [35]. [35]. Las pruebas se efectuaron utilizando una prensa hidráulica con capacidad de 1780 kN, identificada como equipo EI-001, utilizada para registrar la carga máxima soportada por cada probeta hasta su falla.

A los 7 días de curado se llevó a cabo el ensayo de la fase piloto, lo que permitió evaluar el porcentaje óptimo de reemplazo parcial del cemento mediante el uso de piroclastos de ambos volcanes (Tungurahua y Sangay).

Posteriormente, en la fase final, las probetas fueron evaluadas a las edades de 7, 14, 21 y 28 días.

3.1.4.7.2. Densidad

Permitió determinar la densidad mediante la relación de masa obtenida en balanza y volumen de la probeta. Este procedimiento se realizó conforme a la norma ASTM C642, garantizando una correcta determinación de la densidad [36].

La masa de las probetas fue determinada mediante una balanza digital electrónica marca Electronic Solution, modelo U-1027, con capacidad aproximada de 30 kg y una resolución de 0.001 kg (1 g), mientras que el volumen se obtuvo a partir de sus dimensiones geométricas, permitiendo calcular la densidad del hormigón endurecido mediante la relación masa/volumen.

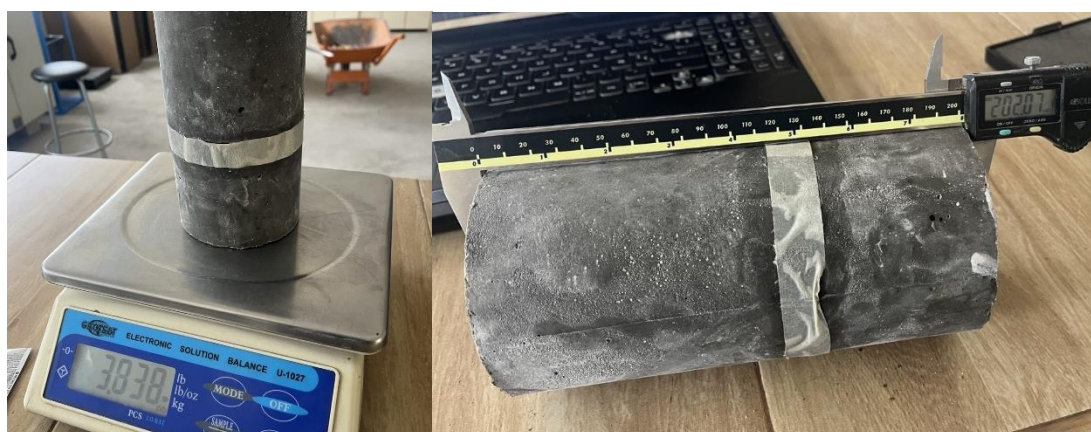


Figura 3. Registro de masa y dimensiones geométricas de la probeta para el cálculo de densidad.

Para determinar la densidad bajo la norma ASTM C642, se analizaron 16 probetas de cada material mediante la relación masa/volumen empleando 4 réplicas para cada una de las edades evaluadas (7, 14, 21 y 28 días). Los resultados se procesaron estadísticamente para obtener valores promedio por edad y un valor global.

3.1.4.7.3. Permeabilidad

El ensayo de permeabilidad se realizó mediante un equipo de infiltración superficial conforme a la norma ACI 522R-10 [37], marca Humboldt, modelo HM-5801, empleado en el Laboratorio Integral de la Construcción. El dispositivo es un permeámetro mecánico de carga constante, adaptado para realizar el ensayo de acuerdo con la norma ACI 522 R. Al ser un equipo mecánico no se tiene una resolución propia de ml, ni de segundos, la resolución usada en ml es con probetas graduadas con 1 ml y el tiempo se mide con un cronómetro digital con apreciación de 1 segundo. A partir de estos parámetros se determinó la tasa de infiltración y el coeficiente de permeabilidad del material.

En esta investigación, no se emplearon normas como la BS EN 12390-8 o la DIN 1048-5, ya que estas se enfocan en la penetración de agua bajo presión, mientras que en este estudio se evaluó el coeficiente de permeabilidad mediante el flujo de agua a través del hormigón.

3.1.5. Población de estudio

La población de estudio estuvo constituida por los hormigones elaborados a partir de la sustitución parcial del cemento Chimborazo tipo HE con piroclastos de los volcanes Tungurahua y Sangay.

Esta estuvo compuesta por las probetas cilíndricas de hormigón elaboradas con sustituciones parciales de cemento en proporciones del 5 %, 4 % y 3 %, utilizando piroclastos triturados del Tungurahua y del Sangay como materiales alternativos. Adicionalmente, se realizó una comparativa piloto con N-HE. Se conformaron dos grupos de trabajo, uno por cada volcán. Cada porcentaje de sustitución fue evaluado mediante ensayos de resistencia a la compresión a los 7 días de curado. Se plantea la siguiente ecuación:

$$N^{\circ}\text{probetas} = \# \text{ de proporciones} \times \# \text{ de material} \times \# \text{ edades de curado} \\ \times \# \text{ probetas de ensayo estadístico} \quad \text{Ec. 1}$$

Mediante (1), entonces se obtuvo un total de 18 probetas, utilizadas para determinar el porcentaje óptimo de sustitución parcial de cemento por piroclasto triturado. Obtenido este resultado, nuevamente mediante la ecuación (1), se determinó la cantidad de 48 probetas con el porcentaje óptimo del 4 % de sustitución para cada material proveniente de los volcanes Tungurahua y Sangay. Estas probetas fueron ensayadas a 7, 14, 21 y 28 días de curado para evaluar su resistencia a la compresión. Adicionalmente, se realizaron 12 probetas para ensayo de permeabilidad.

3.1.6. Variables de investigación

3.1.6.1. Variable independiente

La variable independiente correspondió a la sustitución parcial del cemento Chimborazo tipo HE por piroclastos provenientes de los volcanes Tungurahua y Sangay, empleando diferentes porcentajes de reemplazo dentro de las mezclas de hormigón.

3.1.6.2. Variable dependiente

La variable dependiente estuvo constituida por las propiedades mecánicas y físicas del hormigón elaborado con sustitución parcial de cemento, evaluadas mediante ensayos de resistencia a la compresión, densidad y permeabilidad.

3.1.7. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

La recolección de datos se realizó mediante ensayos de laboratorio utilizando procedimientos normalizados basados en normas ASTM e INEN. Las principales técnicas aplicadas fueron:

- Recolección y procesamiento de los piroclastos.
- Ensayos de caracterización física y química de los materiales.
- Elaboración de mezclas piloto y mezcla definitiva con sustitución de cemento.
- Medición de las propiedades químicas y físicas en laboratorio.
- Registro sistemático de los resultados mediante formatos de laboratorio y hojas de cálculo.

3.1.8. Método de análisis procesamiento de datos

El procesamiento de los datos obtenidos se realizó bajo un enfoque cuantitativo, siguiendo la secuencia propuesta por [27] para el análisis de datos cuantitativos. En esta etapa, los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio fueron organizados, tabulados y analizados mediante estadística descriptiva, con el propósito de evaluar el comportamiento del S-HE y T-HE.

3.1.8.1. Método analítico

El método analítico permitió descomponer y evaluar de manera específica las variables analizadas en la investigación, principalmente la resistencia a la compresión, densidad y permeabilidad, mediante la comparación entre las mezclas patrón y aquellas elaboradas con sustitución parcial de cemento por piroclastos.

Este análisis buscó identificar diferencias y tendencias en el comportamiento experimental de las mezclas, evaluando la variación de los resultados dentro de cada grupo de probetas. Estos datos se organizaron en tablas y figuras para facilitar su interpretación y comparación.

3.1.8.2. Criterio de depuración de datos experimentales

Para el procesamiento de los resultados de resistencia a la compresión, se realizó una revisión preliminar de la dispersión de los datos mediante el cálculo del coeficiente de variación de cada grupo experimental.

Cuando el coeficiente de variación preliminar superó el 10 %, se identificó la probeta con mayor desviación respecto a la media. Este valor en todos los casos correspondió a la menor resistencia a la compresión del grupo, lo que evidenció un comportamiento no representativo frente a la tendencia general de los resultados registrados.

Por esta razón, dichos valores fueron considerados atípicos y excluidos del análisis estadístico, procediéndose posteriormente al recálculo de la media aritmética, desviación estándar y coeficiente de variación con los datos depurados.

A través de este procedimiento se consiguieron resultados con mayor homogeneidad y representatividad, sin alterar la tendencia experimental observada en cada grupo de mezclas.

3.1.8.3. Análisis estadístico de fase piloto

El porcentaje óptimo de reemplazo se determinó a partir del análisis de los resultados de resistencia a la compresión obtenidos a los 7 días de curado en las mezclas piloto con porcentajes de sustitución del 3 %, 4 % y 5 % de cemento por piroclastos triturados de Tungurahua y Sangay.

Para el procedimiento de los datos de laboratorio se empleó estadística descriptiva, utilizando la media aritmética, la desviación estándar y el coeficiente de variación. Mediante estos indicadores se evaluó la dispersión de los resultados y comparó el comportamiento de las diferentes mezclas experimentales.

Con base en este análisis, se seleccionó el porcentaje óptimo de sustitución parcial del cemento considerando el comportamiento mecánico registrado en las probetas ensayadas. No se aplicaron métodos de estadística inferencial, ya que el estudio se centró en la evaluación experimental y comparativa de los resultados obtenidos en laboratorio

3.1.9. Cronograma de trabajo de investigación

Mediante una estructura de distribución de tareas (EDT) se detalla las actividades en tiempo y secuencia conforme a la metodología descrita, esta se encuentra en la Tabla 1.

Tabla 1. Estructura de distribución de tareas (EDT)

Ítem	Nombre de tarea	Predecesoras	Tiempo (días)
1	Análisis del problema de investigación	—	1
2	Revisión bibliográfica (artículos científicos)	1	1
3	Evaluación de las deficiencias en el conocimiento del problema	2	1
4	Formulación de la pregunta de investigación	3	1
5	Definición de objetivos de investigación	4	1
6	Planteamiento de hipótesis	5	1
7	Desarrollo del marco teórico	6	3
8	Diseño metodológico de la investigación	7	2
9	Obtención de piroclastos de los volcanes Tungurahua y Sangay	8	3
10	Caracterización de piroclastos triturados: ensayos granulométricos y colorimétricos	9	7
11	Determinación del porcentaje óptimo de reemplazo mediante ensayos piloto de resistencia a la compresión	10	7
12	Fabricación de probetas con la mezcla optimizada	11	3
13	Evaluación de resistencia a la compresión y densidad a 7, 14, 21 y 28 días	12	28
14	Ensayo de permeabilidad	12	28
15	Caracterización química de los piroclastos triturados (FRX)	12	9
16	Procesamiento y análisis de datos	13, 14, 15	2
17	Presentación y discusión de resultados (respuesta a la hipótesis)	16	2
18	Elaboración de conclusiones y recomendaciones	17	2
19	Compilación de bibliografía	18	2
20	Revisión final del documento	19	1

CAPÍTULO IV

4.1. Resultados y discusión

En este capítulo se presentan y analizan los resultados obtenidos en la caracterización de los piroclastos y en los ensayos realizados al hormigón con sustitución parcial de cemento por piroclasto triturado del volcán Tungurahua y Sangay.

4.1.1. Caracterización de los piroclastos y agregados

Esta sección integra todos los ensayos aplicados al piroclasto triturado y clasificado (Tungurahua y Sangay).

4.1.1.1. Granulometría

Las curvas granulométricas correspondientes al piroclasto triturado de los volcanes Tungurahua y Sangay, así como de los agregados fino y grueso, se presentan en la Figura 4, Figura 5, Figura 6 y Figura 7.

Al realizar el análisis granulométrico del piroclasto triturado del volcán Tungurahua, se observó que la curva se salió del límite mínimo en el tamiz de 2.36 mm y superó el límite máximo en los tamices de 0.15 mm y 0.075 mm.

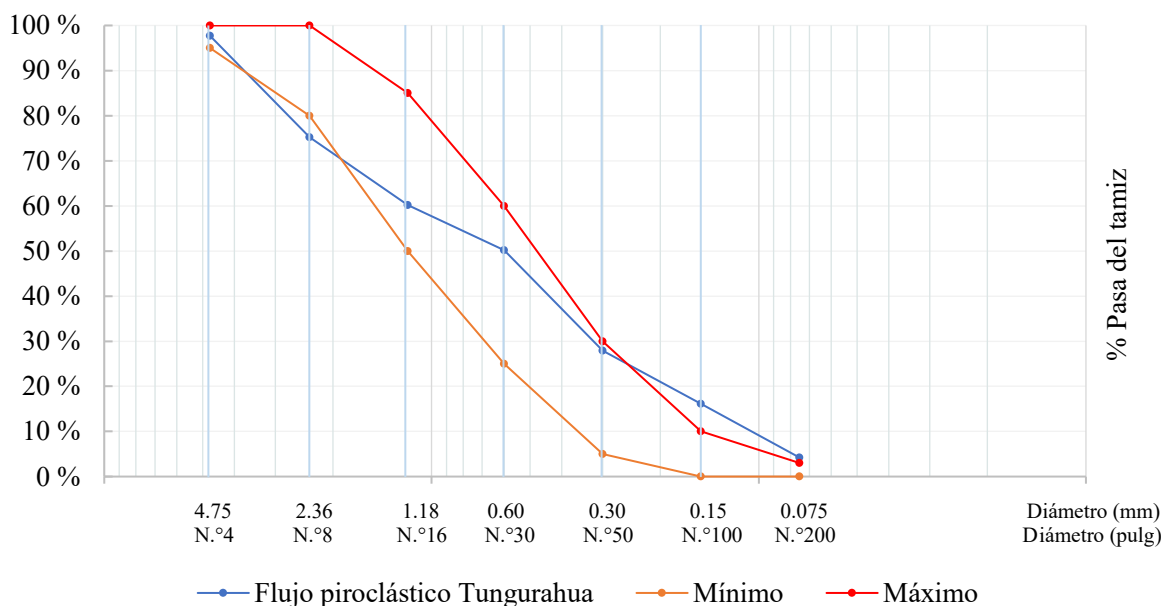


Figura 4. Curva granulométrica de piroclasto triturado del volcán Tungurahua.

En la Figura 4 se aprecia una menor cantidad de partículas de tamaño intermedio y una mayor presencia de material fino en los tamices más pequeños. Esta distribución granulométrica puede aumentar la demanda de agua de la mezcla y modificar su trabajabilidad, pero también favorecer una mejor compactación.

En el ensayo granulométrico del piroclasto triturado del volcán Sangay se observó que la curva superó el límite máximo en los tamices de 0.15 mm y 0.075 mm.

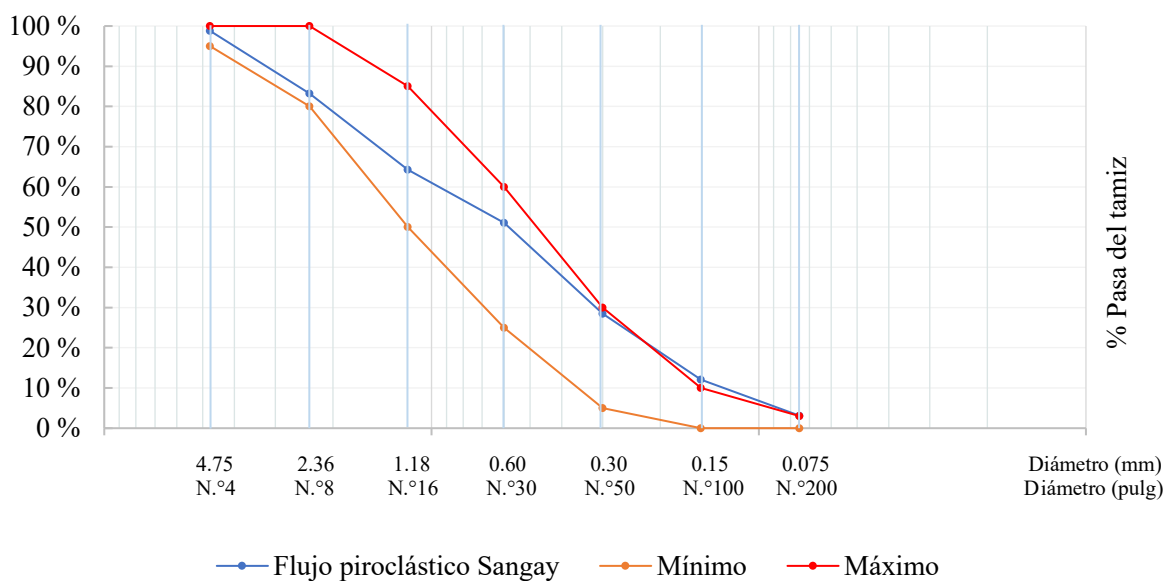


Figura 5. Curva granulométrica de piroclasto triturado del volcán Sangay.

En la Figura 5 puede apreciarse una acumulación más relevante de partículas en los tamices de menor abertura. La distribución obtenida refleja una presencia importante de material fino dentro de la muestra, condición que favorece la cohesión entre partículas y puede contribuir a una mejor integración de los componentes de la mezcla durante su preparación.

El ensayo granulométrico del agregado fino lavado evidenció que la curva se salió del límite mínimo en el tamiz de 2.36 mm y del límite máximo en el tamiz de 0.15 mm.

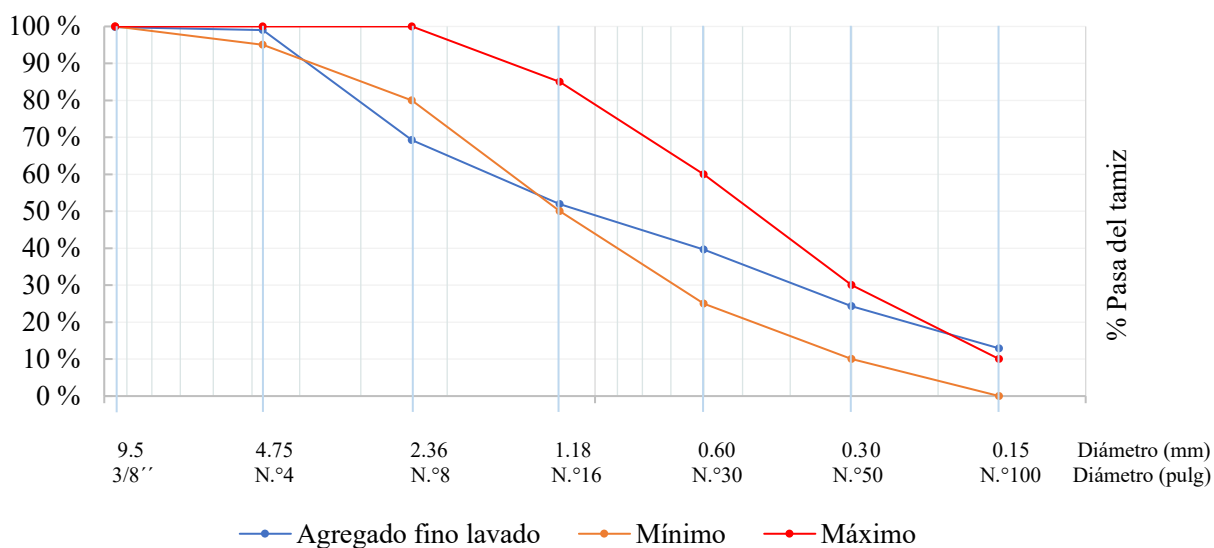


Figura 6. Curva granulométrica de agregado fino lavado.

En la Figura 6 se observa una distribución con menor presencia de partículas intermedias y mayor proporción de finos. Esto puede favorecer la compacidad de la mezcla.

Durante el análisis granulométrico del agregado grueso $\frac{3}{4}$, la curva se mantuvo cercana al límite máximo en la mayor parte del rango evaluado.

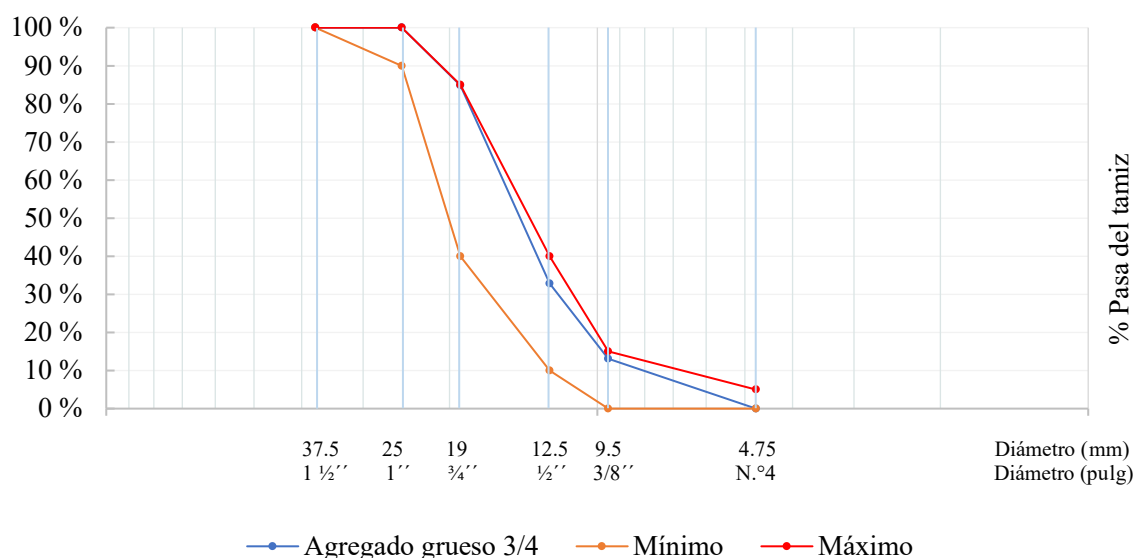


Figura 7. Curva granulométrica de agregado grueso $\frac{3}{4}$ ".

En la Figura 7 se observa una distribución granulométrica relativamente uniforme, con una tendencia a estar cerca del límite superior. Este comportamiento indica un material cumple con los requisitos para su utilización en la mezcla, aunque con presencia de una fracción algo más fina de la esperada.

Siguiendo las normas ASTM C136 y ASTM C117, se determinó el módulo de finura de los piroclastos triturados de los volcanes Tungurahua y Sangay, además de los agregados fino y grueso utilizados en la mezcla. Las curvas se presentan en la Figura 4 a Figura 7 y los valores obtenidos se resumen en la Tabla 2.

Tabla 2. Módulos de finura obtenidos para los materiales evaluados

Componente	Módulo de finura
Piroclasto triturado del volcán Sangay	2.62
Piroclasto triturado del volcán Tungurahua	2.727
Agregado fino lavado	3.031
Agregado grueso $\frac{3}{4}$	2.693

Los módulos de finura de la Tabla 2 muestran que los piroclastos triturados del Tungurahua y Sangay se encuentran en el rango permitido por la norma ASTM C33, lo que los hace aptos para su uso en hormigón. Así también, los agregados fino y grueso cumplen con la norma. En conjunto, los materiales pueden incorporarse en la mezcla. El piroclasto utilizado correspondió a la fracción pasante del tamiz N.º 200, verificándose su finura mediante análisis granulométrico.

4.1.1.2. Colorimetría

Los resultados del ensayo de colorimetría se presentaron en la Figura 8 y Figura 9. Los resultados obtenidos indicaron que el piroclasto triturado del volcán Tungurahua obtuvo un valor de 1, mientras que el material del volcán Sangay obtuvo un valor de 5, presentando una coloración más oscura respecto al estándar.



Figura 8. Ensayo colorimétrico ASTM C-40 de piroclasto triturado del volcán Tungurahua.



Figura 9. Ensayo colorimétrico ASTM C-40 de piroclasto triturado del volcán Sangay.

De acuerdo con la evaluación de la norma ASTM C40, el piroclasto del volcán Tungurahua evidencia una presencia mínima de impurezas orgánicas, asegurando su compatibilidad con el hormigón. Esta condición se diferencia de la observada en el piroclasto del volcán Sangay,

que tiene un aspecto notablemente oscuro sugiriendo una mayor carga de materia orgánica, el cual puede afectar el desempeño mecánico del hormigón.

4.1.1.3. Fluorescencia de rayos X (FRX)

Los resultados correspondientes a los principales óxidos presentes en las muestras del volcán Tungurahua y del volcán Sangay se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Composición química obtenida mediante fluorescencia de rayos X (FRX) para los piroclastos triturados del Tungurahua y Sangay

Nombre	Compuesto	Sangay (%)	Tungurahua (%)
Silicio	SiO ₂	53,65 %	55,64 %
Aluminio	Al ₂ O ₃	18,52 %	18,30 %
Hierro	Fe ₂ O ₃	8,27 %	7,29 %
Calcio	CaO	8,23 %	7,21 %
Sodio	Na ₂ O	4,58 %	4,81 %
Magnesio	MgO	2,87 %	2,69 %
Potasio	K ₂ O	1,80 %	2,15 %
Titanio	TiO ₂	1,03 %	0,91 %
Fósforo	P ₂ O ₅	0,31 %	0,29 %
Bario	Ba	0,14 %	0,16 %
Manganeso	MnO	0,13 %	0,13 %
Cloro	Cl	0,12 %	0,10 %
Estroncio	Sr	0,12 %	0,10 %
Azufre	S	0,07 %	0,08 %
Estaño	Sn	0,06 %	0,02 %

Fuente: Elaboración propia a partir de resultados del ensayo fluorescencia de rayos X (FRX) realizado por la Universidad Nacional de Colombia [38].

Se identifica que las dos muestras presentan valores elevados de SiO₂, siendo el componente predominante de la composición química de cada piroclasto. Sin embargo, el piroclasto triturado proveniente del volcán Tungurahua muestra una diferencia ligeramente superior de 1.99 % respecto al volcán Sangay. Enfocándose en un punto teórico, un mayor contenido de sílice ayuda en la reactividad puzolánica del material, asociándose al incremento de la resistencia a la compresión del hormigón. Esta relación se corrobora con los ensayos de resistencia a la compresión como se analiza en el apartado 4.1.2.3.

4.1.2. Propiedades del hormigón

Se presentan los resultados y análisis obtenidos para el hormigón fresco y endurecido elaborado con sustitución parcial de cemento por piroclasto triturado de los volcanes Tungurahua y Sangay.

4.1.2.1. Selección del porcentaje óptimo de sustitución

Para la selección del porcentaje óptimo de sustitución parcial del cemento, se analizaron los resultados de resistencia a la compresión obtenidos en las mezclas piloto correspondientes a los porcentajes del 3 %, 4 % y 5 %. Estos resultados se presentan en la Tabla 4:

Tabla 4. Resistencia a la compresión a los 7 días en mezclas piloto

% de reemplazo	Probeta 1 (MPa)	Probeta 2 (MPa)	Probeta 3 (MPa)	Promedio (MPa)	Desviación Estándar (MPa)	C.V. (%)
T-HE						
3%	20.064	15.768	18.733	18.188	2.199	12.09
4%	18.802	20.498	21.429	20.243	1.332	6.58
5%	13.521	13.569	13.962	13.684	0.242	1.77
S-HE						
3%	14.92	15.024	16.148	15.364	0.681	4.43
4%	15.851	19.319	17.409	17.526	1.737	9.91
5%	13.004	12.08	17.706	14.263	3.017	21.15

A partir de los resultados presentados en la Tabla 4, se observa que el porcentaje de sustitución del 4 % presenta los mayores valores promedio de resistencia a la compresión en ambos materiales evaluados. En el caso de la mezcla de T-HE, el 4 % alcanzó un promedio de 20.243 MPa, superando al 3 % y al 5 %.

El mayor coeficiente de variación se presenta con el 5 % de sustitución de piroclasto del volcán Sangay, indicando menor uniformidad. Por el contrario, la sustitución con el 4% muestra un comportamiento más estable, especialmente en las mezclas con cemento T-HE.

4.1.2.2. Asentamiento (Slump Test)

El asentamiento que se obtuvo muestra valores muy cercanos entre los tres grupos con pocas variaciones. Se evidencia en la Tabla 5:

Tabla 5. Asentamientos (Slump)

Grupo	Volcán / Tipo	% Reemplazo	Slump (cm)
1	Tungurahua	4 %	20.61
2	Sangay	4 %	20.5
3	Normal	—	20.2

La sustitución del 4 % de cemento por piroclasto triturado no altera de manera apreciable la trabajabilidad del hormigón fresco en comparación con la mezcla convencional. Estas pequeñas diferencias pueden atribuirse a la absorción del piroclasto, pero es un efecto mínimo.

4.1.2.3. Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión se evaluó a los 7, 14, 21 y 28 días para las mezclas elaboradas con 4 % de sustitución de cemento por piroclasto triturado, comparándolas con el N-HE. Cada mezcla se evaluó con 4 probetas por edad.

Tabla 6. Dosificación en peso (kg) de las mezclas de T-HE, S-HE y N-HE, con proporciones 1:1.53:1.65:0.52

Materiales	Volcán Tungurahua	Volcán Sangay	Estándar
Piroclasto	0.51 kg	0.51 kg	0 kg
Cemento HE	12.34 kg	12.34 kg	12.85 kg
Arena río	19.61 kg	19.61 kg	19.61 kg
Grava 3/4	21.20 kg	21.20 kg	21.20 kg
Agua	6.64 kg	6.64 kg	6.64 kg

Para la dosificación 1:1.53:1.65:0.52 correspondiente a la mezcla de T-HE con 4 % de sustitución, se ensayaron 4 probetas por edad. Después de eliminar los valores atípicos, los resultados se presentan en la Tabla 7. Previo al análisis, se identificaron y eliminaron valores atípicos conforme al criterio establecido en la metodología, los cuales presentaban una desviación notoria respecto al comportamiento general de las probetas ensayadas. Esta depuración permitió reducir la dispersión de los datos y obtener resultados más representativos del comportamiento real del material.

Previo al análisis de los resultados de resistencia a la compresión, se aplicó el criterio de depuración de datos. En este proceso se excluyeron 4 valores atípicos identificados en la Tabla 7 y Tabla 9, correspondientes a probetas que presentaron las menores resistencias dentro de sus respectivos grupos y que no representaban la tendencia general del comportamiento del material.

Tabla 7. Resistencia a la compresión de la mezcla de T-HE con 4% de sustitución (dosificación 1:1.53:1.65:0.52) a diferentes edades

Edad	Masa [kg]	kN	MPa	kg/cm ²	C.V [%]
T-HE-Ensayo a los 7 días	3.855	168.134	20.50	209.00	10.80
	3.972	191.007	23.39	238.48	
	3.824	186.871	22.77	232.15	
	3.870	148.387	18.36	187.19	
T-HE-Ensayo a los 14 días	3.838	256	31.7	323.23	12.67
	3.82	243.9	30.11	307.04	
	3.785	196.3	24.20	246.80	
	3.812	264.3	32.51	331.55	
T-HE-Ensayo a los 21 días	3.833	305.8	37.26	379.94	1.63
	3.822	301.6	37.12	378.52	
	3.91	311.1	38.47	392.33	
	3.827	312.4	37.76	385.08	
T-HE-Ensayo a los 28 días	3.908	282.9	34.64	353.25	6.39
	3.856	324.1	39.72	405.01	
	3.771	321.1	38.88	396.46	
	3.941	295.1	36.02	367.33	

Nota: Los valores en negrita corresponden a resultados atípicos identificados durante el análisis de dispersión, los cuales fueron evaluados para su exclusión conforme al criterio de depuración establecido.

Con base en la depuración descrita, se recalculó los parámetros estadísticos de cada grupo experimental considerando únicamente los valores representativos. En la Tabla 8 se presentan la media, la desviación estándar y el coeficiente de variación de la resistencia a la compresión obtenidos a partir de estos datos eliminados.

Tabla 8. Resultados depurados de resistencia a la compresión de la mezcla de T-HE con 4% de sustitución (dosificación 1:1.53:1.65:0.52) a diferentes edades

Edad	Masa [kg]	kN	MPa	kg/cm ²	C.V [%]
T-HE-Ensayo a los 7 días	3.855	168.134	20.50	209.00	6.85
	3.972	191.007	23.39	238.48	
	3.824	186.871	22.77	232.15	
T-HE-Ensayo a los 14 días	3.838	256	31.7	323.23	3.89
	3.82	243.9	30.11	307.04	
	3.812	264.3	32.51	331.55	
T-HE-Ensayo a los 21 días	3.833	305.8	37.26	379.94	1.63
	3.822	301.6	37.12	378.52	
	3.91	311.1	38.47	392.33	
	3.827	312.4	37.76	385.08	
T-HE-Ensayo a los 28 días	3.908	282.9	34.64	353.25	6.39
	3.856	324.1	39.72	405.01	
	3.771	321.1	38.88	396.46	
	3.941	295.1	36.02	367.33	

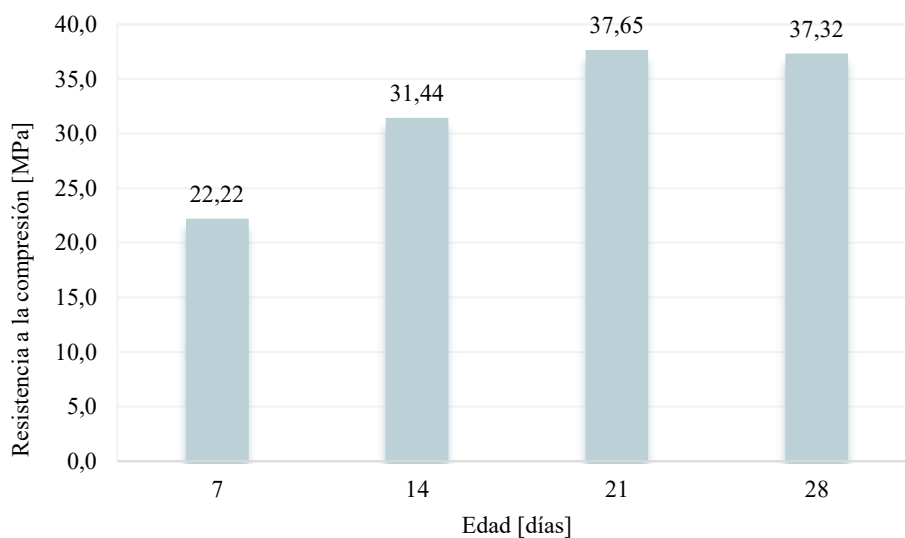


Figura 10. Desarrollo de resistencia de la mezcla de T-HE en función del tiempo de curado.

En la Figura 10 se observaron los valores de resistencia a la compresión de la mezcla de T-HE con 4 % de sustitución. Se evidenció un incremento progresivo hasta alcanzar una resistencia final de 37.32 MPa a los 28 días, lo que mostró un comportamiento creciente de la resistencia con la edad de curado en las mezclas evaluadas. El mayor incremento de resistencia se presenta entre los 7 y 14 días, pasando de 22.22 MPa a 31.44 MPa, lo que

representa un aumento aproximado del 41.49 %, indicando un rápido desarrollo inicial de la hidratación del cemento. Posteriormente, entre los 14 y 21 días, la resistencia continuó aumentando hasta alcanzar 37.65 MPa, con un incremento adicional de aproximadamente 19.75 %, mostrando una tendencia hacia la estabilización del material.

A los 21 días, la resistencia a la compresión alcanzó 37.65 Mpa, mientras que a los 28 días es de 37.32 MPa. La variación de 0.33 MPa (≈ 0.88 %) se encuentra dentro del rango de dispersión experimental, por lo que el material presenta un desempeño consistente. Esta diferencia puede atribuirse a las condiciones del ensayo y al comportamiento normal del hormigón en edades avanzadas de curado.

A continuación, para la misma dosificación de la mezcla de S-HE con 4 % de sustitución, los resultados se presentan en la Tabla 9:

Tabla 9. Resistencia a la compresión de la mezcla de S-HE con 4% de sustitución (dosificación 1:1.53:1.65:0.52) a diferentes edades

Edad	Masa [kg]	kN	MPa	kg/cm ²	C.V [%]
S-HE-Ensayo a los 7 días	3.854	151.4	18.60	189.62	3.62
	3.905	152.8	18.58	189.46	
	3.92	141.6	17.27	176.07	
	3.914	144.8	17.75	181.02	
S-HE-Ensayo a los 14 días	3.913	215.5	26.63	271.53	9.74
	3.867	264.3	32.30	329.41	
	3.914	220.6	26.82	273.49	
	3.911	251.6	30.69	312.93	
S-HE-Ensayo a los 21 días	3.78	293.6	35.43	361.27	6.68
	3.908	258.1	31.27	318.89	
	3.9	251.7	30.84	314.47	
	3.744	278.1	34.00	346.67	
S-HE-Ensayo a los 28 días	3.941	293.8	35.94	366.53	12.06
	3.883	294.1	36.21	369.26	
	3.888	232	28.32	288.78	
	3.846	310.6	37.44	381.82	

Nota: Los valores en negrita corresponden a resultados atípicos identificados durante el análisis de dispersión, los cuales fueron evaluados para su exclusión conforme al criterio de depuración establecido.

En la Tabla 10 se presentan los resultados de resistencia a la compresión obtenidos a partir de los datos depurados, incluyendo la media, desviación estándar y coeficiente de variación.

Tabla 10. Resultados depurados de resistencia a la compresión de la mezcla de S-HE con 4% de sustitución (dosificación 1:1.53:1.65:0.52) a diferentes edades

Edad	Masa [kg]	kN	MPa	kg/cm ²	C.V [%]
S-HE-Ensayo a los 7 días	3.854	151.4	18.60	189.62	3.62
	3.905	152.8	18.58	189.46	
	3.92	141.6	17.27	176.07	
	3.914	144.8	17.75	181.02	
S-HE-Ensayo a los 14 días	3.913	215.5	26.63	271.53	9.74
	3.867	264.3	32.30	329.41	
	3.914	220.6	26.82	273.49	
	3.911	251.6	30.69	312.93	
S-HE-Ensayo a los 21 días	3.78	293.6	35.43	361.27	6.68
	3.908	258.1	31.27	318.89	
	3.9	251.7	30.84	314.47	
	3.744	278.1	34.00	346.67	
S-HE-Ensayo a los 28 días	3.941	293.8	35.94	366.53	2.19
	3.883	294.1	36.21	369.26	
	3.846	310.6	37.44	381.82	

La mezcla de S-HE con 4 % de sustitución presenta un incremento de su resistencia conforme avanza el tiempo de curado, alcanzando 36.53 MPa a los 28 días, evidenciado en la Figura 11. El mayor aumento se registra entre los 7 y 14 días característico de alta resistencia inicial.

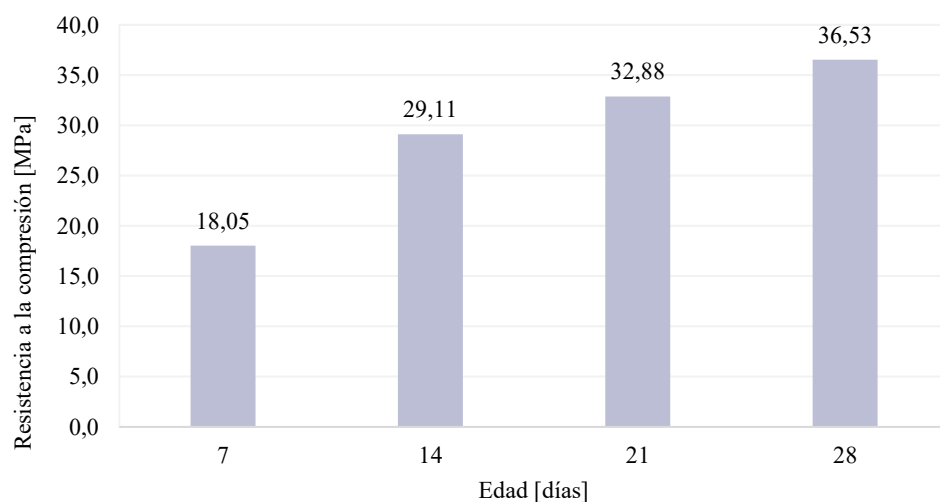


Figura 11. Desarrollo de resistencia de la mezcla de S-HE en función del tiempo de curado.

En la Figura 11 se observó una tendencia ascendente en la resistencia a compresión de la mezcla S-HE con 4 % de sustitución conforme aumentó el tiempo de curado. Los resultados obtenidos fueron 18.05 MPa a los 7 días, 29.11 MPa a los 14 días, 32.88 MPa a los 21 días y 36.53 MPa a los 28 días. La mayor ganancia de resistencia ocurrió durante las primeras dos semanas de curado, período en el que se registró un incremento de 61.27 %. En las edades posteriores el aumento continuó, aunque con variaciones más moderadas de 12.95 % entre los 14 y 21 días y de 11.10 % entre los 21 y 28 días.

Este comportamiento indica que el desarrollo resistente fue más intenso en las etapas iniciales y posteriormente mantuvo una evolución progresiva hasta alcanzar su valor final. Mientras transcurre el tiempo, el crecimiento de la resistencia continúa, pero a un ritmo menor. La tendencia creciente obtenida evidencia un comportamiento uniforme del hormigón con incorporación de piroclasto triturado del volcán Sangay en el desarrollo de su resistencia.

En la Tabla 11 y Figura 12 se presenta los resultados del N-HE, utilizado como referencia para la comparación con las mezclas modificadas.

Tabla 11. Resistencia a la compresión del N-HE (dosificación 1:1.53:1.65:0.52) a diferentes edades

Edad	Masa [kg]	kN	MPa	kg/cm ²	C.V [%]
N-HE-Ensayo a los 7 días	3.864	169.1	21.11	215.22	2.32
	3.853	160.6	20.05	204.41	
	3.848	166.8	20.82	212.30	
	3.857	165.4	20.33	207.34	
N-HE-Ensayo a los 14 días	3.824	258.1	31.79	324.12	5.12
	3.861	261.5	31.90	325.31	
	3.873	232.4	28.56	291.24	
	3.863	255.7	31.42	320.38	
N-HE-Ensayo a los 21 días	3.893	308.4	37.79	385.31	5.71
	3.874	289.1	34.99	356.81	
	3.846	295.7	36.09	367.97	
	3.928	271	32.95	336.04	
N-HE-Ensayo a los 28 días	3.843	305.5	37.20	379.31	6.86
	3.922	312.9	38.29	390.48	
	3.83	264.3	32.59	332.33	
	3.923	301.2	36.37	370.88	

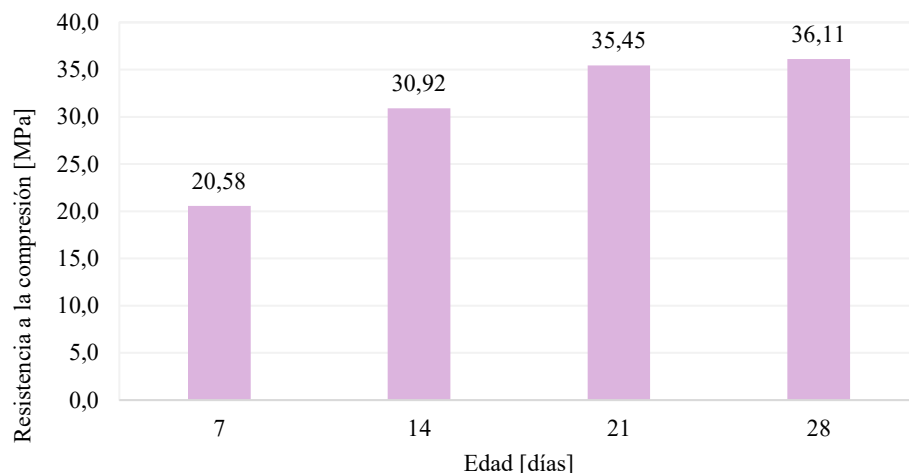


Figura 12. Desarrollo de resistencia del N-HE en función del tiempo de curado.

El N-HE mostrado en la Figura 12, presenta un incremento progresivo de la resistencia a la compresión conforme avanza el tiempo de curado, alcanzando 36,11 MPa a los 28 días. Este resultado sirve como referencia adecuada para comparar el efecto en la resistencia de las sustituciones.

En la Figura 13 se presentaron los resultados comparativos de la resistencia a la compresión de la mezcla de N-HE y de las mezclas de T-HE y S-HE con 4 % de sustitución.

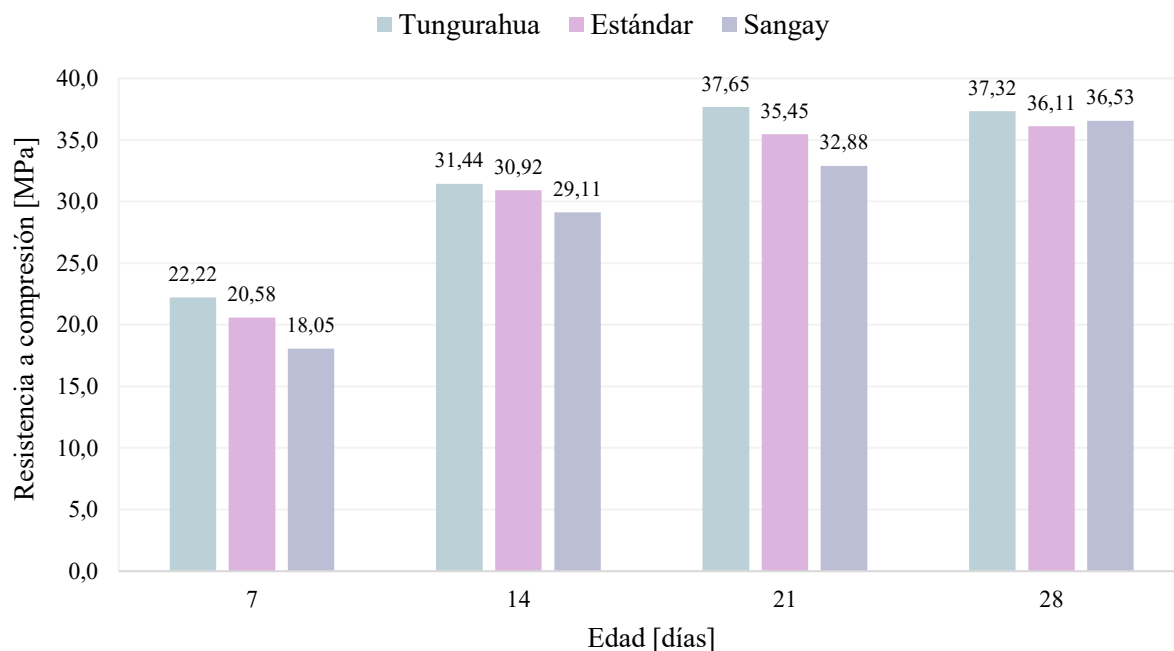


Figura 13. Resistencia a la compresión de mezclas de T-HE y S-HE respecto a la mezcla de N-HE.

Los resultados obtenidos del ensayo de resistencia a la compresión expuestos en la Figura 13, mostraron un comportamiento comparativo entre el hormigón estándar y los hormigones con 4 % de sustitución parcial de cemento por piroclasto triturado del volcán Tungurahua y del volcán Sangay, con empleo del cemento HE Chimborazo.

Al comparar las tres mezclas, el T-HE presentó los mayores valores de resistencia a compresión en todas las edades evaluadas. A los 28 días alcanzó 37.32 MPa, superando ligeramente al S-HE (36.53 MPa) y al N-HE (36.11 MPa). Un comportamiento similar se registró a los 7, 14 y 21 días de curado, donde la mezcla con piroclasto del Tungurahua mantuvo resultados superiores. En general, la resistencia aumentó conforme avanzó el tiempo de curado, destacándose el desempeño de la mezcla elaborada con material proveniente del volcán Tungurahua.

Este comportamiento puede explicarse a partir del apartado 4.1.1.3, de la composición química, cuyos resultados se muestran en la Tabla 3. Se observa que los dos componentes de los volcanes contienen alto contenido de dióxido de SiO_2 , siendo el componente predominante. Sin embargo, el piroclasto triturado del volcán Tungurahua presenta un contenido de SiO_2 superior en comparación con el volcán Sangay.

Sin embargo, el incremento de resistencia no se atribuye únicamente al contenido de SiO_2 . De acuerdo con el ACI 232.1R-12, las puzolanas mejoran las propiedades del hormigón por su reactividad puzolánica y por efectos físicos asociados a su finura [39]. En este sentido, el incremento en la resistencia del hormigón con piroclasto triturado del volcán Tungurahua puede explicarse por su combinación de la reacción puzolánica y el efecto filler. La reacción puzolánica genera compuestos adicionales de silicato de calcio hidratado (C-S-H), responsables del aumento de resistencia [39], [40], mientras que el efecto filler contribuye a una matriz más densa al rellenar vacíos [41].

Esta investigación no incluyó ensayos específicos para la cuantificación de la fase amorfa, la determinación detallada de la finura ni pruebas directas de reactividad puzolánica del material. En consecuencia, el análisis del comportamiento mecánico se apoyó en evidencia indirecta y en la información disponible en la literatura técnica especializada.

El desarrollo de la resistencia a los 7, 14, 21 y 28 días mostró que el material del Tungurahua no actúa únicamente como acelerante temprano, sino que mantiene un aporte progresivo con el tiempo, comportamiento asociado a materiales con características puzolánicas. Según [39], este tipo de materiales influye en el comportamiento del concreto endurecido de forma dependiente del tiempo.

Tabla 12. Resistencia a la compresión a 28 días y variación porcentual

Tipo de hormigón	Resistencia (MPa)	Variación respecto al estándar (%)
Estándar	36.11	—
Tungurahua (4%)	37.65	+4.27 %
Sangay (4%)	36.53	+1.16 %

Como se muestra en la Tabla 12, el T-HE presenta un incremento del 4.27 % en la resistencia a la compresión respecto al N-HE a los 28 días, mientras que el material del Sangay mostró un incremento del 1.16 %. El aumento obtenido con el piroclasto triturado del Tungurahua es técnicamente favorable, ya que se logra con un bajo porcentaje de sustitución. En contraste, el comportamiento del Sangay fue similar al del N-HE.

Este comportamiento coincide con lo reportado por diversos autores al emplear materiales volcánicos como sustitutos parciales del cemento. Según [40], las adiciones puzolánicas modifican la microestructura de la matriz cementante, contribuyendo a la mejora de la resistencia y la durabilidad del hormigón. Además, diversos estudios indican que la composición química y la presencia de fases amorfas en estos materiales favorecen su reactividad puzolánica [17], [40]. Asimismo, [23] reporta que materiales derivados de depósitos piroclásticos pueden contribuir al desarrollo de resistencia, dependiendo de su finura y composición mineralógica. En consecuencia, el uso del 4 % de piroclasto triturado del volcán Tungurahua puede considerarse técnicamente favorable para mejorar el desempeño mecánico del hormigón.

Desde una perspectiva ambiental, el porcentaje óptimo de sustitución obtenido en esta investigación también presenta un potencial beneficio asociado a la reducción del consumo de cemento. Considerando que la producción de cemento tipo HE en Ecuador genera entre 465.89 y 696.81 kg de CO₂ por tonelada producida [9], la sustitución parcial del 4 % por piroclasto triturado podría evitar teóricamente entre 18.64 y 27.87 kg de CO₂ por cada tonelada de cemento reemplazada.

4.1.2.4. Densidad

Inicialmente, se presentaron los resultados individuales de masa, volumen y densidad correspondientes a cada edad de ensayo a los 7, 14, 21 y 28 días.

Tabla 13. Densidad de la mezcla de T-HE con 4 % de sustitución a diferentes edades de curado.

Edad	Volumen [m ³]	Masa [kg]	Densidad [kg/m ³]
T-HE Ensayo a los 7 días	0.00166	3.855	2325.002
	0.00168	3.972	2369.187
	0.00164	3.824	2325.625
	0.00163	3.87	2380.386
T-HE Ensayo a los 14 días	0.00163	3.838	2347.74
	0.00164	3.82	2328.911
	0.00164	3.875	2362.26
	0.00165	3.812	2311.366
T-HE Ensayo a los 21 días	0.00166	3.833	2307.369
	0.00163	3.822	2348.276
	0.00165	3.91	2371.615
	0.00169	3.827	2269.427
T-HE Ensayo a los 28 días	0.00165	3.908	2363.519
	0.00164	3.856	2348.983
	0.00166	3.771	2265.527
	0.00167	3.941	2356.424

Tabla 14. Densidad de la mezcla de S-HE con 4 % de sustitución a diferentes edades de curado.

Edad	Volumen [m ³]	Masa [kg]	Densidad [kg/m ³]
S-HE Ensayo a los 7 días	0.00164	3.854	2343.789
	0.00166	3.905	2349.023
	0.00166	3.92	2364.002
	0.00165	3.914	2370.483
S-HE -Ensayo a los 14 días	0.00164	3.913	2386.547
	0.00164	3.867	2358.758
	0.00167	3.914	2340.658
	0.00166	3.911	2355.074
S-HE Ensayo a los 21 días	0.00166	3.78	2280.629
	0.00167	3.908	2334.073
	0.00166	3.9	2345.819
	0.00164	3.744	2289.206
S-HE Ensayo a los 28 días	0.00167	3.941	2365.834
	0.00166	3.883	2332.814
	0.00167	3.888	2328.726
	0.00168	3.846	2295.543

Tabla 15. Densidad del N-HE a diferentes edades de curado

Edad	Volumen [m ³]	Masa [kg]	Densidad [kg/m ³]
N-HE Ensayo a los 7 días	0.00161	3.864	2395.856
	0.00161	3.853	2392.601
	0.00161	3.848	2385.935
	0.00164	3.857	2346.914
N-HE Ensayo a los 14 días	0.00164	3.824	2333.766
	0.00166	3.861	2326.8
	0.00164	3.873	2355.567
	0.00165	3.863	2338.876
N-HE Ensayo a los 21 días	0.00166	3.893	2342.567
	0.00167	3.874	2315.585
	0.00166	3.846	2314.097
	0.00168	3.928	2333.041
N-HE Ensayo a los 28 días	0.00166	3.843	2311.272
	0.00167	3.922	2343.469
	0.00165	3.83	2320.677
	0.00169	3.923	2317.271

Con la finalidad de análisis y comparación de los resultados obtenidos, en la Tabla 16, se presentaron los valores promedio de densidad de cada mezcla para el S-HE y T-HE, así también, del N-HE. Y su valor final es el promedio global de todas las probetas para cada tipo.

Tabla 16. Densidad promedio del hormigón a diferentes edades de curado para mezclas de S-HE, T-HE y N-HE

Tipo	Edad	Densidad [kg/m ³]
T-HE	7	2350.05
	14	2337.57
	21	2324.17
	28	2333.61
Final		2336.35
Tipo	Edad	Densidad [kg/m ³]
S-HE	7	2356.82
	14	2360.26
	21	2312.43
	28	2330.73
Final		2340.06
Tipo	Edad	Densidad [kg/m ³]
N-HE	7	2380.33
	14	2338.75
	21	2326.32
	28	2323.17
Final		2342.14

Con el objetivo de completar la información de la Tabla 16, se presenta la Figura 14, en la que se muestran los valores de densidad de los hormigones evaluados.

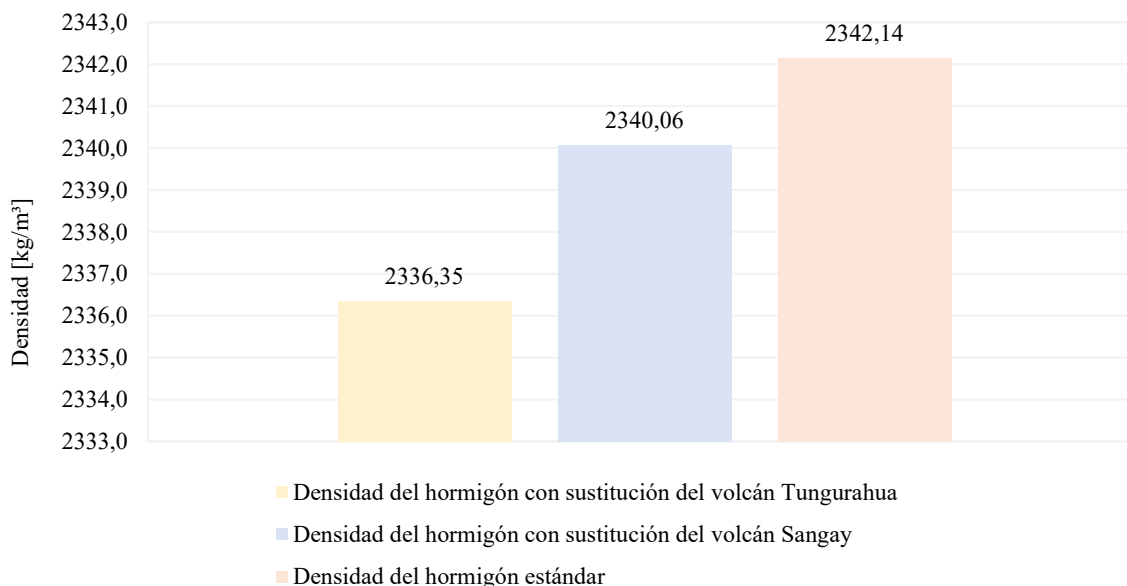


Figura 14. Comparación de la densidad del T-HE y S-HE frente al N-HE.

El N-HE alcanzó la mayor densidad, con un valor de 2342.14 kg/m³, en contraste con los hormigones elaborados con sustitución parcial de piroclasto triturado mostraron valores inferiores. El S-HE obtuvo una densidad de 2340.06 kg/m³ y el T-HE registró el valor más bajo, con 2336.35 kg/m³. En conjunto, los datos indican una ligera disminución de la densidad en las mezclas modificadas respecto al N-HE.

Esta variación no solo se atribuye a su composición química, si no a un efecto físico asociado a la menor densidad aparente del piroclasto triturado. Este material, por su naturaleza porosa, presenta una estructura menos compacta que el cemento Portland, por lo que su incorporación como reemplazo parcial disminuye el peso específico de la mezcla. Este comportamiento es consistente con estudios previos sobre materiales volcánicos [42].

Tabla 17. Densidad final y variación porcentual

Tipo de hormigón	Densidad (kg/m³)	Variación respecto al estándar (%)
N-HE	2342.14	
Tungurahua (4%)	2336.35	-0.25%
Sangay (4%)	2340.06	-0.09%

Como se muestra en la Tabla 17, al analizar los valores promedio finales, la diferencia de densidad entre el N-HE (2342.14 kg/m³), S-HE (2340.06 kg/m³) y el T-HE (2336.35 kg/m³) es relativamente baja, lo que representa una disminución aproximada del 0.09 % para el hormigón con material del Sangay y del 0.25 % para el hormigón con material del

Tungurahua respecto al hormigón convencional, con variaciones menores al 1 %. Aunque se aprecia una tendencia a la reducción de la densidad con la incorporación de piroclasto triturado, la magnitud de esta variación es reducida. Estos resultados son consistentes con estudios previos que reportan leves disminuciones en la densidad del hormigón al incorporar materiales volcánicos debido a su menor densidad aparente. En consecuencia, la disminución de densidad observada fue baja en términos descriptivos, con reducciones de 0.25 % para la mezcla con material del volcán Tungurahua y de 0.09 % para la mezcla con material del volcán Sangay, respecto al N-HE.

4.1.2.5. Permeabilidad

En la Tabla 18, Tabla 19 y Tabla 20 se presentaron los resultados individuales del coeficiente de permeabilidad para las mezclas de N-HE, T-HE y S-HE.

Tabla 18. Resultados del coeficiente de permeabilidad del N-HE

Ensayo	Δh [cm]	Tiempo [s]	Coeficiente de permeabilidad k [cm/s]
N-HE-1	2	62095	0.000015
N-HE-2	2.1	63953	0.000016
N-HE-3	1.95	65411	0.000014
N-HE-4	2.07	65135	0.000015
Promedio	-	-	0.000015

Fuente: Elaboración propia a partir de resultados del ensayo de permeabilidad del hormigón realizado por el Laboratorio Integral de la Construcción [43].

El N-HE presentó un coeficiente de permeabilidad de 1.5×10^{-5} cm/s, valor que refleja que su estructura interna es densa, característica de hormigones convencionales y asociada a una limitada capacidad de paso del agua a través del material. Esta baja permeabilidad confirma que el diseño no califica como un hormigón permeable según los criterios establecidos por la ACI 522R-10.

Tabla 19. Resultados del coeficiente de permeabilidad del S-HE con 4 % de sustitución.

Ensayo	Δh [cm]	Tiempo [s]	Coeficiente de permeabilidad k [cm/s]
S-HE-1	3.01	70832	0.000021
S-HE-2	2.99	71958	0.000020
S-HE-3	3.05	69315	0.000021
S-HE-4	2.31	71830	0.000022
Promedio	-	-	0.000021

Fuente: Elaboración propia a partir de resultados del ensayo de permeabilidad del hormigón realizado por el Laboratorio Integral de la Construcción [44].

El S-HE mostró que la incorporación de piroclasto triturado genera modificaciones en su microestructura, favoreciendo en cierta medida la infiltración del agua. Sin embargo, no es considerado un hormigón permeable.

Tabla 20. Resultados del coeficiente de permeabilidad del T-HE con 4 % de sustitución.

Ensayo	Δh [cm]	Tiempo [s]	Coeficiente de permeabilidad k [cm/s]
T-HE-1	5.5	79893	0.000034
T-HE-2	5.2	79095	0.000032
T-HE-3	5.01	79552	0.000031
T-HE-4	5.35	79851	0.000033
Promedio	-	-	0.000033

Fuente: Elaboración propia a partir de resultados del ensayo de permeabilidad del hormigón realizado por el Laboratorio Integral de la Construcción [45].

La mezcla presentó el mayor coeficiente de permeabilidad indicando una mayor infiltración de agua. Sin embargo, este efecto es reducido en términos absolutos y podría atribuirse a las propiedades físicas del piroclasto triturado del volcán Tungurahua. Aunque los resultados superan los registrados para el N-HE, continúan correspondiendo a niveles de permeabilidad bajos, característicos de hormigones densos.

Con el fin de comparar el comportamiento hidráulico de las 3 mezclas, en la Figura 15 se presentaron los valores del coeficiente de permeabilidad.

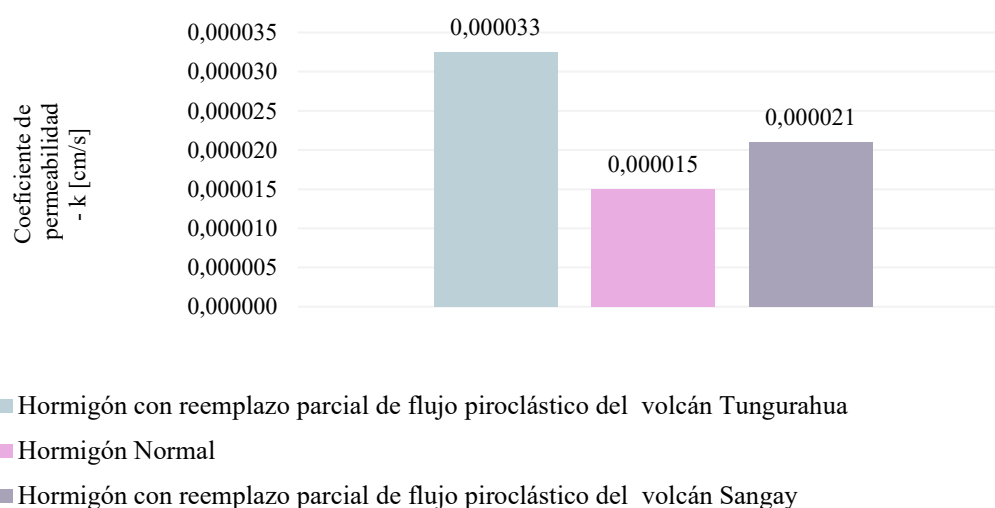


Figura 15. Coeficiente de permeabilidad.

La Figura 15 muestra gráficamente la comparación de los coeficientes de permeabilidad, evidenciando un aumento en la permeabilidad; sin embargo, este cambio es de baja magnitud

en términos cuantitativos al incorporar piroclastos triturados como reemplazo parcial del cemento. Sin embargo, ninguno de estos valores obtenidos alcanza el rango para clasificar al material como hormigón permeable, que se encuentra entre (0.001 – 10.00 cm/s) establecidos por la norma ACI 522 R-10.

Tabla 21. Coeficiente de permeabilidad (k) y variación porcentual respecto al hormigón estándar

Tipo de hormigón	k (cm/s)	Variación respecto al estándar (%)
Estándar	0.000015	
Sangay (4%)	0.000021	+40%
Tungurahua (4%)	0.000033	+120%

Como se muestra en la Tabla 21, el uso de piroclasto triturado genera variaciones en la permeabilidad del hormigón, observándose un incremento aproximado del 40 % para el material del Sangay y del 120 % para el Tungurahua respecto al hormigón estándar. Los valores obtenidos se mantienen en el orden de 10^{-5} cm/s, según los resultados del ensayo.

El T-HE muestra mayor permeabilidad pese a su alta resistencia. Este comportamiento puede explicarse por características físicas del material, como su distribución granulométrica y su estructura interna. Estas propiedades influyen en la conectividad de los poros en la matriz cementante, lo que puede favorecer ligeramente el paso del agua [46].

Los resultados obtenidos muestran una tendencia semejante a la reportada en la literatura para hormigones con materiales volcánicos. Hossain y Lachemi [47] reportaron coeficientes de permeabilidad del orden de 10^{-5} y 10^{-6} cm/s en hormigones densos elaborados con cenizas volcánicas y estos valores son similares a los obtenidos en esta investigación.

Según los criterios establecidos en la norma ACI 522R-10 [46], los hormigones permeables presentan coeficientes de permeabilidad entre 0.001 y 10 cm/s. Los valores determinados en este estudio se encuentran dentro de este rango, por lo que las mezclas corresponden a hormigones convencionales de baja permeabilidad

Así pues, los resultados muestran que el uso de flujo piroclástico triturado genera variaciones en los valores de permeabilidad en comparación con el N-HE. No obstante, los valores medidos se mantienen en el mismo orden de magnitud (10^{-5} cm/s) para todas las mezclas evaluadas en el ensayo.

Finalmente, el comportamiento de la permeabilidad presentó relación con la densidad obtenida en las mezclas evaluadas en el apartado 4.1.2.4. El N-HE, que registró la mayor densidad promedio, presentó el menor coeficiente de permeabilidad. Por otro lado, el T-HE

mostró la menor densidad y el mayor coeficiente de permeabilidad. Este comportamiento sugiere que una ligera disminución de la densidad puede estar asociada a una mayor conectividad de poros en la matriz cementante, favoreciendo el paso del agua.

CAPÍTULO V

5.1. Conclusiones

Los piroclastos triturados provenientes de los volcanes Tungurahua y Sangay presentan características físicas y químicas que permiten su incorporación como sustituto parcial del cemento tipo HE en la elaboración de hormigón. El porcentaje óptimo de sustitución fue del 4 %, ya que alcanzó valores promedio de resistencia a la compresión de 20.243 MPa para el T-HE y 17.526 MPa para el S-HE a los 7 días, superando a los demás porcentajes evaluados. Estos resultados evidencian el potencial de los piroclastos triturados como material suplementario cementante en mezclas de hormigón [19].

El piroclasto triturado del volcán Tungurahua presentó menor contenido de impurezas orgánicas en comparación con el material del volcán Sangay, de acuerdo con el ensayo colorimétrico [32]. Este comportamiento se reflejó en mayores valores de resistencia a la compresión en las mezclas elaboradas con material del Tungurahua. A los 28 días, el T-HE alcanzó una resistencia de 37.65 MPa, superando en un 4.27 % al N-HE (36.11 MPa) [35], mientras que el S-HE alcanzó 36.53 MPa, con un incremento del 1.16 %. Asimismo, el desarrollo de resistencia evidenció una tendencia progresiva con el tiempo de curado, especialmente en el material del volcán Tungurahua, comportamiento compatible con lo reportado en la literatura para materiales de naturaleza puzolánica [19].

La composición química de ambos piroclastos triturados estuvo dominada por el dióxido de silicio (SiO_2), con valores de 55.64 % para el Tungurahua y 53.65 % para el Sangay. Sin embargo, el incremento de resistencia observado no se atribuye únicamente al contenido de sílice, sino también a efectos físicos asociados a la finura del material, conocidos como efecto filler. La combinación entre la posible reacción puzolánica y el relleno de vacíos en la matriz cementante contribuyó a mejorar la compacidad interna del hormigón y favorecer el desarrollo de resistencia mecánica.

Se presentan reducciones del 0.09% y 0.25% en la densidad de los hormigones S-HE y T-HE respecto al N-HE, lo que indica una ligera disminución de la densidad asociada a la sustitución de piroclasto triturado. Este comportamiento puede relacionarse con la naturaleza porosa del piroclasto y si menor densidad aparente. Sin embargo, las diferencias son pequeñas y estos valores indican características de un hormigón convencional.

Se observó una relación entre la densidad y el coeficiente de permeabilidad. El T-HE tuvo la menor densidad de 2336.35 kg/cm^3 y el mayor coeficiente de permeabilidad de 3.3×10^{-5} cm/s, por otro lado, el N-HE obtuvo la menor permeabilidad de 1.5×10^{-5} cm/s y la mayor densidad de 2342.14 kg/m^3 . Este comportamiento sugiere que la ligera reducción de densidad se debe a una mayor conectividad de poros en la matriz cementante.

Los resultados obtenidos correspondieron exclusivamente a las muestras de piroclastos triturados recolectadas y analizadas en esta investigación, por lo cual no representan la totalidad de los depósitos de los volcanes Tungurahua y Sangay.

La sustitución parcial del 4 % de cemento tipo HE por piroclasto triturado demostró ser una alternativa técnicamente viable que mitiga entre 18.64 y 27.87 kg de CO₂ por tonelada de aglomerante reemplazado. Con ello, disminuye el consumo de clinker y se reducen las emisiones asociadas a su producción, promoviendo el desarrollo de prácticas constructivas sostenibles.

5.2. Recomendaciones

Se recomienda la incorporación de material piroclástico del volcán Tungurahua para sustituir un 4% de cemento tipo HE en la producción de hormigón estructural. Este diseño superó el desempeño mecánico de los grupos N-HE y S-HE, conservando atributos de permeabilidad y densidad que se alinean perfectamente con los estándares de los hormigones tradicionales no permeables.

Antes de incorporar el piroclasto a la mezcla se recomienda lavar, clasificar y controlar el material para eliminar los contaminantes y mejorar el desempeño mecánico.

Para profundizar en el estudio del material, es ideal realizar ensayos de fase amorfa, índice de actividad puzolánica y superficie específica por el método Blaine. Estos análisis ayudarán a entender el aumento de resistencia, evaluando tanto el contenido de SiO_2 como el efecto filler y la finura.

Para investigaciones futuras, se propone medir la resistencia a la compresión a los 56 y 90 días para evaluar la evolución mecánica a largo plazo y verificar la existencia de reacciones puzolánicas tardías [19].

Sería conveniente incorporar herramientas de estadística inferencial como el análisis de varianza o pruebas t en el análisis de los resultados. Así se podrá confirmar si las diferencias entre las mezclas de hormigón tienen diferencias significativas estadísticas.

Resulta importante evaluar diferentes porcentajes de sustitución parcial de cemento por piroclasto triturado para encontrar un porcentaje óptimo y cuantificar su influencia en las propiedades mecánicas del hormigón.

Finalmente, es necesario complementar estos datos con estudios de viabilidad económica y ambiental que cuantifiquen la reducción de emisiones de CO_2 . Este análisis integral permitirá definir si su aplicación es factible a escala industrial.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] T. Watari, Z. Cao, A. C. Serrenho, and J. Cullen, “Growing role of concrete in sand and climate crises,” *iScience*, vol. 26, no. 5, 2023, doi: 10.1016/j.isci.2023.106782.
- [2] J. M. Maldonado Acevedo, “Caracterización Reológica de Mezclas de Concreto para Impresión 3D,” Universidad de San Carlos de Guatemala, 2023.
- [3] J. Krithika and G. B. Ramesh Kumar, “Influence of fly ash on concrete - A systematic review,” in *Materials Today: Proceedings*, 2020, pp. 906–911. doi: 10.1016/j.matpr.2020.06.425.
- [4] Universidad Centroamericana José Simeón Cañas, “Análisis de tamaño de partículas por tamizado en agregado fino y grueso y determinación de material más fino que el tamiz No. 200 (75 μ m) en agregado mineral por lavado,” San Salvador.
- [5] American Concrete Institute, “ACI 318M-08: Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary,” Farmington Hills, MI, USA, 2008.
- [6] W. Chen, J. Hong, and C. Xu, “Pollutants generated by cement production in China, their impacts, and the potential for environmental improvement,” *J. Clean. Prod.*, vol. 103, pp. 61–69, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.04.048>.
- [7] O. F. Arbelaez Perez, K. A. Delgado Varela, and J. D. astañeda Mena, “Efecto de la incorporación de ceniza de bagazo de caña en las propiedades mecánicas y las emisiones de dióxido de carbono del hormigón preparado con residuos de vidrio,” *Boletín la Soc. Española Cerámica y Vidr.*, vol. 62, no. 5, pp. 443–451, 2023.
- [8] A. Ahmed, F. Hyndman, J. Kamau, and H. Fitriani, “Rice Husk Ash as a Cement Replacement in High Strength Sustainable Concrete,” *Mater. Sci. Forum*, vol. 1007, pp. 90–98, 2020, doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1007.90.
- [9] D. M. Petroche and A. D. Ramirez, “The Environmental Profile of Clinker, Cement, and Concrete: A Life Cycle Perspective Study Based on Ecuadorian Data,” *Buildings*, vol. 12, no. 3, p. 311, 2022, doi: 10.3390/buildings12030311.
- [10] Asamblea Constituyente del Ecuador, *Constitución de la República del Ecuador*. Ecuador: 20 de octubre de 2008, 2008, p. Arts. 71-74.
- [11] J. Sebastí, “Techno-Economic Analysis of a Solar Calciner for CO₂ Emissions Reduction in the Chilean Cement Industry,” in *SolarPACES Conference Proceedings*, 2024. doi: 10.52825/solarpaces.v3i2340.
- [12] J. R. Cuetara Ricardo and J. J. Howland Albear, “Empleo de la metodología de superficies de respuesta para determinar el factor k de las puzolanas naturales y su influencia en la durabilidad de los hormigones,” *Hormigón y Acero*, 2018, doi: 10.1016/j.hya.2018.06.002.

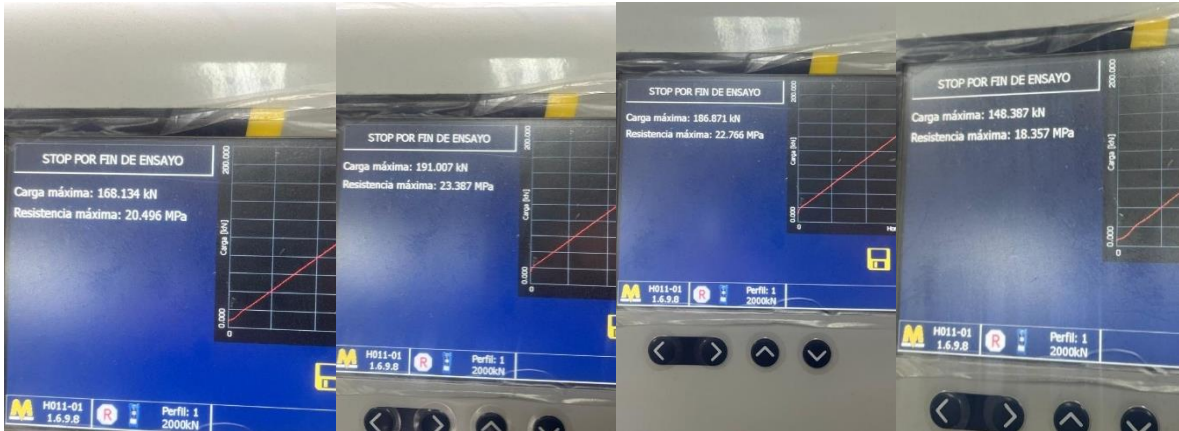
- [13] V. Sousa, J. A. Bogas, S. Real, I. Meireles, and A. Carriço, “Recycled cement production energy consumption optimization,” *Sustain. Chem. Pharm.*, vol. 32, 2023, doi: 10.1016/j.scp.2023.101010.
- [14] E. Thwe, D. Khatiwada, and A. Gasparatos, “Life cycle assessment of a cement plant in Naypyitaw, Myanmar,” *Clean. Environ. Syst.*, vol. 2, 2021, doi: 10.1016/j.cesys.2020.100007.
- [15] J. Santamaría, B. Adame, and C. Bermeo, “Influencia de la calidad de los agregados y tipo de cemento en la resistencia a la compresión del hormigón dosificado al volumen,” *Novasinerгия*, vol. 4, no. 1, pp. 78–95, 2021, doi: 10.37135/ns.01.07.05.
- [16] L. Dembovska, D. Bajare, I. Pundiene, and L. Vitola, “Effect of Pozzolanic Additives on the Strength Development of High Performance Concrete,” *Procedia Eng.*, vol. 172, pp. 202–210, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.02.050>.
- [17] R. Siddique, “Properties of concrete made with volcanic ash,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 66, no. 40–44, pp. 40–44, 2012, doi: 10.1016/j.resconrec.2012.06.010.
- [18] P. A. Espín Bedón *et al.*, “Co-eruptive, endogenous edifice growth, uplift during 4 years of eruption at Sangay Volcano, Ecuador,” *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, vol. 454, p. 108147, 2024, doi: 10.1016/j.jvolgeores.2024.108147.
- [19] H. M. Hamada, F. Abed, S. Beddu, A. M. Humada, and A. Majdi, “Effect of Volcanic Ash and Natural Pozzolana on mechanical properties of sustainable cement concrete: A comprehensive review,” *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 19, p. e02425, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02425>.
- [20] T. M. Molina Cuchi, “Análisis comparativo de las cenizas volcánicas provenientes de los volcanes Cotopaxi, Pululahua, Chalupas, Guagua Pichincha y Tungurahua para su uso en la fabricación de concreto,” 2021, Accessed: May 23, 2026. [Online]. Available: <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/21675>
- [21] B. Jaigua and S. Vasquez, “Monografía sobre el uso de cenizas volcánicas o puzolanas naturales del volcán Tungurahua como adición en morteros y hormigones,” Universidad de Cuenca, 2015.
- [22] C. F. Pullaguari Pizarro, “Concreto modificado mediante sustitución parcial de OPC con polvo de bloques de piedra pómez proveniente de la demolición,” Universidad Técnica Particular de Loja, 2025. [Online]. Available: <https://dspace.utpl.edu.ec/handle/29.500.19856/70700>
- [23] A. Tomoyose, T. Noguchi, K. Sodeyama, and K. Higashi, “Concrete with high-purity volcanic glass fine powder manufactured from pyroclastic deposit,” *SN Appl. Sci.* 2020 25, vol. 2, no. 5, pp. 851–, Apr. 2020, doi: 10.1007/S42452-020-2614-6.
- [24] H. Sigurdsson, *The Encyclopedia of Volcanoes*, 2nd ed. Academic Press, 2015. doi: 10.1016/C2015-0-00175-7.

- [25] V. Bonavetti, “Cementos con filler calcáreo: Mecanismo de interacción y su influencia sobre las propiedades resistentes,” Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, 1998.
- [26] M. Wainzstein and J. D. Sota, “Permeabilidad de hormigones,” La Plata, Argentina, 1991.
- [27] R. Hernández Sampieri, C. Fernández Collado, and P. Baptista Lucio, *Metodología de la investigación*, 6th ed. México D.F.: McGraw-Hill Education, 2014.
- [28] ASTM International, “ASTM C33/C33M-24a: Standard Specification for Concrete Aggregates,” West Conshohocken, PA, 2024.
- [29] ASTM International, “ASTM C136: Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates,” West Conshohocken, PA, 2014. doi: 10.1520/C0136_C0136M-14.
- [30] ASTM International, “ASTM C117: Standard Test Method for Materials Finer than 75- μ m (No. 200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing,” West Conshohocken, PA, 2017. doi: 10.1520/C0117-17.
- [31] ASTM International, “ASTM C618: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete,” West Conshohocken, PA, 2024. doi: 10.1520/C0618-24.
- [32] ASTM International, “ASTM C40/C40M: Standard Test Method for Organic Impurities in Fine Aggregates for Concrete,” West Conshohocken, PA, 2020. doi: 10.1520/C0040_C0040M-20.
- [33] ASTM International, “ASTM C192/C192M: Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory,” West Conshohocken, PA, 2019. doi: 10.1520/C0192_C0192M-19.
- [34] ASTM International, “ASTM C143/C143M: Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete,” West Conshohocken, PA, 2020. doi: 10.1520/C0143_C0143M-20.
- [35] ASTM International, “ASTM C39/C39M: Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens,” West Conshohocken, PA, 2021. doi: 10.1520/C0039_C0039M-21.
- [36] ASTM International, “ASTM C642: Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete,” West Conshohocken, PA, 2021. doi: 10.1520/C0642-21.
- [37] ACI Committee 522, “ACI 522R-10: Report on Pervious Concrete,” Farmington Hills, MI, USA, 2010.

- [38] U. N. de Colombia, “Reporte de análisis por fluorescencia de rayos X (FRX) del flujo piroclástico,” Bogotá D.C., 2025.
- [39] American Concrete Institute, “ACI 232.1R-12: Report on the Use of Raw or Processed Natural Pozzolans in Concrete,” Farmington Hills, MI, USA, 2001. Accessed: Mar. 23, 2026. [Online]. Available: www.concrete.org
- [40] P. K. Mehta and P. J. M. Monteiro, *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials*, 4th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2014.
- [41] A. M. Neville, *Properties of Concrete*, 5th ed. Harlow, England: Pearson Education Limited, 2011.
- [42] J. Januarti, J. Ekaputri, P. Triwulan, A. Aji, and Baihaqi, “Mechanical Properties of Volcanic Ash Based Concrete,” 2011. doi: 10.13140/2.1.1670.6241.
- [43] Universidad Nacional de Chimborazo, “Ensayo de permeabilidad para el hormigón normal,” Riobamba, 2025.
- [44] U. N. de Chimborazo, “Ensayo de permeabilidad para el hormigón con reemplazo parcial de flujo piroclástico del volcán Sangay,” Riobamba, 2025.
- [45] U. N. de Chimborazo, “Ensayo de permeabilidad para el hormigón con reemplazo parcial de flujo piroclástico del volcán Tungurahua,” Riobamba, 2025.
- [46] American Concrete Institute, “ACI 522R-10: Report on Pervious Concrete,” Farmington Hills, MI, USA, 2010.
- [47] K. M. A. Hossain and M. Lachemi, “Performance of volcanic ash and pumice based blended cement concrete in mixed sulfate environment,” *Cem. Concr. Res.*, vol. 36, no. 6, pp. 1123–1133, Jun. 2006, doi: 10.1016/j.cemconres.2006.03.010.

ANEXOS

Anexo 1. Resultados cilindros T-HE-Ensayo a los 7 días



Anexo 2. Resultados cilindros S-HE-Ensayo a los 7 días



Anexo 3. Resultados cilindros N-HE-Ensayo a los 7 días



Anexo 4. Resultados cilindros T-HE-Ensayo a los 14 días



Anexo 5. Resultados cilindros S-HE-Ensayo a los 14 días



Anexo 6. Resultados cilindros N-HE-Ensayo a los 14 días



Anexo 7. Resultados cilindros T-HE-Ensayo a los 21 días



Anexo 8. Resultados cilindros S-HE-Ensayo a los 21 días



Anexo 9. Resultados cilindros N-HE-Ensayo a los 21 días



Anexo 10. Resultados cilindros T-HE-Ensayo a los 28 días



Anexo 11. Resultados cilindros S-HE-Ensayo a los 28 días



Anexo 12. Resultados cilindros N-HE-Ensayo a los 28 días



Anexo 13. Informe Técnico de fluorescencia de rayos X (FRX) – Análisis semicuantitativo de muestras de piroclasto triturado del volcán Tungurahua y del volcán Sangay



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

SEDE BOGOTÁ

VICERRECTORÍA DE SEDE

DIRECCIÓN DE LABORATORIOS

LABORATORIO INTERFACULTADES DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X

Bogotá D.C., diciembre 17 de 2025

[B-DL-XRF-086-2025]

Señores

DARWIN LIZANDRO MAIZA YANCHAGUANO

DAYANA MISHALL MESACHE ALULEMA

IVAN ALEJANDRO VELASCO INGA

Universidad Nacional de Chimborazo

Teléfono: 593-980083657

Riobamba, Chimborazo - Ecuador

Correo: darwin.maiza@unach.edu.co

Respetados Señores:

Me permito reportar el resultado semicuantitativo destructivo de tres (03) muestras sólidas (02 arenas color negra y 01 arena color rojizo). Remitidas por el Señor Darwin Maiza el día 11 de diciembre de 2025, con el nombre de "M- TUNGURAHUA NEGRO, M- TUNGURAHUA ROJO y M- SANGAY" y codificadas por este laboratorio como:

- XRF-9316 M- TUNGURAHUA NEGRO -UNACH-
- XRF-9317 M- TUNGURAHUA ROJO -UNACH-
- XRF-9318 M- SANGAY -UNACH-

Cómo las muestras poseían un tamaño de partícula demasiado gruesa, esta se redujo con un molino de bolas de ágata, después se pasaron por un tamiz malla 100µ.

Las muestras en polvo fueron secadas a 105°C por un periodo de 12 horas. Posteriormente mezcladas con cera espectrométrica de la casa Merck en relación Muestra : Cera de 10:1; homogenizadas por agitación, llevadas a una prensa hidráulica a 120 kN por un minuto generando tres pastillas prensadas de 37mm de diámetro que fueron medidas en la aplicación SEMIQ-2020.

El análisis semicuantitativo se realizó con el software SemiQ 5, haciendo 11 barridos, con el fin de detectar todos los elementos presentes en la muestra, excluyendo H, C, Li, Be, B, N, O y los elementos transuránicos.

Se utilizó un espectrómetro de fluorescencia de rayos X, MagixPro PW – 2440 Philips (WDXRF) equipado con un tubo de Rodio, con una potencia máxima de 4 KW. Este equipo tiene una sensibilidad de 100ppm (0.01%) en la detección de elementos pesados metálicos.

[Página 1 de 4]
Elaboró: Wilson

Carrera 30 No. 45 - 03
EDIFICIO MANUEL ANCÍZAR, Piso 1º, Oficina 114
Teléfono: Conmutador: (57-1) 316 5000 Ext. 16594 / 16596
Bogotá, Colombia
Correo electrónico: labfurx_ceifbog@unal.edu.co

PROYECTO
CULTURAL,
CIENTÍFICO
Y COLECTIVO
DE NACIÓN

La estabilidad del equipo es controlada diariamente mediante la medición de una muestra patrón. Universidad
Nacional
de Colombia

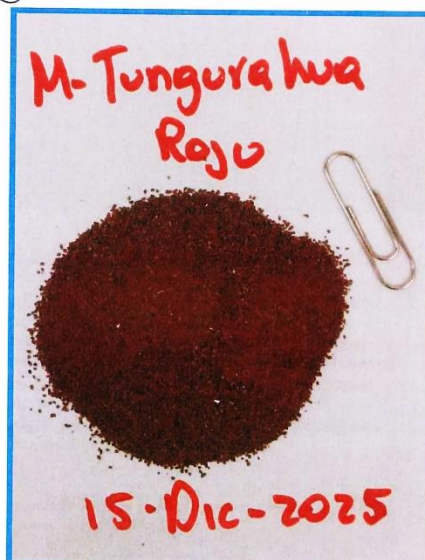
Los resultados obtenidos en forma de elementos y de compuestos, se transcriben a continuación.

Nombre	Elemento y/o Compuesto	XRF-9316 M- TUNGURAHUA NEGRO -UNACH- (% en peso)
Silicio	SiO ₂	55,64%
Aluminio	Al ₂ O ₃	18,30%
Hierro	Fe ₂ O ₃	7,29%
Calcio	CaO	7,21%
Sodio	Na ₂ O	4,81%
Magnesio	MgO	2,69%
Potasio	K ₂ O	2,15%
Titanio	TiO ₂	0,91%
Fósforo	P ₂ O ₅	0,29%
Bario	Ba	0,18%
Manganeso	MnO	0,13%
Estroncio	Sr	0,10%
Cloro	Cl	0,10%
Azufre	S	0,08%
Cerio	Ce	0,03%
Vanadio	V	0,02%
Zirconio	Zr	0,02%
Estaño	Sn	0,02%
Zinc	Zn	0,02%
Cromo	Cr	0,01%
Níquel	Ni	0,01%
Rubidio	Rb	64 ppm*
Plomo	Pb	61 ppm*
Itrio	Y	23 ppm*



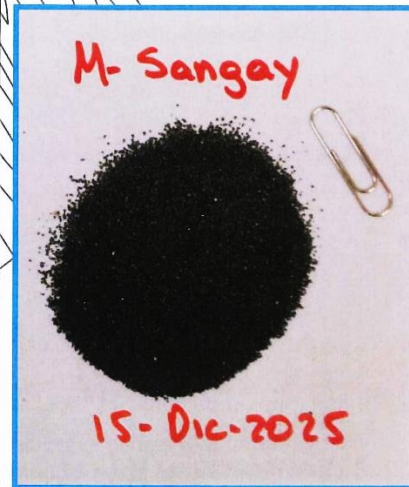
*Los valores en negrilla son informativos.

Nombre	Elemento y/o Compuesto	XRF-9318 M- TUNGURAHUA ROJO UNACH (% en peso)
Silicio	SiO_2	53,38%
Aluminio	Al_2O_3	18,08%
Hierro	Fe_2O_3	8,47%
Calcio	CaO	8,37%
Sodio	Na_2O	4,54%
Magnesio	MgO	3,23%
Potasio	K_2O	1,84%
Titanio	TiO_2	1,07%
Fósforo	P_2O_5	0,30%
Manganeso	MnO	0,13%
Estroncio	Sr	0,11%
Bario	Ba	0,11%
Azufre	S	0,10%
Cloro	Cl	0,07%
Estañ	Sn	0,06%
Cerio	Ce	0,04%
Cromo	Cr	0,02%
Vanadio	V	0,02%
Zirconio	Zr	0,02%
Zinc	Zn	0,02%
Plomo	Pb	78 ppm*
Cobre	Cu	42 ppm*
Rubidio	Rb	42 ppm*
Itrio	Y	31 ppm*
Níquel	Ni	18 ppm*



*Los valores en negrilla son informativos.

Nombre	Elemento y/o Compuesto	XRF-9316 M- SANGAY -UNACH- (% en peso)
Silicio	SiO ₂	53,65%
Aluminio	Al ₂ O ₃	18,52%
Hierro	Fe ₂ O ₃	8,27%
Calcio	CaO	8,23%
Sodio	Na ₂ O	4,58%
Magnesio	MgO	2,87%
Potasio	K ₂ O	1,80%
Titanio	TiO ₂	1,03%
Fósforo	P ₂ O ₅	0,31%
Bario	Ba	0,14%
Manganeso	MnO	0,13%
Cloro	Cl	0,12%
Estroncio	Sr	0,12%
Azufre	S	0,07%
Estaño	Sn	0,06%
Cromo	Cr	0,02%
Zirconio	Zr	0,02%
Zinc	Zn	0,02%
Vanadio	V	0,01%
Plomo	Pb	81 ppm*
Cobre	Cu	78 ppm*
Rubidio	Rb	48 ppm*
Itrio	Y	18 ppm*



*Los valores en negrilla son informativos.

Nota: El resultado analítico presente, corresponde exclusivamente a las muestras recibidas y no a otro material de la misma procedencia. El laboratorio no se hace responsable de las posibles interpretaciones surgidas por la reproducción parcial del presente informe. La modificación parcial o total del presente informe, invalida los resultados presentados en el mismo.

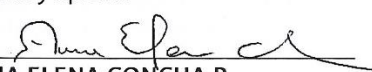
Cualquier reclamación sobre los resultados se puede realizar durante los próximos 30 días posteriores a la entrega de este informe. La contramuestra y los residuos de preparación serán almacenados por un periodo de 45 días. El laboratorio no se hace responsable de la disposición del material.

Nota de confidencialidad: El laboratorio de Fluorescencia de Rayos X de la Universidad Nacional de Colombia se compromete a mantener en absoluta reserva los resultados obtenidos.

Elaboró:


Ing. WILSON ROMERO M.
Profesional de Apoyo

Revisó y Aprobó:


ANA ELENA CONCHA P.
Profesora
Coordinadora laboratorio

[Página 4 de 4]
Elaboró: Wilson

Carrera 30 No. 45 - 03
EDIFICIO MANUEL ANCÍZAR, Piso 1º, Oficina 114
Teléfono: Conmutador: (57-1) 316 5000 Ext. 16594 / 16596
Bogotá, Colombia
Correo electrónico: labfurx_ceifbog@unal.edu.co

PROYECTO
CULTURAL,
CIENTÍFICO
Y COLECTIVO
DE NACIO*

Fuente: Tomado de [38].

Anexo 14. Informe técnico Ensayo de permeabilidad para el hormigón normal



LABORATORIO INTEGRAL DE LA CONSTRUCCIÓN
Control de Calidad para tus Proyectos

RUC: 0602243255001

ENSAYO DE PERMEABILIDAD DEL HORMIGÓN

1. DATOS GENERALES

Proyecto: Evaluación de Resistencia y densidad del hormigón con sustitución parcial de cemento por flujos piroclásticos del volcán Tungurahua y Sangay.

Institución: Universidad Nacional de Chimborazo.

Cliente / Contratante: Darwin Lizandro Maiza Yanchaguano

Fecha de ensayo:

Desde: 11/12/2025

Hasta:

19/12/2025

Código de muestra: 325-P-2025

2. OBJETIVO DEL ENSAYO

Determinar la permeabilidad del hormigón mediante la medición de la tasa de infiltración del agua, conforme a los lineamientos de la norma ACI 522R-10.

3. NORMATIVA DE REFERENCIA

- ACI 522R-10 – Report on Pervious Concrete.

4. DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL ENSAYADO

Tipo de hormigón: Hormigón Normal

Edad del hormigón al ensayo: 28 días

Condición de la muestra: Saturado

5. DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO

El ensayo se realizó determinando la tasa de infiltración del agua a través del hormigón, aplicando un volumen conocido de agua sobre una superficie delimitada y registrando el tiempo de infiltración total, conforme a ACI 522R-10.



7. RESULTADOS DEL ENSAYO

Tabla de resultados:

Ensayo	Δh (cm)	Tiempo (s)	Coefficiente de permeabilidad k (cm/s)
N-1	2.00	62095	0.000015
N-2	2.10	63953	0.000016
N-3	1.95	65411	0.000014
N-4	2.07	65135	0.000015

Valor promedio: 0.000015 cm/s

9. CONCLUSIONES

- El hormigón presenta una baja permeabilidad, casi nula.
- No cumple con los criterios de la ACI 522R-10 para ser considerado hormigón permeable que debe estar en el rango de 0.001 cm/s – 10.00 cm/s.

11. OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES

Los resultados son válidos únicamente para las muestras ensayadas. Se recomienda complementar con ensayos de resistencia.

12. RESPONSABLES



Firmado electrónicamente por:
**FABIAN ALEJANDRO
CARRION ACOSTA**

Validar documento con FirmadEC



Firmado electrónicamente por:
**PAUL FERNANDO
CARRION SAMANIEGO**

Validar documento con FirmadEC

Ing. Fabian Carrion
Técnico de Laboratorio

Paul Fernando Carrion Samaniego
Responsable de Laboratorio

Anexo 15. Informe técnico Ensayo de permeabilidad para el hormigón con reemplazo parcial de piroclasto triturado del volcán Sangay



LABORATORIO INTEGRAL DE LA CONSTRUCCIÓN
Control de Calidad para tus Proyectos

RUC: 0602243255001

ENSAYO DE PERMEABILIDAD DEL HORMIGÓN

1. DATOS GENERALES

Proyecto: Evaluación de Resistencia y densidad del hormigón con sustitución parcial de cemento por flujos piroclásticos del volcán Tungurahua y Sangay.

Institución: Universidad Nacional de Chimborazo.

Cliente / Contratante: Darwin Lizandro Maiza Yanchaguano

Fecha de ensayo:

Desde: 11/12/2025

Hasta:

26/12/2025

Código de muestra: 326-P-2025

2. OBJETIVO DEL ENSAYO

Determinar la permeabilidad del hormigón mediante la medición de la tasa de infiltración del agua, conforme a los lineamientos de la norma ACI 522R-10.

3. NORMATIVA DE REFERENCIA

- ACI 522R-10 – Report on Pervious Concrete.

4. DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL ENSAYADO

Tipo de hormigón: Hormigón con reemplazo parcial de flujo piroclástico del volcán Sangay.

Edad del hormigón al ensayo: 28 días

Condición de la muestra: Saturado

5. DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO

El ensayo se realizó determinando la tasa de infiltración del agua a través del hormigón, aplicando un volumen conocido de agua sobre una superficie delimitada y registrando el tiempo de infiltración total, conforme a ACI 522R-10.



7. RESULTADOS DEL ENSAYO

Tabla de resultados:

Ensayo	Δh (cm)	Tiempo (s)	Coefficiente de permeabilidad k (cm/s)
S-1	3.01	70832	0.000021
S-2	2.99	71958	0.000020
S-3	3.05	69315	0.000021
S-4	3.21	71830	0.000022

Valor promedio: 0.000021 cm/s

9. CONCLUSIONES

- El hormigón presenta una baja permeabilidad, casi nula.
- No cumple con los criterios de la ACI 522R-10 para ser considerado hormigón permeable que debe estar en el rango de 0.001 cm/s – 10.00 cm/s.

11. OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES

Los resultados son válidos únicamente para las muestras ensayadas. Se recomienda complementar con ensayos de resistencia.

12. RESPONSABLES



Firmado electrónicamente por:
**FABIAN ALEJANDRO
CARRION ACOSTA**
Validar electrónicamente con FirmatC



Firmado electrónicamente por:
**PAUL FERNANDO
CARRION SAMANIEGO**
Validar electrónicamente con FirmatC

Ing. Fabian Carrion
Técnico de Laboratorio

Paul Fernando Carrion Samaniego
Responsable de Laboratorio

Anexo 16. Informe técnico Ensayo de permeabilidad para el hormigón con reemplazo parcial de piroclasto triturado del volcán Tungurahua



LABORATORIO INTEGRAL DE LA CONSTRUCCIÓN
Control de Calidad para tus Proyectos

RUC: 0602243255001

ENSAYO DE PERMEABILIDAD DEL HORMIGÓN

1. DATOS GENERALES

Proyecto: Evaluación de Resistencia y densidad del hormigón con sustitución parcial de cemento por flujos piroclásticos del volcán Tungurahua y Sangay.

Institución: Universidad Nacional de Chimborazo.

Cliente / Contratante: Darwin Lizandro Maiza Yanchaguano

Fecha de ensayo:

Desde: 11/12/2025

Hasta:

08/01/2026

Código de muestra: 327-P-2025

2. OBJETIVO DEL ENSAYO

Determinar la permeabilidad del hormigón mediante la medición de la tasa de infiltración del agua, conforme a los lineamientos de la norma ACI 522R-10.

3. NORMATIVA DE REFERENCIA

- ACI 522R-10 – Report on Pervious Concrete.

4. DESCRIPCIÓN DEL MATERIAL ENSAYADO

Tipo de hormigón: Hormigón con reemplazo parcial de flujo piroclástico del volcán Tungurahua.

Edad del hormigón al ensayo: 28 días

Condición de la muestra: Saturado

5. DESCRIPCIÓN DEL ENSAYO

El ensayo se realizó determinando la tasa de infiltración del agua a través del hormigón, aplicando un volumen conocido de agua sobre una superficie delimitada y registrando el tiempo de infiltración total, conforme a ACI 522R-10.



7. RESULTADOS DEL ENSAYO

Tabla de resultados:

Ensayo	Δh (cm)	Tiempo (s)	Coefficiente de permeabilidad k (cm/s)
T-1	5.50	79893	0.000034
T-2	5.20	79095	0.000032
T-3	5.01	79552	0.000031
T-4	5.35	79851	0.000033

Valor promedio: 0.000033 cm/s

9. CONCLUSIONES

- El hormigón presenta una baja permeabilidad, casi nula.
- No cumple con los criterios de la ACI 522R-10 para ser considerado hormigón permeable que debe estar en el rango de 0.001 cm/s – 10.00 cm/s.

11. OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES

Los resultados son válidos únicamente para las muestras ensayadas. Se recomienda complementar con ensayos de resistencia.

12. RESPONSABLES



Firmado electrónicamente por:
**FABIAN ALEJANDRO
CARRION ACOSTA**
Validar únicamente con FirmasRC

Ing. Fabian Carrion
Técnico de Laboratorio



Firmado electrónicamente por:
**PAUL FERNANDO
CARRION SAMANIEGO**
Validar únicamente con FirmasRC

Paul Fernando Carrion Samaniego
Responsable de Laboratorio

Anexo 17. Coordenadas de obtención de piroclasto del volcán Sangay



Anexo 18. Coordenadas de obtención de piroclasto del volcán Tungurahua

