



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

TEMA DOCTORAL

**MATERIALES ALTERNATIVOS DE CONSTRUCCIÓN, UTILIZANDO PIEDRA
PÓMEZ DE ECUADOR, PARA EL DISEÑO DE GEOPOLIMEROS.**

Presenta:

Alexis Iván Andrade Valle

Directores:

Carlos Lerma Elvira

José María Vercher Sanchis

Ext. Edison Patricio Villacrés Cevallos

Programa de Doctorado en Arquitectura, Edificación, Patrimonio y Ciudad

Julio, 2025

Resumen

La investigación se enfoca en el desarrollo y evaluación de geopolímeros elaborados a partir de piedra pómez ecuatoriana como alternativa sostenible al cemento Portland, con el objetivo de reducir las emisiones de CO₂ asociadas a la producción de clínker. La metodología contempló una revisión bibliométrica sobre el impacto ambiental del cemento y el potencial uso de los geopolímeros como materiales de bajo impacto, con énfasis en la valorización de la piedra pómez como recurso aluminosilicato local. Se caracterizó mineralógica y químicamente la piedra pómez de distintos yacimientos del país, evaluando su viabilidad como precursor mediante ensayos de resistencia a la compresión tras su activación alcalina. Con el fin de optimizar el sistema y reducir la molaridad del hidróxido de sodio como activador, se incorporó inicialmente humo de sílice y se evaluó la durabilidad frente a medios ácidos. Posteriormente, en busca de una optimización adicional del sistema, se añadió polvo de ladrillo calcinado, rico en sílice y aluminio, evaluando su desempeño mecánico en elementos prefabricados conforme a la normativa ecuatoriana. Finalmente, se cuantificaron las emisiones de CO₂ asociadas a cada mezcla geopolimérica desarrollada mediante la metodología del Intergovernmental Panel on Climate (IPCC), lo que permitió una comparación directa con el cemento Portland tipo general use (GU).

Los resultados evidenciaron que la piedra pómez de Cotopaxi presenta la mejor reactividad con adecuada demanda alcalina, destacándose como el precursor más eficiente. La incorporación de humo de sílice y polvo de ladrillo mejoró la microestructura, incrementando la resistencia mecánica y la durabilidad del geopolímero, cumpliendo con los requisitos para mampostería estructural. Además, se verificó una reducción del 11,8% en emisiones de CO₂ en comparación con el cemento Portland, validando el potencial ambiental de estos conglomerantes. Se propone como línea futura el estudio de activadores alternativos de menor huella de carbono, el uso de residuos industriales o agrícolas, mejoras en el proceso de curado, modelación del proceso de geopolimerización y validación estructural a escala real, junto con análisis de ciclo de vida y costo-beneficio que respalden su viabilidad técnica, ambiental y económica.

Abstract

The research focuses on the development and evaluation of geopolymers produced from Ecuadorian pumice stone as a sustainable alternative to Portland cement, with the aim of reducing CO₂ emissions associated with clinker production. The methodology included a bibliometric review on the environmental impact of cement and the potential use of geopolymers as low-impact materials, with emphasis on the valorization of pumice as a local aluminosilicate resource. The pumice from various deposits in the country was mineralogically

and chemically characterized, and its viability as a precursor was assessed through compressive strength tests after alkaline activation. In order to optimize the system and reduce the molarity of sodium hydroxide used as an activator, silica fume was initially incorporated, and durability was evaluated under acidic conditions. Subsequently, in pursuit of further optimization, calcined brick powder—rich in silicon and aluminum—was added, and its mechanical performance in prefabricated elements was assessed in accordance with Ecuadorian standards. Finally, the CO₂ emissions associated with each geopolymer mixture developed were quantified using the IPCC methodology, allowing for a direct comparison with Type GU Portland cement.

The results showed that pumice from the Cotopaxi region exhibited the highest reactivity with adequate alkaline demand, standing out as the most efficient precursor. The addition of silica fume and brick powder improved the microstructure, increasing both mechanical strength and durability of the geopolymer, meeting the requirements for structural masonry. Moreover, an 11.8% reduction in CO₂ emissions was verified compared to Portland cement, validating the environmental potential of these binders. Future research lines include the study of alternative activators with lower carbon footprints, the use of industrial or agricultural waste, improvements in the curing process, modeling of the geopolymerization process, and full-scale structural validation, along with life cycle and cost–benefit analyses to support their technical, environmental, and economic feasibility.

Resum

La investigació se centra en el desenvolupament i l'avaluació de geopolímers elaborats a partir de pedra tosca (pumita) d'origen equatorià com a alternativa sostenible al ciment Portland, amb l'objectiu de reduir les emissions de CO₂ associades a la producció de clínquer. La metodologia va incloure una revisió bibliomètrica sobre l'impacte ambiental del ciment i el potencial ús dels geopolímers com a materials de baix impacte, amb èmfasi en la valorització de la pedra tosca com a recurs aluminosilicat local. Es va caracteritzar mineralògicament i químicament la pedra tosca de diversos jaciments del país, avaluant la seua viabilitat com a precursor mitjançant assaigs de resistència a la compressió després de l'activació alcalina. Amb la finalitat d'optimitzar el sistema i reduir la molaritat de l'hidròxid de sodi com a activador, s'incorporà inicialment fum de sílice i s'avaluà la durabilitat en medis àcids. Posteriorment, amb la intenció d'aconseguir una optimització addicional, s'afegí pols de maó calcinat, ric en sílice i alumini, i s'avaluà el seu comportament mecànic en elements prefabricats d'acord amb la normativa equatoriana. Finalment, es quantificaren les emissions de CO₂ associades a cada mescla geopolimèrica desenvolupada mitjançant la metodologia de l'IPCC, cosa que permeté una comparació directa amb el ciment Portland tipus GU.

Els resultats evidenciaren que la pedra tosca de la zona de Cotopaxi presenta la millor reactivitat amb una demanda alcalina adequada, destacant-se com el precursor més eficient.

La incorporació de fum de sílice i de pols de maó millorà la microestructura, incrementant la resistència mecànica i la durabilitat del geopolímer, i complint els requisits per a fàbrica estructural. A més, es constatà una reducció de l'11,8% en les emissions de CO₂ en comparació amb el ciment Portland, validant el potencial ambiental d'aquests conglomerants. Com a línia futura, es proposa l'estudi d'activadors alternatius amb menor petjada de carboni, l'ús de residus industrials o agrícoles, millores en el procés de curat, la modelització del procés de geopolimerització i la validació estructural a escala real, juntament amb anàlisis de cicle de vida i de cost-benefici que avalen la seua viabilitat tècnica, ambiental i econòmica.

CONTENIDO

CAPÍTULO 1. EMISIÓN DE CO₂ EN LA CONSTRUCCIÓN, HORMIGONES TRADICIONALES E INNOVACIONES EN EL HORMIGÓN (GEOPOLÍMEROS): ESTADO DEL ARTE	17
1.1. LA INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN Y EL CAMBIO CLIMÁTICO	17
1.2. MÉTODOS CONVENCIONALES DE CONSTRUCCIÓN EN ECUADOR	19
1.3. INNOVACIONES AL HORMIGÓN.....	22
1.4. LA PIEDRA PÓMEZ EN LA INDUSTRIA DE LA CONSTRUCCIÓN	23
1.5. GEOPOLÍMEROS.....	25
1.6. EMISIONES DE CO ₂ EN GEOPOLÍMEROS COMO ALTERNATIVA AL CEMENTO PORTLAND	30
CAPÍTULO 2. DISEÑO DE UN GEOPOLÍMEROS CON PIEDRA PÓMEZ DE ECUADOR PARA LA ELABORACIÓN DE HORMIGONES	31
2.1. INTRODUCCIÓN	31
2.2. GEOPOLÍMEROS CON PIEDRA PÓMEZ EN ECUADOR	32
2.3. CARACTERIZACIÓN DE LA PIEDRA PÓMEZ.....	34
2.4. GEOPOLIMERIZACIÓN.....	46
2.5. DISCUSIÓN CAPÍTULO 2.....	70
2.6. CONCLUSIONES	72
CAPÍTULO 3. COMPARACIÓN DE LA DURABILIDAD FRENTE A ÁCIDOS ENTRE EL GEOPOLÍMERO DE PIEDRA PÓMEZ CON HUMO DE SÍLICE (GPP+SF) Y EL CEMENTO	74
3.1. INTRODUCCIÓN	74
3.2. MATERIALES	76
3.3. MÉTODOS	79
3.4. RESULTADOS	83
3.5. DISCUSIÓN CAPÍTULO 3.....	120
3.6. CONCLUSIONES	122
CAPÍTULO 4. COMPARACIÓN ENTRE EL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MAMPUESTOS PREFABRICADOS UTILIZANDO GEOPOLÍMERO Y CEMENTO COMO CONGLOMERANTES	124
4.1. INTRODUCCIÓN	124
4.2. MATERIALES Y MÉTODOS	125
4.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	137
4.4. ANÁLISIS DE MAMPOSTERÍA CONFINADA DE LADRILLOS PREFABRICADOS CON GPP+PL PARA EL DISEÑO DE EDIFICACIONES SIGUIENDO LA NORMATIVA ECUATORIANA NEC-SE-DS, 2015	148
4.5. DISCUSIÓN CAPÍTULO 4.....	151
4.6. CONCLUSIONES	152
CAPÍTULO 5. EMISIÓN DE CO₂ ASOCIADA A LOS ACTIVADORES Y PASTAS CONGLOMERANTES	155
5.1. INTRODUCCIÓN	155
5.2. METODOLOGÍA	156
5.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	158
5.4. DISCUSIÓN CAPÍTULO 5.....	162
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES	164
CAPÍTULO 7. FUTURAS INVESTIGACIONES	166
CAPÍTULO 8. BIBLIOGRAFÍA	167
CAPÍTULO 9. ANEXOS.....	187

CONTENIDO DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Mapa de volcanes cuaternarios del Ecuador Continental	14
Ilustración 2. Muestra los datos de consumo energético y emisiones de CO ₂ asociados a esta actividad.	17
Ilustración 3. Materiales constructivos predominantes en Ecuador. Datos por material y religión.	21
Ilustración 4. Forma base de una estructura química del geopolímero	26
Ilustración 5. Muestra de piedra pómez de cada yacimiento	32
Ilustración 6. Ubicación del yacimiento sector Gualsaqui – Imbabura.....	33
Ilustración 7 Ubicación del yacimiento “Los Pinos” – Tungurahua.	33
Ilustración 8. Ubicación de la Mina Pro Futuro	34
Ilustración 9. Metodología a seguir en el capítulo 2	34
Ilustración 10. Resultados difracción de rayos X de PP de Imbabura.....	39
Ilustración 11. Resultados difracción de rayos X de PP de Tungurahua.	39
Ilustración 12. Resultados difracción de rayos x de PP de Cotopaxi.	40
Ilustración 13. Resultados análisis de tamaño de partículas de PP de Imbabura	42
Ilustración 14. Resultados análisis de tamaño de partículas de PP de Tungurahua	42
Ilustración 15. Resultados análisis de tamaño de partículas de PP de Cotopaxi	43
Ilustración 16. Ensayo de absorción atómica del aluminio.....	44
Ilustración 17. Cantidad de material requerido en peso para 1kg de precursor de pasta de geopolímero.	54
Ilustración 18. Diagrama de barras del análisis de frecuencia simple.	56
Ilustración 19. Distribución de la resistencia a la compresión de las probetas	57
Ilustración 20. Diagrama de barras de la resistencia media de cada yacimiento.	57
Ilustración 21. Diagrama de cajas en función de la resistencia de cada yacimiento.	59
Ilustración 22. Dispersión de puntos en función de la resistencia a la compresión y la concentración molar de NaOH.	60
Ilustración 23. Cantidades utilizadas para la elaboración de probetas.	62
Ilustración 24. Diagrama de barras del análisis de frecuencia simple del número de probetas.	66
Ilustración 25. Diagrama de barras del análisis de frecuencia simple de resistencia a compresión.	66
Ilustración 26. Diagrama de cajas en función de la resistencia de cada yacimiento.	68
Ilustración 27. Diagrama de cajas en función del porcentaje de áridos.	69
Ilustración 28. Análisis descriptivo de datos de Cotopaxi.	69
Ilustración 29. Análisis descriptivo de datos de Imbabura.	70
Ilustración 30. Análisis descriptivo de datos de Tungurahua.	70
Ilustración 31. Metodología a seguir capítulo 3	79
Ilustración 32. Densidad media a concentraciones de 8M y 12M.	86
Ilustración 33. Porcentaje de absorción del GPP+SF con 8M de concentración a los 28 días	87
Ilustración 34. Porcentaje de absorción del GPP+SF con 12M de concentración a los 28 días	87
Ilustración 35. Elaboración de las probetas de CP.....	90
Ilustración 36. Elaboración de las probetas de GPP+SF	90
Ilustración 37. Curado de las probetas de GPP+SF en el horno.	90
Ilustración 38. Resistencia a compresión a la edad de 7 días en probetas de CP y GPP+SF	91

Ilustración 39. Resistencia a compresión a la edad de 28 días en probetas de CP y GPP+SF.	92
Ilustración 40. Resistencia a flexión a la edad de 7 días en probetas de CP y GPP+SF.	93
Ilustración 41. Resistencia a flexión a la edad de 28 días en probetas de CP y geopolímero de piedra pómez.	93
Ilustración 42. Valoración del ácido nítrico antes y después del cambio de color del indicador.	95
Ilustración 43. ANC de pH combinado (2-4-7) en muestras de CP.	97
Ilustración 44. ANC de pH combinado (2-4-7) en muestras de GPP+SF.	98
Ilustración 45. ANC de pH combinado (2-4-7) en matrices de CP y GPP+SF.	99
Ilustración 46. Ácido añadido y masa residual vs tiempo en probeta de CP 1.	100
Ilustración 47. Ácido añadido y masa residual vs tiempo en probeta de CP 2.	100
Ilustración 48. Ácido añadido y masa residual vs tiempo en probeta de CP 3.	101
Ilustración 49. Ácido añadido y masa residual vs tiempo en probeta de GPP+SF 1.	102
Ilustración 50. Ácido añadido y masa residual vs tiempo en probeta de GPP+SF 2.	102
Ilustración 51. Ácido añadido y masa residual vs tiempo en probeta de GPP+SF 3.	103
Ilustración 52. Cantidad promedio de ácido añadido frente al tiempo en CP y GPP+SF.	104
Ilustración 53. Pérdida de masa en probetas de CP vs GPP+SF en el tiempo	104
Ilustración 54. Muestras prismáticas monolíticas de CP y geopolímero GPP+SF después de ensayar 120 horas en ácido nítrico.	105
Ilustración 55. Masa residual de probetas de CP atacadas en un entorno agresivo extremo versus tiempo.	106
Ilustración 56. Masa residual promedio y variación de pH en probetas de CP atacadas en un entorno agresivo extremo frente al tiempo.	106
Ilustración 57. Masa residual de probetas de GPP+SF en un entorno agresivo extremo versus tiempo	107
Ilustración 58. Masa residual promedio y variación de pH en probetas de GPP+SF atacadas en un entorno agresivo extremo frente al tiempo.	108
Ilustración 59. Masa residual promedio frente al tiempo para muestras cúbicas monolíticas de CP y geopolímero de piedra pómez GPP+SF	109
Ilustración 60. Registro fotográfico de la evolución de las probetas sometidas a un ataque ácido extremo.	110
Ilustración 61. Morfología y topografía antes y después del ataque ácido controlado	111
Ilustración 62. Composición elemental en probetas prismáticas de GPP+SF sin recibir ataque ácido.	112
Ilustración 63. Gráfica de la composición elemental en probetas prismáticas de GPP+SF atacadas con ácido por 24 horas.	112
Ilustración 64. Gráfica de la composición elemental en probetas prismáticas de GPP+SF atacadas con ácido por 120 horas.	112
Ilustración 65. Gráfica de la composición elemental según tiempo de ataque ácido.	114
Ilustración 66. Registro fotográfico de la sección transversal y superficie de probetas sumergidas con ácido durante 120 horas, obtenidas por microscopía óptica a aumentos de x10, x20, x30, x40	115
Ilustración 67. Registro fotográfico de la sección transversal y superficie de probetas sumergidas con ácido durante 61 días, obtenidas por microscopía óptica a aumentos de x10, x20, x30, x40.	117
Ilustración 68. Registro fotográfico de la profundidad de corrosión en probetas prismáticas sumergidas con ácido durante 120 horas y probetas cúbicas atacadas agresivamente por 61 días.	119
Ilustración 69. Profundidad de corrosión promedio de las probetas prismáticas y cúbicas expresados gráficamente	120
Ilustración 70. Metodología para capítulo 4.	125

Ilustración 71. Resistencia a la compresión de mezclas de mortero de mampostería	129
Ilustración 72. Diámetro inferior interior incrementados	131
Ilustración 73. Lecturas de diámetros.....	131
Ilustración 74. Resistencia a la compresión de morteros en función del tiempo de curado.....	133
Ilustración 75. Requisitos fundamentales en viviendas de mampostería confinada.....	136
Ilustración 76. Composición elemental de pasta de CP a los 28 días.....	139
Ilustración 77. Composición elemental de pasta de GPP a los 28 días.	140
Ilustración 78. Composición elemental de pasta de GPP+PL a los 28 días.	140
Ilustración 79. Micrografías SEM de CP, GPP y GPP+PL	142
Ilustración 80. Resistencia a compresión a la edad de 14 y 28 días en pastas y morteros.	142
Ilustración 81. Resistencia a flexión a la edad de 14 y 28 días en pastas.	143
Ilustración 82. Densidad de pastas a los 28 días.	144
Ilustración 83. Absorción de pastas a los 28 días.	145
Ilustración 84. Resistencia a la compresión de mampuestos.	146
Ilustración 85. Resistencia a la flexión de mampuestos.	147
Ilustración 86. Modelado en ETABS de diseño estructural de mampostería confinada tradicional.....	148
Ilustración 87. Modelado en ETABS de diseño estructural de mampostería confinada con geopolímero de PP.....	149
Ilustración 88. Desplazamiento del muro con mampostería confinada con propiedades convencionales.	150
Ilustración 89. Desplazamiento del muro con mampostería confinada con propiedades del GPP + PL .	150
Ilustración 91. Metodología para capítulo 5.....	156
Ilustración 92. Emisiones de CO ₂ por kilogramo de precursor	159
Ilustración 93. Emisiones de CO ₂ por kg de material por litro de disolución.....	160
Ilustración 94. Emisiones de CO ₂ (kg/kg)	161

CONTENIDO DE TABLAS

Tabla 1. Producción mundial de piedra pómez.....	13
Tabla 2. Impacto ambiental de los principales materiales de la construcción	18
Tabla 3. Estimación de las emisiones producidas en los procesos de operación y construcción.....	18
Tabla 4. Coordenadas yacimiento de Imbabura.....	32
Tabla 5. Coordenadas yacimiento de Tungurahua.	33
Tabla 6. Coordenadas yacimiento de Cotopaxi.	34
Tabla 7. Resultados ensayo de difracción por rayos X de PP de Imbabura	39
Tabla 8. Resultados ensayo de difracción por rayos X de PP de Tungurahua	39
Tabla 9. Resultados ensayo de difracción por rayos X de PP de Cotopaxi	40
Tabla 10. Resultados de la fluorescencia de la PP de Cotopaxi.....	41
Tabla 11. Lecturas de muestras de ensayo de absorción atómica de aluminio	44
Tabla 12. Resultados de porcentaje de aluminio.....	45
Tabla 13. Resultados del ensayo del módulo de finura.	46
Tabla 14. Especificaciones técnicas del Hidróxido de Sodio.....	47
Tabla 15. Especificaciones técnicas silicato de sodio.....	47
Tabla 16. Concentración molar de hidróxido de sodio en 1000 ml de solución.....	52
Tabla 17. Cantidad de material requerido en peso para 1kg de precursor.	53
Tabla 18. Densidad aparente máxima de los agregados.....	54
Tabla 19. Resultados de resistencia a la compresión de geopolímero	55
Tabla 20. Muestra de cubos de pasta geopolimérico	56
Tabla 21. Análisis descriptivo de datos en función de la resistencia.	56
Tabla 22. Análisis descriptivo de datos de Cotopaxi.....	58
Tabla 23. Análisis descriptivo de datos de Imbabura.....	58
Tabla 24. Análisis descriptivo de datos de Tungurahua.	58
Tabla 25. Tamaño máximo (TM), Tamaño máximo nominal (TMN) y Módulo de finura (MF)	60
Tabla 26. Condiciones iniciales del HGP.....	61
Tabla 27. Cantidad de material utilizado en el HGP	61
Tabla 28. Resultados ensayos de compresión de la provincia de Cotopaxi.....	63
Tabla 29. Resultados ensayos de compresión de la provincia de Imbabura.....	64
Tabla 30. Resultados ensayos de compresión de la provincia de Tungurahua.	65
Tabla 31. Muestra de cilindros de hormigón geopolimérico.....	65
Tabla 32. Análisis descriptivo de datos de resistencia a compresión del HGP con el GPP elaborado con precursor la PP Cotopaxi.	67
Tabla 33. Análisis descriptivo de datos de resistencia a compresión del HGP con el GPP elaborado con precursor la PP Imbabura.	67
Tabla 34. Análisis descriptivo de datos de resistencia a compresión del HGP con el GPP elaborado con precursor la PP Tungurahua.....	67
Tabla 35. Composición química del SF	76
Tabla 36. Información técnica del cemento portland tipo GU marca "CHIMBORAZO".	77
Tabla 37. Características del ácido nítrico usado.....	78
Tabla 38. Relaciones de los materiales usados en la dosificación de las muestras	84

Tabla 39. Resistencia a la compresión vs tiempo: concentración de NaOH = 8M.	84
Tabla 40. Resistencia a la compresión vs tiempo: concentración de NaOH = 12M.	85
Tabla 41. Resistencia a la flexión vs tiempo: concentración de NaOH = 8M.	85
Tabla 42. Resistencia a la flexión vs tiempo: concentración de NaOH = 12M.	85
Tabla 43. Número de probetas utilizadas por cada ensayo.....	89
Tabla 44. Cantidad de material utilizado por cada mezcla.....	89
Tabla 45. Análisis estadístico de los resultados de la resistencia a compresión a los 7 y 28 días en probetas de CP y GPP+SF	91
Tabla 46. Análisis estadístico de los resultados de la resistencia a la flexión a los 7 y 28 días en probetas de CP y GPP+SF	93
Tabla 47. Factor de corrección ANC.....	95
Tabla 48. Valores de pH inicial de las muestras antes del ensayo ANC de pH combinado.	96
Tabla 49. Resultados ANC de pH combinado para valores de pH de 7, 4 y 2.....	96
Tabla 50. Resultados crudos de la composición elemental en probetas prismáticas.	113
Tabla 51. Resultados normalizados de la composición elemental en probetas prismáticas.	113
Tabla 52. Valores de la profundidad de corrosión en probetas prismáticas sumergidas con ácido durante 120 horas y probetas cúbicas atacadas agresivamente por 61 días.....	119
Tabla 53. Análisis cualitativo del PL	126
Tabla 54. Resultados de la fluorescencia del PL.....	127
Tabla 55. Dosificación del activador.	128
Tabla 56. Dosificación del precursor y activador.	128
Tabla 57. Fluidez de morteros.....	137
Tabla 58. Actividades realizadas en el proyecto de investigación	139
Tabla 59. Derivas máximas calculadas según la (NEC- SE- DS, 2015)	151
Tabla 60. Cemento tipo GU: composición química	157
Tabla 61. Cantidad de material requerida para la elaboración de pastas	159
Tabla 62. Emisiones de CO ₂ comparando la concentración y resistencia a la compresión.	161

Planteamiento del problema

La industria de la construcción es una de las principales fuentes de emisiones de dióxido de carbono (CO_2) a nivel global, afectando significativamente al cambio climático (Chatan House Report, 2018). Dentro de esta industria, la producción de materiales de construcción convencionales, como el cemento Portland (CP) que es usado para elaborar hormigones, mampuestos, prefabricados, etc., generan un impacto ambiental considerable debido al alto consumo energético y a los procesos químicos involucrados. (Navas de Garcia et al., 2015). Por ejemplo, la fabricación de CP, principal componente del hormigón, representa cerca del 7% de las emisiones globales de CO_2 (Scrivener et al., 2018). Estas cifras reflejan la urgencia de explorar alternativas sostenibles que puedan reducir la huella de carbono en este sector.

En el contexto de Ecuador, donde la construcción es un motor clave de desarrollo, el uso de materiales tradicionales sigue predominando debido a su disponibilidad, costo y familiaridad técnica (Bedoya, 2018). Sin embargo, las normativas ambientales y la necesidad de construir bajo parámetros más sostenibles impulsan la búsqueda de soluciones que equilibren funcionalidad, costo y sostenibilidad. La dependencia de tecnologías convencionales limita la implementación de nuevos materiales con menor impacto ambiental: la madera laminada cruzada (CLT), que es renovable y almacena carbono; la bioconstrucción con micelio, que utiliza hongos para crear materiales biodegradables; y los materiales de cambio de fase (PCM), que optimizan la eficiencia energética de las edificaciones; y una de las más innovadoras para reducir la huella de carbono del cemento es la elaboración del mismo con materiales como los geopolímeros, Davidovits, (2015) menciona que podrían ofrecer una alternativa prometedora al reducir significativamente las emisiones de CO_2 en su producción.

Solorzano, (2024) expone que existe falta de estudios en Ecuador que proponga innovaciones como reemplazo a los materiales convencionales y comparen su funcionamiento con tecnologías alternativas, considerando tanto su viabilidad técnica como económica. Esto genera un vacío de información para la toma de decisiones en proyectos constructivos sostenibles, limitando la transición hacia prácticas más amigables con el medio ambiente. Por tanto, es necesario investigar cómo los materiales convencionales y alternativos contribuyen al impacto ambiental de la industria de la construcción, con el fin de desarrollar estrategias que permitan reducir la emisión de CO_2 y fomentar una construcción más sostenible en Ecuador.

Objetivos

Este proyecto tiene como finalidad innovar en el ámbito de la construcción sostenible a través del diseño y desarrollo de un geopolímero basado en piedra pómez de Ecuador. Para lograr este objetivo general, se plantea una serie de metas específicas que incluyen la exploración y caracterización de las propiedades fisicoquímicas de la piedra pómez, el desarrollo de un geopolímero óptimo empleando este material como precursor, y la evaluación de su durabilidad frente a ataques ácidos controlados. Finalmente, se busca aplicar el geopolímero obtenido como conglomerante en la formulación de morteros, hormigones y mampuestos ligeros, abriendo el camino hacia nuevos materiales de construcción que contribuyan a la innovación y sostenibilidad en el sector.

Objetivo general

Diseñar un geopolímero utilizando como materia prima la piedra pómez de Ecuador y con este generar nuevos materiales de construcción.

Objetivos específicos

- Explorar las propiedades fisicoquímicas de la piedra pómez de Ecuador (caracterizar el material).
- Desarrollar un geopolímero óptimo utilizando como material precursor la piedra pómez.
- Identificar la durabilidad que tendrá el geopolímero bajo un ataque ácido controlado.
- Utilizar como conglomerante el geopolímero obtenido en el desarrollo de morteros, hormigones y mampuestos ligeros.

Hipótesis

La investigación tendrá un alcance exploratorio correlacional, con un enfoque cuantitativo.

Se obtendrá un geopolímero como nuevo material conglomerante, y será una alternativa de reemplazo al CP tradicionalmente utilizado en la industria de la construcción en su uso en hormigones, morteros para la elaboración de mampuestos y prefabricados, intentando reducir con esto la huella de carbono que se genera con la producción del Clinker, principal componente del CP.

Delimitación del área de estudio

Los geopolímeros están conformados por conglomerantes alternativos, se obtienen mezclando aluminosilicatos amorfos como material precursor más una solución activadora

compuesta de hidróxido de sodio y silicato de sodio. La piedra pómez se considera como una materia prima de origen volcánico producida por piroclastos, compuesta principalmente por aluminosilicatos.

En la Tabla 1 se puede encontrar los principales países con producción y reservas a nivel mundial de piedra pómez. Ecuador se encuentra en el listado con una producción y reserva de 800 millones toneladas métricas distribuidas a lo largo de la cordillera de los Andes.

Tabla 1. Producción mundial de piedra pómez

País	Producción minera 2023 en millones de toneladas	Producción minera 2023 en millones de toneladas
Guadalupe	200	200
Indonesia	200	200
Siria	200	200
Tanzania	220	230
España	240	240
Camerún	280	280
Francia	280	200
Estados Unidos	295	310
Etiopía	510	510
Guatemala	570	570
Chile	720	720
Otros países	750	700
Ecuador	800	800
Argelia	900	900
Arabia Saudita	980	980
Grecia	1,010	1,000
Uganda	1,300	1,500
Turquía	8,700	8,700
Total, mundial (redondeado)	18,200	18,000

Adaptado de (Survey, 2024)

Como se observa en la Ilustración 1, a lo largo del valle interandino existen importantes yacimientos de piedra pómez, pumitas y puzolanas. Estos depósitos se encuentran entre los más grandes del mundo debido al alto volumen de sus reservas. En Ecuador, estos yacimientos se localizan principalmente en zonas cercanas a volcanes extintos, siendo la región Sierra la que concentra la mayor parte de ellos (Cornejo, 2017).

Esta investigación se enfoca en el uso de piedra pómez proveniente de los yacimientos ubicados en las provincias de Cotopaxi, Imbabura y Tungurahua. Al combinar este material con un activador alcalino, se obtiene una mezcla con propiedades similares a las del cemento (Andrade et al., 2022). El objetivo principal es determinar cuál de estas procedencias ofrece las mejores características mecánicas para su aplicación en el estudio.

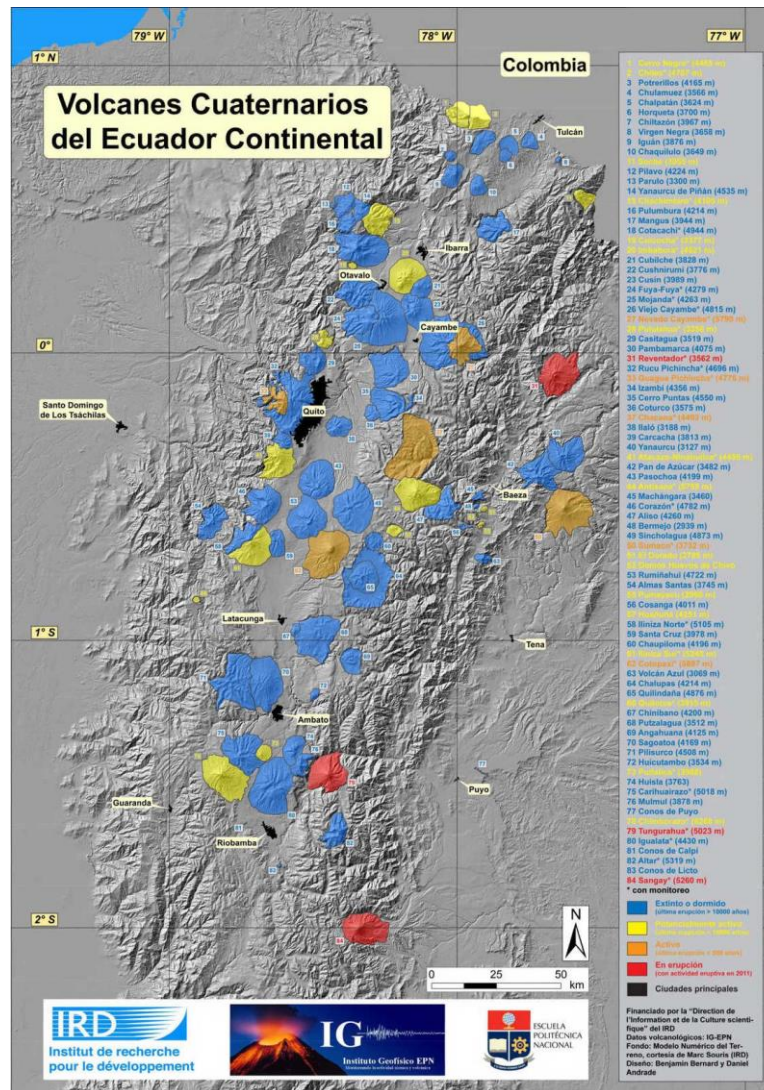


Ilustración 1. Mapa de volcanes cuaternarios del Ecuador Continental
Tomado de (Santamaría, 2017)

Metodología

Para el cumplimiento de los objetivos dentro del área de estudio señalados en los apartados anteriores se plantea la siguiente metodología por capítulos:

Capítulo 1: Estado del arte

Se realiza una revisión bibliográfica sobre la emisión de CO₂ a la atmósfera generada por el uso de materiales de construcción y la importancia de su reducción frente al cambio climático. Se indica el uso del hormigón tradicional en el Ecuador dentro de la industria, así como las innovaciones que se implementan en la construcción como reemplazo del hormigón convencional. De igual manera, se describe el uso de la piedra pómez en el ámbito constructivo y en que consiste el empleo de geopolímeros como un material conglomerante amigable con el medio ambiente.

Capítulo 2 :Diseño de geopolímeros con piedra pómez de Ecuador para la elaboración de hormigones

Se establecen los yacimientos de piedra pómez existentes en el Ecuador para posteriormente, realizar el triturado y la molienda del material hasta reducirlo a partículas inferiores a 50 micras, con el fin de efectuar la caracterización del material realizando ensayos de microscopia electrónica de barrido, medición del tamaño de partícula y absorción atómica. A continuación, se realiza la activación alcalina para establecer el diseño y la fabricación del geopolímero y continuar con el curado al horno de la mezcla. Finalmente se evalúa estadísticamente la resistencia a la compresión de un hormigón usando este conglomerante, y queda establecido cual es el yacimiento que posee el material más idóneo para la elaboración de geopolímeros.

Capítulo 3: Comparación de la durabilidad frente a ácidos entre el geopolímero de piedra pómez con humo de sílice (GPP+SF) y el cemento

Una vez probado en el capítulo 2 que la piedra pómez de Ecuador funciona como material precursor en la elaboración de geopolímeros, se optimiza la mezcla con mejor desempeño mediante la incorporación de humo de sílice y se evalúa su durabilidad. Esta adición de humo de sílice se caracteriza por su elevada superficie específica y actividad puzolánica, reacciona con los álcalis del activador para generar una mayor proporción de gel de silicato de sodio y aluminio (N-A-S-H), la fase cementante fundamental en los geopolímeros. La densificación resultante de la microestructura disminuye la porosidad e incrementa significativamente la resistencia mecánica, la durabilidad y la resistencia al ataque químico del material.

Para evaluar su capacidad de neutralización ácida (ANC), se someten los especímenes del material optimizado a ataques con ácido nítrico a diversos valores de pH, cuantificándose la pérdida de masa en función del tiempo en soluciones con pH 7, 4 y 2. Adicionalmente, se determina la pérdida de masa en condiciones de acidez extrema (pH 0). Finalmente, se emplean técnicas de microscopía electrónica de barrido (SEM) y microscopía óptica para analizar las modificaciones en la composición química y en la morfología de los especímenes tras los ensayos.

Capítulo 4: Comparación entre el comportamiento mecánico de mampuestos prefabricados utilizando geopolímero y cemento como conglomerantes.

Basándose en los resultados de los dos capítulos anteriores, en este capítulo se realizan mejoras en la mezcla para optimizar las propiedades mecánicas del geopolímero. En este caso, se añade un porcentaje de polvo de ladrillo (arcilla calcinada) como adición a la piedra pómez y se evalúa su desempeño en la elaboración de mampuestos prefabricados. Esta

adición es relevante por su carácter puzolánico, al aportar sílice y alúmina reactivas que complementan la composición del material precursor principal.

Durante la activación alcalina, estos compuestos adicionales participan en la formación de una mayor cantidad y calidad de gel geopolimérico, refinan la microestructura, disminuyen la porosidad y, consecuentemente, mejoran las propiedades mecánicas, la durabilidad y la resistencia a diversos tipos de deterioro del geopolímero.

Posteriormente, se desarrolla una serie de ensayos comparativos entre bloques prefabricados de mortero u hormigón y aquellos elaborados con conglomerantes a base de geopolímeros, con el objetivo de evaluar su resistencia mecánica y verificar su cumplimiento con los requisitos de la normativa ecuatoriana de construcción. Para ello, se fabrican bloques y ladrillos en dos versiones: una con materiales tradicionales y otra con geopolímeros a base de piedra pómez, que en algunos casos incluyen la adición de polvo de ladrillo

A continuación, los especímenes se someten a ensayos de compresión, flexión, densidad y absorción, cuyos resultados se analizan para determinar si los prefabricados con geopolímeros alcanzan o superan las resistencias exigidas. Finalmente, se comparan los datos obtenidos con los valores normativos para evaluar la viabilidad estructural y sostenible de estos materiales como una alternativa eficiente para la construcción de edificaciones sismo-resistentes.

Capítulo 5: Emisión de CO₂ producida por los activadores y pastas conglomerantes

Finalmente, para comparar las emisiones de CO₂ asociadas a la producción de las diferentes mezclas geopoliméricas desarrolladas en esta investigación con las de las pastas de cemento Portland, se aplica la metodología del IPCC, basada en el producto del nivel de actividad y su factor de emisión. El análisis se circunscribió a los materiales constitutivos del conglomerante, excluyendo las etapas de mezclado, curado y transporte.

Con base en la literatura, el cemento tipo GP empleado presenta una emisión promedio de 0,93 kg CO₂/kg. En contraste, los activadores de las mezclas geopoliméricas el NaOH y Na₂SiO₃, registran emisiones de 1,12 kg CO₂/kg y 1,2 kg CO₂/kg de material, respectivamente (Mellado et al., 2014 ; Pré Consultants, 2014). Estos valores permiten el cálculo para la evaluación del impacto ambiental relativo de cada formulación de conglomerante.

Capítulo 6: Conclusiones

En este apartado se agregan las conclusiones generales por cada capítulo.

Capítulo 7: Futuras Investigaciones

Se propondrán diversas líneas de continuación de la investigación, basadas en los resultados obtenidos y en nuevas aportaciones bibliográficas.

CAPÍTULO 1. EMISIÓN DE CO₂ EN LA CONSTRUCCIÓN, HORMIGONES TRADICIONALES E INNOVACIONES EN EL HORMIGÓN (GEOPOLÍMEROS): ESTADO DEL ARTE

1.1. La industria de la construcción y el cambio climático

La industria de la construcción es un sector importante dentro de la crisis climática debido a su elevada huella de carbono. Según el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA, 2022) este sector genera el 37 % de las emisiones globales de CO₂ asociadas a la energía y a los procesos industriales, siendo el cemento Portland uno de los principales contribuyentes. Su producción representa aproximadamente el 8 % de las emisiones mundiales de CO₂, equivalente a 2.8 gigatoneladas anuales según la International Energy Agency (IEA, 2021; Adhikari & Poudya, 2021). Este impacto se debe principalmente a la descarbonación de la piedra caliza (reacción química que libera CO₂, responsable de aproximadamente el 60–65 % del CO₂ emitido durante la fabricación de cemento (Andrew, 2018) y al uso de combustibles fósiles en hornos a altas temperaturas (Monteiro et al, 2017)

La Ilustración 2 muestra que, en el año 2022, las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) provenientes del sector de la construcción y edificación alcanzaron un nivel récord, con aproximadamente 10 gigatoneladas emitidas a nivel global según el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA, 2022). Este aumento histórico representa una grave contradicción con los compromisos del Acuerdo de París, que exige una reducción del 50 % de las emisiones del sector para el año 2030 (UNEP, 2021). De mantenerse las tendencias actuales y sin la implementación de medidas efectivas como la descarbonización de materiales y procesos constructivos, se proyecta que las emisiones del sector podrían incrementarse en un 15 % para 2050, incrementando la crisis climática (GlobalABC, 2022)

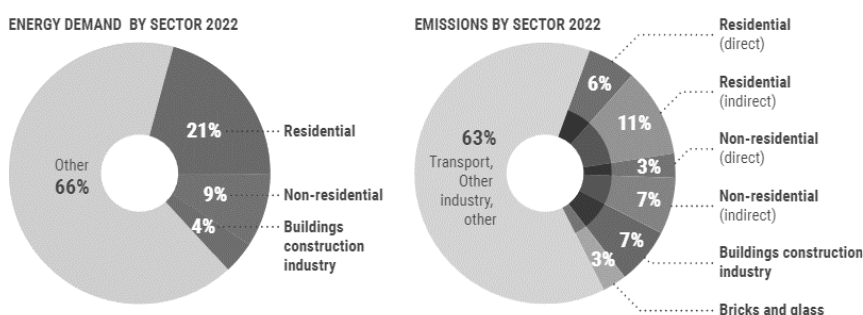


Ilustración 2. Muestra los datos de consumo energético y emisiones de CO₂ asociados a esta actividad. Tomado de (PNUMA, 2023)

La evaluación del impacto ambiental de los materiales de construcción evidencia que el cemento, el aluminio y los plásticos presentan las mayores huellas de carbono, debido a procesos de producción altamente intensivos en energía y emisiones (Hertwich et al, 2022 ; IEA, 2023). Estos materiales son responsables de una parte significativa de las emisiones globales de gases de efecto invernadero, especialmente durante la fase de fabricación. La Tabla 2 presenta una comparación detallada de la huella de carbono de estos materiales, la escala se representa con símbolos "+" donde "+" indica bajo impacto, "++" impacto medio y "+++" alto impacto, mientras que la Estimación de las emisiones producidas en los procesos de operación y construcción resume las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) asociadas a las etapas de construcción y operación de edificaciones residenciales. Dimensionando así la contribución específica de cada material y fase del ciclo de vida de la edificación, aportando información importante para el desarrollo de estrategias de descarbonización en el sector.

Tabla 2. Impacto ambiental de los principales materiales de la construcción

Material	Efecto Invernadero	Acidificación	Contaminación Atmosférica	Ozono	Metales Pesados	Energía	Residuos Sólidos
Cerámica	+	+	+	+	+	+	+++
Piedra	+	+	+	+	+	+	+++
Acero	++	++	++	+++	+++	+++	+++
Aluminio	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++
PVC	++	++	++	++	++	++	++
Poliestireno	+	+	+	+	+	+	+
Poliuretano	+++	+++	+++	++	++	++	++
Pino	+	+	+	+	+	+	+
Cemento	+++	+++	+++	+++	+++	+++	+++
Hormigón	+++	+++	+	+	+	+	+

Adaptado de (Baño & Pozo., 2005)

Tabla 3. Estimación de las emisiones producidas en los procesos de operación y construcción.

Emisiones debido a las actividades dentro de las viviendas	Carbón	496	9953 (MtCO ₂)	9 % emisiones directas
	Aceite	939		
	Gas Natural	1663	130 (MtCO ₂)	19% emisiones indirectas
	Electricidad y calefacción	6855		
Construcción de Viviendas	Uso de energía en el proceso de construcción	130	130 (MtCO ₂)	10% emisiones indirectas
Manufacturación del Material	Cemento y acero para la construcción	2038	3429 (MtCO ₂)	10% emisiones directas
	Otros Materiales	1391		
Cadena de valor de la industria de la construcción y vivienda			13512	38% de la energía total relacionada a las emisiones

Adaptado de (Baño & Pozo., 2005)

Schneider, (2019) enfatiza la necesidad de buscar alternativas sostenibles en la industria de la construcción, específicamente en el cemento Portland para reducir su impacto ambiental. En línea con esto, la (IEA , 2023) destaca que la incorporación de materiales

conglomerantes alternativos podría reducir hasta un 30% las emisiones de CO₂ asociadas a la producción tradicional de cemento Portland (Lothenbach, B., 2021), siempre que se igualen o superen barreras técnicas y normativas.

El Acuerdo de París establece el objetivo de limitar el calentamiento global por debajo de los 2 °C respecto a niveles preindustriales antes del 2030 (IEA, 2023; PNUMA, 2023; UNFCCC, 2015). Para alcanzar esta meta, resulta necesario acelerar de manera significativa las tasas de renovación y transformación en infraestructuras, promoviendo prácticas más sostenibles y materiales con menor huella de carbono (Navas de Garcia et al., 2015). Además, la (IEA, 2023) señala que la eficiencia energética, la electrificación de edificios y la sustitución de materiales convencionales por alternativas de bajo impacto, como geopolímeros y cementos suplementarios, serán estrategias fundamentales en la transición hacia una construcción baja en carbono.

El principal desafío de esta investigación radica en la escasa disponibilidad de estudios locales que evalúen integralmente el impacto ambiental de los materiales de construcción convencionales frente a alternativas sostenibles, considerando no solo su desempeño mecánico sino también su viabilidad económica y aceptación (Bedoya Montoya, 2011; Pacheco-Torgal et al., 2013). Esta carencia genera un vacío para la toma de decisiones en proyectos constructivos en Ecuador, obstaculizando la implementación de prácticas sostenibles (Alotaibi et al., 2022)

Investigaciones como las de (Albornoz Muñoz, 2015; León-Velez & Guillén-Mena, 2020; Martínez García, 2017; Mellado et al., 2014) han cuantificado la huella de carbono del cemento Portland comparado con conglomerantes alternativos (geopolímeros y cementos con residuos industriales), siguiendo los fundamentos de (Davidovits, 2015 Y Deventer, 2014). No obstante, persisten brechas en el análisis de disponibilidad de materias primas locales, evaluación de desempeño a corto/largo plazo, y escalabilidad industrial (Hossain et al., 2020). Superar estas limitaciones permitiría desarrollar estrategias basadas en evidencia para reducir emisiones de CO₂ en construcción, alineadas con los objetivos del (GlobalABC., 2023), y acelerar la transición hacia modelos circulares en el sector.

1.2. Métodos convencionales de construcción en Ecuador

En Ecuador, la construcción convencional se basa mayoritariamente en el uso de hormigón vertido in situ, con sistemas de encofrado tradicionales con un alto grado de intervención manual. Este modelo constructivo, ampliamente adoptado por su flexibilidad en diseños personalizados y su bajo costo inicial, se sustenta en la disponibilidad local de cemento Portland y agregados naturales (Cámara de la Construcción de Guayaquil., 2023; NEC-SE-HM., 2015).

A pesar de su aceptable desempeño sísmico en edificaciones de hasta mediana altura, esta práctica presenta limitaciones notables en cuanto a eficiencia y sostenibilidad. Entre las principales deficiencias destacan los bajos ritmos de avance en obra (Smith et al., 2020), elevados niveles de desperdicio de materiales hasta un 15% en hormigón y un 30% en madera (Barbhuiya et al., 2024) así como dificultades en el control de calidad y repetitividad de los procesos constructivos (Siman & Nugraha, 2024).

En contraste, los sistemas industrializados, como el prefabricado de hormigón, permite incrementar hasta tres veces la productividad, reducir significativamente los residuos y acortar los plazos de ejecución, mejorando además las condiciones laborales y la ejecución técnica (Castillo et al., 2023; Pastori et al., 2022). Estos beneficios han impulsado el interés por soluciones híbridas, que integran elementos prefabricados con estructuras vertidas in situ, especialmente en edificaciones urbanas de rápida ejecución.

Paralelamente, se observa un creciente impulso hacia el desarrollo de materiales cementantes alternativos, tales como geopolímeros o mezclas con residuos industriales (cenizas volantes, escorias, humo de sílice), capaces de reducir considerablemente la huella de carbono asociada al cemento Portland tradicional (Kaja & Goyal, 2023; Scrivener et al., 2018). Estas tecnologías ofrecen nuevas posibilidades para construir de forma más sostenible sin comprometer el rendimiento mecánico ni la durabilidad.

La transición hacia estos sistemas no implicará una sustitución total de las técnicas convencionales, sino su complementación estratégica, con el objetivo de mejorar la competitividad del sector, disminuir el impacto ambiental y optimizar el desempeño técnico del uso del hormigón en el contexto ecuatoriano.

1.2.1 Hormigones utilizados tradicionalmente

Los hormigones usados de manera tradicional se rigen por la normativa ecuatoriana NTE INEN 1856:2010 (Hormigón endurecido) y (NEC-SE-HM., 2015) para diseño estructural. Los tipos más comunes son: Hormigón convencional ($f'c = 210\text{-}280 \text{ kg/cm}^2$), empleado en estructuras no expuestas a ambientes agresivos; hormigón de media resistencia ($f'c = 300\text{-}350 \text{ kg/cm}^2$) para losas y columnas en edificación media y hormigón de alta resistencia ($f'c \geq 420 \text{ kg/cm}^2$), usado en puentes y edificios altos (Espinoza et al., 2020). La (Cámara de la Construcción de Guayaquil., 2023), muestra que estos materiales representan más del 85% del consumo nacional de cemento evidenciando la necesidad de adoptar alternativas sostenibles alineadas con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS 9 y 11) y la (ISO 13315-1., 2012) para reducción de CO₂.

En la Ilustración 3 el INEC, (2021) confirma que el hormigón es el principal material de construcción en Ecuador, lo que evidencia su alta disponibilidad, versatilidad y cumplimiento con normativas estructurales como la NEC-SE-CG que regula el diseño y construcción con

hormigón estructural (MIDUVI, 2017). Este predominio también refleja una dependencia significativa del cemento Portland y del sistema constructivo tradicional, lo que plantea desafíos frente a la sostenibilidad y emisiones de CO₂ asociadas a este tipo de materiales.; sin embargo, es fundamental evaluar también los niveles de comodidad y desempeño de estas soluciones para garantizar su viabilidad a largo plazo como lo enfatizan (Turner & Collins, 2013; J. Zhang, 2019).

Materiales predominantes

Datos por tipo de material y región.



INEC | Buenas cifras, mejores vidas

En 2021, el hormigón fue el principal material de construcción para cimientos y estructuras, en todas las regiones. En el caso de cubiertas, el zinc (láminas metálicas) es más utilizado en las regiones Costa y Amazonia.

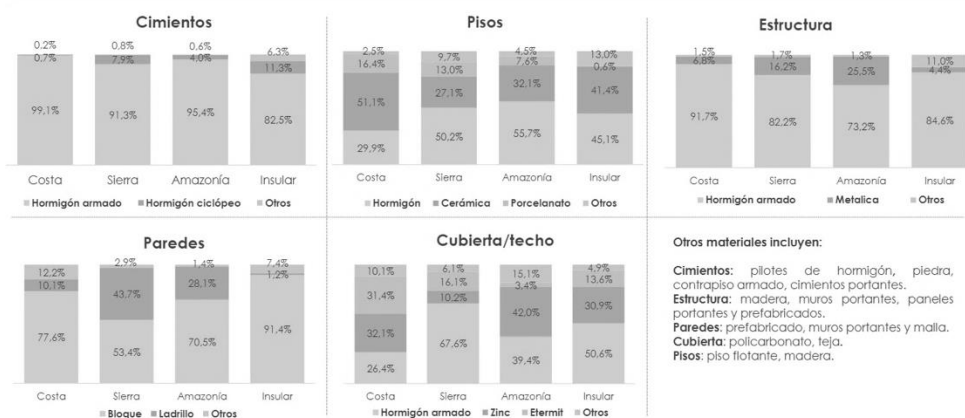


Ilustración 3. Materiales constructivos predominantes en Ecuador. Datos por material y región. Tomado de Indicadores de edificaciones, (INEC, 2021)

1.2.2. Prefabricados de hormigón

Existen un amplio uso de este material en infraestructura vial, edificaciones industriales y vivienda social, debido a su rapidez de ejecución, control de calidad y reducción de residuos en obra, los más utilizados son hormigón de alta resistencia temprana con un ($f'c = 350 - 500 \text{ kg/cm}^2$) en elementos estructurales como vigas, pilotes y losas alveolares debido a su capacidad para alcanzar altas resistencias en corto tiempo, cumpliendo con los estándares establecidos en la Norma NTE INEN 1856:2010 y ASTM C39. Por otro lado, el hormigón autocompactante que incorpora aditivos superplastificantes conforme a la norma ASTM C1611, 2014, lo que le confiere una elevada fluidez sin requerir vibrado, siendo ideal para elementos arquitectónicos complejos. Finalmente, el hormigón fibroreforzado, que incluye fibras de acero o polipropileno según ACI 544, mejora significativamente la resistencia al impacto, siendo empleado en tuberías de alcantarillado y paneles de fachada. La Cámara de la Construcción de Guayaquil., (2023), indica que el 15% de los proyectos de edificación media en ciudades grandes como Quito y Guayaquil incorporan elementos prefabricados, impulsados por normativas como la NEC-SE-HM, (2015) para diseño sísmico y el (Reglamento de Construcción Sostenible, (2021) que incentiva métodos industrializados.

En la construcción de viviendas en Ecuador, los mampuestos prefabricados tradicionales como el ladrillo cerámico y los bloques de hormigón siguen siendo predominantes debido a su capacidad estructural para conformar mampostería y muros de carga. Estos materiales destacan por: su larga vida útil (más de 50 años en condiciones normales, según la normativa (NTE INEN 2860); resistencia al fuego (según la normativa (NEC-SE-FIRE: Requisitos de Resistencia Al Fuego de Elementos Estructurales., 2015)) y comportamiento ante condiciones climáticas severas (humedad, vientos y sismos), conforme a (NEC-SE-HM), lo que los convierte en opciones preferidas para garantizar la seguridad y estabilidad de edificaciones (Jackson & Zhou, 2013).

Sin embargo, a pesar de sus ventajas y disponibilidad persisten desafíos en el sector de la construcción, como la limitada capacidad tecnológica local para la fabricación de prefabricados estructurales complejos, particularmente aquellos que requieren conexiones sismo-resistentes avanzadas, fundamentales en contextos sísmicos como el ecuatoriano. A ello se suma la alta dependencia del cemento Portland convencional como principal aglomerante en los procesos constructivos, lo que incrementa las emisiones de CO₂ (Monteiro et al, 2017)) y la huella ambiental del sector (IEA, 2021). Por tal razón, surge la necesidad de investigar y aplicar alternativas sostenibles, como los geopolímeros elaborados a partir de materiales aluminosilicatos disponibles localmente, entre ellos la ceniza volcánica y la piedra pómez, los cuales han demostrado un alto potencial como sustitutos del cemento Portland, tanto en propiedades mecánicas como en desempeño ambiental (Guzmán et al., 2019 ; Vizcarra, G., Medina & Huamaní, 2020).

1.3. Innovaciones al hormigón

En los últimos años, la industria de la construcción ha enfocado esfuerzos en el desarrollo de nuevos procesos para la fabricación de hormigones sostenibles, buscando reducir la huella de carbono sin comprometer el rendimiento estructural. Una de las estrategias exploradas ha sido el uso de residuos reciclados, que han permitido la producción de elementos prefabricados como ladrillo o bloques con igual o mayor resistencia a la compresión de lo tradicional (Bonilla et al., 2022; Mehta & Monteiro, 2014; Schwarz et al., 2010 ; Siddique et al., 2017). Paralelamente, los geopolímeros representan una de las innovaciones más prometedoras como alternativa al cemento Portland, debido a que reducen aproximadamente a un 80% las emisiones de CO₂ durante su producción (Collins & Turner, 2013; Davidovits, 2008; Villca Pozo, 2021). Estos materiales, también conocidos como cementos activados alcalinamente, se elaboran a partir de precursores aluminosilicatos como cenizas volantes, escorias de alto horno, metacaolín, piedra pómez, etc., activados mediante soluciones alcalinas de hidróxidos y silicatos (Duxson et al, 2007; Deventer, 2009). Su desarrollo ha avanzado significativamente con el uso de activadores más ecológicos y tecnologías de curado a temperatura ambiente, lo que mejora su viabilidad industrial (Fernandez et al., 2010)

Técnicamente, los geopolímeros ofrecen alta resistencia temprana, durabilidad química, baja permeabilidad y excelente comportamiento frente al fuego, lo cual los hace ideales para aplicaciones en infraestructuras expuestas a ambientes agresivos como túneles, costas e industrias químicas (Palomo et al., 1999; Zhang, 2024). Si bien aún enfrentan desafíos como la variabilidad en la calidad de los precursores, la falta de normativas específicas, y ciertas limitaciones en la trabajabilidad, su adopción sigue en aumento gracias a su impacto positivo en la sostenibilidad (Cajamarca & Paullán, 2023). Por otro lado, los avances en hormigones de ultra alto rendimiento también han captado atención, destacándose por resistencias superiores a 150 MPa y una microestructura extremadamente densa, lograda mediante el uso de fibras metálicas o sintéticas, lo que los hace idóneos para elementos esbeltos, duraderos y prefabricados (Bella et al., 2020; Graybeal, 2006; Orejuela et al., 2024; Richard & Cheyrezy, 1995). En conjunto, estas innovaciones reflejan la necesidad urgente de transformar el paradigma tradicional del hormigón hacia soluciones que conjuguen rendimiento, durabilidad y compromiso ambiental.

1.4. La piedra pómez en la industria de la construcción

La amplia disponibilidad de piedra pómez a nivel mundial refuerza su potencial como recurso sostenible para la industria de la construcción. En 2024, la producción global de este material alcanzó aproximadamente 18 mil millones de toneladas, con Turquía, Etiopía, Italia y Grecia destacándose como los principales países productores (IEA, 2021; Survey, 2024). En el caso de Ecuador, se estima una producción anual cercana a 800 mil toneladas métricas, concentrada en las provincias andinas de Pichincha, Tungurahua y Cotopaxi, esta última reconocida por albergar los mayores yacimientos de piedra pómez del país (Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables, 2022; Solís et al., 2024).

La piedra pómez se utiliza como agregado liviano natural en la producción de hormigones ligeros, gracias a su baja densidad y adecuada resistencia mecánica. En particular, permite obtener hormigóns con resistencias a compresión $f'c \geq 17$ MPa y densidades en el rango de 1.600–1.900 kg/m³, cumpliendo con los requisitos establecidos para hormigóns semiligeros según la norma ASTM C330/C330M-23 (2023). Estas propiedades la hacen ideal para aplicaciones como losas aligeradas, paneles divisorios y mampostería no portante (ACI Committee 213, 2003; Mehta & Monteiro, 2014; Snellings et al., 2012). Investigaciones han demostrado que las mezclas que integran piedra pómez y arcilla expandida en estado seco presentan mejores propiedades físico-mecánicas que aquellas formuladas en condiciones de saturación (Puertas et al., 2006; Santamaría et al., 2021). Además, la incorporación de fibras de polipropileno y humo de sílice puede incrementar la resistencia a compresión hasta en un 30%, además de mejorar la trabajabilidad y reducir la retracción plástica (Kockal et al., 2018).

Aunque la piedra pómez, por sí sola, no cumple con los parámetros para un hormigón estructural liviano (densidad $<1850 \text{ kg/m}^3$ y $f'c \geq 17 \text{ MPa}$) definidos por el ACI 213R-03, su desempeño puede optimizarse mediante mezclas híbridas que incluyan otros agregados ligeros o combinaciones con aditivos minerales, permitiendo su uso estructural parcial (NEC-SE-HM., 2015; Mindess et al., 2003). Estudios recientes en Ecuador y otros países han validado el potencial del hormigón ligero modificado con arcilla expandida y piedra pómez, destacando mejoras en resistencia mecánica, durabilidad, aislamiento térmico y absorción acústica, consolidando su viabilidad como solución constructiva sostenible para edificaciones livianas (Andrade et al., 2024; Criado et al., 2020; Duxson et al., 2007).

Debido a su estructura amorfa y su alta concentración de óxidos de silicio (SiO_2) y aluminio (Al_2O_3), la piedra pómez constituye un precursor altamente reactivo para la síntesis de conglomerantes geopoliméricos. Su composición química y morfología porosa favorecen su activación alcalina, especialmente cuando es finamente molida, con tamaños de partícula inferiores a $20 \mu\text{m}$ (Falizi et al., 2018).

Investigaciones recientes realizadas con materia prima de Ecuador han confirmado el potencial de su uso como puzolana natural para la elaboración de geopolímeros, logrando resistencias a compresión superiores a 25 MPa a los 28 días, al combinarse con activadores como hidróxido de sodio (NaOH) en concentraciones de 8–12M, y en algunos casos con silicato de sodio como coactivador (Andrade et al., 2022, Andrade et al., 2024; Cajamarca & Paullán, 2023; Solís et al., 2024). Estos valores cumplen con los criterios de desempeño establecidos por la norma ASTM C618 para materiales puzolánicos, y evidencian una reducción potencial de hasta un 40–80% en las emisiones de CO_2 , en comparación con el cemento Portland tradicional según lo mencionado por (Davidovits, 2015 ; Habert et al., 2011; Provis & Van Deventer, 2009; Turner & Collins, 2013).

Además de su menor huella de carbono, la piedra pómez activada alcalinamente mejora propiedades técnicas como la durabilidad, resistencia química, estabilidad térmica, baja permeabilidad y aislamiento térmico, lo que la hace adecuada para aplicaciones en morteros, bloques de mampostería, paneles prefabricados, hormigóns de baja densidad y elementos estructurales ligeros (Duxson et al, 2007; Rios et al., 2014).

No obstante, su implementación a escala industrial requiere mayores esfuerzos en investigación y desarrollo (I+D) enfocados en el control de la granulometría, la caracterización química-mineralógica, el ajuste de proporciones activador/precursor, y la compatibilidad con aditivos comerciales, además de la necesidad de normativas específicas para validar su desempeño en diferentes condiciones climáticas y estructurales (Bernal & Provis, 2014; Habert et al., 2011; Payá et al., 2022). En el contexto ecuatoriano, esta línea de desarrollo representa una oportunidad estratégica para la economía circular y la sostenibilidad en la construcción, dada la amplia disponibilidad local del material.

1.5. Geopolímeros

El desarrollo de materiales activados alcalinamente tiene sus orígenes a inicios del siglo XX. En 1908, se registraron los primeros estudios relacionados con la activación alcalina de materiales ricos en aluminosilicatos. Posteriormente, en la década de 1950, Glukhovsky propuso un modelo experimental que sentó las bases para el entendimiento del proceso de activación alcalina (Fernandez et al., 2010; Villca., 2021). Esta reacción transforma la materia prima en una nueva estructura molecular con propiedades fisicoquímicas mejoradas (Deventer, 2009; Rodríguez, 2009; Rovnaník, 2010; Shi et al., 2011).

En 1980, el investigador francés Joseph Davidovits acuñó el término "geopolímero" para describir polímeros inorgánicos sintéticos basados en aluminosilicatos, derivados de un proceso conocido como geopolimerización (Davidovits, 2015).

Esta reacción ocurre cuando materiales ricos en silicio y aluminio, como cenizas volantes, escorias de alto horno, metacaolín o piedra pómez, reaccionan con activadores alcalinos tales como hidróxidos, silicatos, carbonatos, sulfatos o aluminatos de sodio y potasio. Los activadores más comúnmente empleados son el hidróxido de sodio (NaOH) y el silicato de sodio (Na_2SiO_3) (Duxson et al., 2007; Safari et al., 2020; Segura-Sierpe et al., 2016).

La geopolimerización es un proceso químico en el que materiales ricos en aluminosilicatos (como cenizas volantes, escorias o metacaolín) reaccionan con activadores alcalinos, siendo los más comunes el hidróxido de sodio (NaOH) o silicato de sodio (Na_2SiO_3), para formar una matriz tridimensional de tetraedros $[\text{SiO}_4]$ y $[\text{AlO}_4]$ enlazados mediante oxígenos compartidos (Duxson et al., 2007; Safari et al., 2020). Este mecanismo consta de tres etapas clave: (1) disolución, donde los iones alcalinos desintegran los precursores, liberando especies reactivas de silicio (Si^{4+}) y aluminio (Al^{3+}); (2) condensación, en la que estos monómeros se polimerizan en oligómeros y luego en una red amorfa; y (3) precipitación y endurecimiento, donde la estructura se densifica (Provis et al., 2019). La Ilustración 4 muestra la estructura de un geopolímero, una red desordenada de tetraedros $[\text{AlO}_4]^-$ y $[\text{SiO}_4]^{4-}$, cuya carga negativa es compensada por cationes alcalinos (Na^+ , K^+) (Davidovits, 2015).

Esta configuración molecular explica las propiedades distintivas de los geopolímeros, como su alta resistencia mecánica temprana, estabilidad térmica (hasta $\sim 1200^\circ\text{C}$) y resistencia a agentes químicos agresivos, lo que los posiciona como materiales prometedores para aplicaciones estructurales y de alto desempeño.

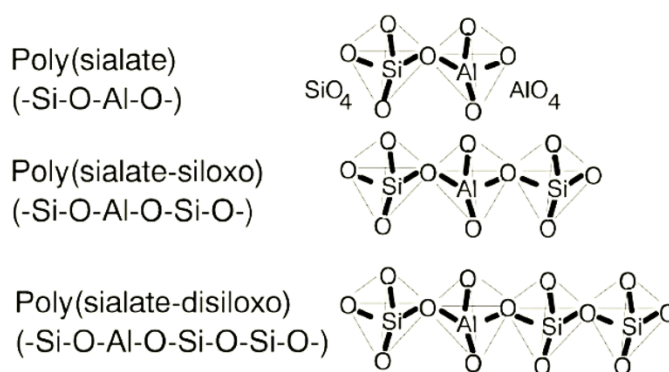


Ilustración 4. Forma base de una estructura química del geopolímero
Adaptado de (Joseph Davidovits, 2015)

El creciente interés por estos materiales ha llevado a la creación del Comité Técnico RILEM 247-DTA, dirigido por el Prof. John L. Provis, cuyo objetivo principal es evaluar y estandarizar el desempeño a largo plazo de los geopolímeros en condiciones reales de servicio (Provis et al., 2019).

1. Evaluación de durabilidad: Análisis del comportamiento frente a carbonatación, ciclos de congelación-descongelación y exposición a ambientes químicamente agresivos (Bernal & Provis, 2014).

2. Optimización de formulaciones: Desarrollo de mezclas para aplicaciones estructurales, mejorando la compatibilidad con refuerzos y propiedades adhesivas (Van Deventer et al., 2012).

3. Normalización internacional: Establecimiento de protocolos y regulaciones que faciliten su implementación en proyectos de ingeniería civil (Provis & Bernal, 2017).

Estas iniciativas buscan garantizar la confiabilidad estructural de los geopolímeros y promover su adopción masiva en la industria de la construcción, superando las actuales barreras técnicas y regulatorias (Provis et al., 2019). Los avances en esta área podrían transformar significativamente el sector construcción hacia prácticas más sostenibles, reduciendo su impacto ambiental sin comprometer el desempeño estructural.

Estudios recientes (Turner et al., 2023.; Wong et al., 2023; Zhang et al., 2014) han confirmado que los geopolímeros constituyen una alternativa técnicamente viable y ambientalmente sostenible al cemento Portland, especialmente en aplicaciones de mampostería, prefabricados y materiales de construcción. Estos materiales presentan ventajas ambientales notables, destacando una reducción del 60-80% en las emisiones de CO₂ asociadas a su producción en comparación con el cemento tradicional (Davidovits, 2020; Provis & Bernal, 2022); la capacidad de incorporar hasta un 100% de residuos industriales como materias primas, promoviendo la economía circular en el sector construcción (Huseien et al., 2022; Rodríguez, 2018; Martínez, 2017; Villca, 2021); y un menor consumo energético durante su

fabricación, estimado en un 50-60% menor que el requerido para el cemento Portland (Shi et al., 2023). Estas características, sumadas a su excelente durabilidad y resistencia química Nematollahi et al., (2023), muestran a los geopolímeros como una solución para la transición hacia una construcción más sostenible (Abdulkareem et al., 2023; Van Deventer, 2023).

1.5.1. Durabilidad de geopolímeros

La durabilidad de los materiales cementantes alternativos, como los geopolímeros, ha sido objeto de creciente interés en la última década debido a su potencial para sustituir al cemento Portland en aplicaciones estructurales y no estructurales (Bernal & Provis, 2014; Provis et al., 2019). A diferencia del cemento tradicional, los geopolímeros presentan una microestructura densa y una química de enlace distinta, lo que puede conferirles una mayor resistencia a diversos agentes agresivos (Davidovits, 2020; Zhang., 2021).

Provis y Bernal (2014) sentaron las bases para comprender la durabilidad de los geopolímeros al analizar su microestructura y la química de sus productos de reacción. Identificaron que la formación de geles tipo N-A-S-H (sodio-aluminio-silicato hidratado), junto con una microestructura compacta y baja porosidad, confiere a estos materiales una notable resistencia frente a ataques químicos (ácidos y sulfatos), carbonatación y ciclos de congelación-deshielo. Además, subrayaron que una relación molar Si/Al óptima refuerza la integridad de la red aluminosilícica, aumentando su resiliencia ante condiciones ambientales agresivas.

Martínez (2017) analizó la huella de carbono de bloques constructivos basados en geopolímeros obtenidos a partir de residuos locales como suelos lateríticos. Su estudio demostró reducciones del 60–70 % en las emisiones de CO₂ en comparación con el cemento Portland, sin comprometer la funcionalidad estructural de los elementos. Posteriormente, estos resultados fueron respaldados por Marcillo (2021) en matrices activadas alcalinamente y Huseien et al., (2022) mediante análisis de ciclo de vida (ACV), que incluyeron factores como el consumo energético, el transporte y la durabilidad a largo plazo, confirmando la competitividad ambiental de los geopolímeros en diversos contextos geográficos y escalas de producción.

La resistencia química frente a ambientes agresivos, especialmente al ataque ácido, ha sido amplia área de estudio. Martínez (2017) propuso un protocolo específico para evaluar el desempeño de morteros activados alcalinamente frente a soluciones de H₂SO₄, observando que mezclas basadas en metacaolín conservan hasta el 85 % de su resistencia mecánica inicial tras 90 días de exposición. Estos hallazgos han sido confirmados por Marcillo Zapata (2021; Nematollahi, B., (2023) quienes vinculan esta resistencia a la elevada polimerización de los geles N-A-S-H y a su baja movilidad iónica, lo que limita la lixiviación de componentes estructurales, Fernández-Jiménez et al., (2018) demostraron que los geopolímeros presentan pérdidas de

masa hasta un 50 % menores que el cemento Portland (CP) en medios ácidos con pH entre 1 y 4.

De igual forma los geopolímeros frente al cemento Portland han mostrado mejor comportamiento ante sulfatos. Bernal et al., (2016) reportaron reducciones del 60–70 % en la formación de ettringita destructiva, debido a la baja concentración de calcio en la matriz geopolimérica. En lo referente a carbonatación, (Espinoza et al., 2020) observaron que ciertos sistemas geopoliméricos retienen entre el 85 y 90 % de su resistencia mecánica tras un año de exposición a atmósferas ricas en CO₂, gracias a la estabilidad química del gel N-A-S-H, en especial en formulaciones con bajo contenido de calcio.

La estandarización de metodologías para evaluar la durabilidad de materiales geopoliméricos ha sido una prioridad en la comunidad científica, con el objetivo de facilitar su validación normativa y adopción industrial. En este contexto, el Comité Técnico RILEM 247-DTA, bajo la coordinación de John L. Provis, ha desarrollado protocolos específicos para ensayos acelerados frente a ataques ácidos, exposición a sulfatos, ciclos térmicos, humedad y carbonatación (Provis et al., 2019). Sin embargo, como advierten Pacheco-Torgal et al., (2022) la durabilidad de los geopolímeros no depende únicamente de su formulación química, sino también de múltiples factores interrelacionados, como la calidad y tipo de precursores utilizados (metacaolín, escorias, cenizas volantes), las condiciones de activación alcalina (tipo y concentración de activadores), y los regímenes de curado, especialmente durante las primeras 72 horas de reacción. Un control preciso de estos parámetros es fundamental para garantizar un desempeño duradero en condiciones reales de exposición.

1.5.2. Mampuestos prefabricados con geopolímeros

Desde el año 2015, los prefabricados geopoliméricos han captado un creciente interés investigativo como alternativa sostenible a los productos convencionales basados en cemento Portland, particularmente en el ámbito de la construcción modular (Shi et al., 2023). De acuerdo con el *Global Geopolymer Institute* (2022), los ladrillos y bloques representan aproximadamente el 62% de las aplicaciones comerciales de geopolímeros, con resistencias a compresión que varían entre 15 y 50 MPa, dependiendo del precursor y de las condiciones de curado (Huseien et al., 2022).

Uno de los desarrollos más relevantes se centra en Europa se enmarca en el proyecto GEOBINDER, financiado por el programa *Horizon 2020*, que entre 2018 y 2022 logró fabricar bloques de mampostería utilizando cenizas volantes como único precursor, sin clinker. Estos elementos alcanzaron resistencias superiores a 28 MPa a los 28 días, cumpliendo con los requisitos de la norma (EN 771-1, 2022), que regula unidades de mampostería de hormigón y otros materiales. Además, se reportó una reducción de emisiones de CO₂ de hasta el 82% frente

a productos convencionales, consolidando su viabilidad técnico-ambiental (Pacheco-Torgal et al., 2022).

En India y Australia, la producción de ladrillos geopoliméricos basados en escorias y residuos de aluminio ha sido objeto de regulaciones parciales mediante adaptaciones de la norma IS 12894:2021 originalmente diseñada para ladrillos de ceniza volante no calcinada. Esta norma establece requisitos mínimos de resistencia a compresión ($>7,5$ MPa), absorción de agua ($<20\%$) y estabilidad dimensional. Las investigaciones Nematollahi et al., (2023); Shi et al., (2023) han demostrado que los materiales geopoliméricos superan estos valores, con resistencias superiores a 20 MPa y absorción $<7\%$, gracias a su microestructura aluminosilícica densa. No obstante, aún se reportan desafíos relacionados con la estandarización de activadores alcalinos y el escalado industrial (Provis, 2023).

En América Latina, Brasil ha liderado la adaptación para el uso de prefabricados geopoliméricos, mediante la actualización de la norma ABNT NBR 15270-3:2022, originalmente concebida para bloques cerámicos, para su aplicación en mampuestos elaborados con geopolímeros, especialmente orientados a programas de vivienda social. Esta normativa establece requisitos mínimos de resistencia a compresión (≥ 3 MPa para bloques no portantes y ≥ 6 MPa para portantes), absorción de agua ($<22\%$) y estabilidad dimensional. Martínez et al. (2023) han demostrado que bloques fabricados a partir de metacaolín residual y residuos de construcción y demolición (RCD) alcanzan resistencias superiores a 8 MPa, con absorciones entre 11–13% y una destacada durabilidad frente a la intemperie, cumpliendo ampliamente los criterios normativos.

A pesar de los avances a nivel regional e internacional en el desarrollo de materiales geopoliméricos (Provis & van Deventer, 2014), en Ecuador aún no existe normativas específicas sobre el uso de mampuestos prefabricados con geopolímeros, ni políticas públicas ni investigaciones documentadas que aborden su aplicación. Esta falta de investigación evidencia una brecha en el desarrollo de tecnologías constructivas sostenibles en el país, lo que a su vez representa una oportunidad para fomentar la investigación estableciendo estándares técnicos adaptados al contexto nacional, especialmente considerando la disponibilidad local de materias primas como la piedra pómez, el metacaolín y ciertos residuos industriales ricos en aluminosilicatos (Aragón et al., 2020; Duxson et al., 2007).

). El desarrollo de geopolímeros para elementos de mampostería deberá enfocarse en igualar o superar las propiedades mecánicas de los materiales tradicionales, garantizando un desempeño estructural conforme a las normativas ecuatorianas vigentes para mampostería con ladrillos (NTE INEN 294, NTE INEN 295, NTE INEN 296), y bloques (NTE INEN 3066), respaldado por estudios que demuestran la viabilidad técnica y el rendimiento mecánico y duradero de los geopolímeros (Davidovits, 2015; Zhang et al., 2014).

1.6. Emisiones de CO₂ en geopolímeros como alternativa al cemento Portland

Según la (IEA, 2023) en el sector de la construcción, la producción de cemento Portland contribuye aproximadamente un 7% de las emisiones globales de CO₂. Como alternativa sostenible, los materiales geopoliméricos presentan una huella de carbono hasta un 80% menor comparado con el cemento convencional (Juenger et al., 2011; Scrivener & Snellings, 2018)

Årskog et al., (2004) demostraron que los geopolímeros pueden reducir significativamente las emisiones de gases de efecto invernadero desde su producción inicial, especialmente al utilizar subproductos industriales como las cenizas volantes y las escorias, que de otro modo representarían impactos ambientales negativos. Esta conclusión ha sido respaldada por investigaciones más recientes, como las de Davidovits, (2015; Zhang et al., (2014) quienes enfatizan que la huella de carbono de los geopolímeros es menor que la del cemento Portland cuando se emplean materias primas de bajo impacto ambiental.

Habert et al., (2011 y Mellado et al., (2014) indican que la sostenibilidad de los geopolímeros depende de tres factores. En primer lugar, el tipo de precursor influye de manera significativa: residuos ricos en aluminosilicatos, como el metacaolín y las cenizas, tienden a reducir más las emisiones que aquellos precursores que requieren procesamiento térmico. En segundo lugar, el método de activación también impacta la sostenibilidad, ya que el uso de activadores alcalinos como los silicatos de sodio puede incrementar la energía incorporada; sin embargo, alternativas como activadores derivados de desechos, propuestos por Turner & Collins, (2013), ayudan a mitigar este efecto. Finalmente, la disponibilidad local de materias primas es un factor clave, ya que su transporte a largas distancias reduce considerablemente la viabilidad ambiental (McLellan et al., 2011).

Martínez (2017) y Heath et al. (2014) advierten que, a pesar de sus ventajas en términos de emisiones directas, los geopolímeros aún enfrentan desafíos importantes en la optimización energética de procesos como la calcinación y la molienda, los cuales pueden representar hasta el 30% del impacto ambiental total de su producción (Gursel et al., 2016).

En esta línea las investigaciones se centran en evidenciar a los geopolímeros como una alternativa técnicamente viable frente al cemento Portland en la reducción de emisiones de CO₂ (Scrivener et al., 2018; Juenger et al., 2022). Sin embargo, su implementación eficaz requiere análisis específicos que consideren variables regionales (Duxson et al., 2007), así como estrategias de economía circular, incluyendo la integración de residuos en cadenas de suministro locales (Salas et al., 2020). Su escalamiento exitoso no solo permitiría reducir las emisiones del sector, sino también promover la valorización de residuos, en línea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (UNEP, 2021).

CAPÍTULO 2. DISEÑO DE UN GEOPOLÍMEROS CON PIEDRA PÓMEZ DE ECUADOR PARA LA ELABORACIÓN DE HORMIGONES

2.1. Introducción

El cemento Portland es el material de construcción más utilizado en la actualidad, con una producción anual de aproximadamente 3670 megatoneladas (Pillajo Correa, 2022). La creciente demanda en la construcción, impulsada por la urbanización e industrialización, ha llevado a un aumento en el consumo de materiales, lo que ha generado la necesidad de adoptar tecnologías más sostenibles (Malavé Panchana & Jativa Toapanta, 2023). Actualmente, la producción mundial de cemento Portland supera los 4 mil millones de toneladas al año, con un crecimiento del 4%, lo que pone en riesgo la sostenibilidad de los recursos naturales y contribuye a la contaminación ambiental (Llivicura Landázuri, 2024).

Ante esta problemática, los geopolímeros han surgido como una alternativa debido a su menor consumo energético y baja emisión de CO₂. Estos materiales presentan propiedades técnicas y mecánicas similares al cemento tradicional, destacándose por su resistencia a la compresión y menor impacto ambiental (Moran et al., 2020). La piedra pómez, un material volcánico rico en aluminosilicatos, ha sido ampliamente estudiada como precursor en la síntesis de geopolímeros, una alternativa sostenible al cemento Portland debido a su menor huella de carbono (Davidovits, 2008). Su estructura amorfa y contenido de sílice (SiO₂) y alúmina (Al₂O₃) la hacen ideal para la activación alcalina, formando matrices con propiedades mecánicas comparables al hormigón convencional (Provis & van Deventer, 2014). Investigaciones han demostrado que geopolímeros basados en piedra pómez pueden alcanzar resistencias a la compresión de hasta 40 MPa, dependiendo de las condiciones de activación (Churata et al., 2022), además de ofrecer baja densidad y alta porosidad, lo que los hace ideales para elementos estructurales ligeros Kamseu & Leonelli, (2009), es fundamental considerar estrategias adecuadas de protección cuando se emplean en contacto con acero, ya que su naturaleza alcalina puede favorecer procesos de corrosión si no se implementan barreras adecuadas o recubrimientos protectores Provis & van Deventer, (2014). Su disponibilidad y bajo costo refuerzan su potencial en la fabricación de materiales de construcción eco-amigables, aunque desafíos como la variabilidad en su composición química pueden afectar la consistencia de sus propiedades (Fernández-Jiménez et al., 2005 ; Duxson et al., 2007).

En Ecuador, la producción de piedra pómez alcanzan las 800 mil toneladas métricas Survey, (2024), concentradas en la cordillera de los Andes, particularmente en las provincias de Cotopaxi, Imbabura y Tungurahua (IDAP, 2018).

En este capítulo se evalúa el potencial de los geopolímeros a base de piedra pómez de Ecuador como alternativa para su uso en el diseño de materiales cementantes (Santamaría et al., 2021). Se analizan las diferencias entre las muestras, destacando que la reactividad de la piedra pómez desempeña un papel clave en la resistencia mecánica del hormigón con geopolímero (HGP) como lo menciona (Salirrosas, 2020). Esto evidencia su viabilidad como una opción sostenible en la industria de la construcción, permitiendo reducir la dependencia del cemento Portland y minimizar el impacto ambiental asociado a su producción.

2.2. Geopolímeros con piedra pómez en Ecuador

2.2.1. Yacimientos de piedra pómez en Ecuador

Los principales yacimientos de piedra pómez (PP) se ubican en la región sierra del territorio debido a la alta incidencia de chimeneas volcánicas extintas que son recolectadas para formar largas colinas que encontramos en las provincias de Cotopaxi, Imbabura y Tungurahua (Cornejo, 2017).



Ilustración 5. Muestra de piedra pómez de cada yacimiento

Imbabura

El yacimiento de Cumbas, se localiza en el sector de Gualsaquí de la parroquia San José de Quichinche del cantón Otavalo. El área que posee abarca alrededor de 8 hectáreas. De esta se puede obtener agregado grueso y fino, puzolana y PP de diferente tamaño.

Tabla 4. Coordenadas yacimiento de Imbabura.

Coordenadas del yacimiento de PP de Imbabura		
Norte	Este	Altitud
9893289m	764720m	2752 m.s.n.m



Ilustración 6. Ubicación del yacimiento sector Gualsaqui – Imbabura.
Tomado de Google Earth Pro

Tungurahua Yacimiento “Los Pinos”

El yacimiento denominado área minera “Los Pinos” (código minero 200580) se ubica a 25 minutos del centro de Ambato dirigiéndose por la vía a Pillaro a 3.5 km del aeropuerto de Ambato. La mina se encuentra aproximadamente a 2508 metros sobre el nivel del mar en la sierra centro del Ecuador, la actividad volcánica histórica que hubo en épocas pasadas dejó como consecuencia un material liviano del cual hoy es aprovechado como material puzolánico propio para la elaboración de cemento en diferentes partes del Ecuador, exclusivamente para la industria cementera “Guapan”, localizada en la ciudad de Azogues.

Tabla 5. Coordenadas yacimiento de Tungurahua.

Coordenadas del yacimiento de PP de Tungurahua		
Norte	Este	Altitud
9868012m	769961m	2508m.s.n.m



Ilustración 7 Ubicación del yacimiento “Los Pinos” – Tungurahua.
Fuente: Google Earth Pro

Cotopaxi

El Área de Pequeña Minería PROFUTURO (código minero: 201004) se ubica a 10 minutos de la ciudad de Latacunga con una extensión aproximada de 3 hectáreas. La mina se encuentra aproximadamente a 2752 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m) en la sierra centro

del Ecuador, este lugar es muy conocido por la actividad volcánica histórica que hubo en épocas pasadas las cuales dejaron como consecuencia material liviano del cual hoy es aprovechado como material puzolánico propio para la elaboración de cemento en diferentes partes del Ecuador.

En este caso la mina está dividida en desbanques, es decir que se obtiene el material ya sea en polvo o cascajo desde la parte superior de la mina, una pala mecánica se encuentra recolectando el material para llevarlo a la zona intermedia y no son empleados ningún tipo de explosivo para su explotación por la naturaleza del material.

Tabla 6. Coordenadas yacimiento de Cotopaxi.

Coordenadas del yacimiento de PP de Cotopaxi		
Norte	Este	Altitud
9893289m	764720m	2752 m.s.n.m



Ilustración 8. Ubicación de la Mina Pro Futuro
Tomado de Google Earth Pro

2.3. Caracterización de la piedra pómez

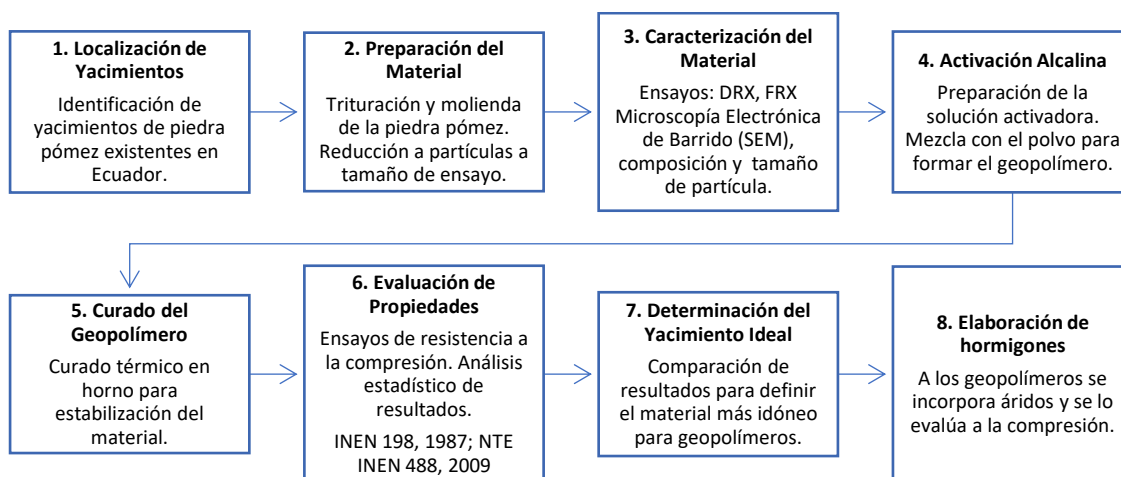


Ilustración 9. Metodología a seguir en el capítulo 2

2.3.1. Ensayo para caracterizar la piedra pómez

Para poder determinar de cada una de las muestras la composición mineralógica, la distribución del tamaño de la partícula, porcentaje de aluminosilicatos y el módulo de finura del material se han realizado los siguientes ensayos:

- Difracción de rayos X (XRD)
- Fluorescencia de rayos X (FRX)
- Análisis del tamaño de la partícula
- Ensayo de absorción atómica
- Ensayo de módulo de finura

Difracción de rayos X (XRD)

Es un método no destructivo que permitió conocer la composición cualitativa y cuantitativa de la piedra pómez según lo establecido en la normativa internacional ASTM D934-83, (2017). Según Vargas-López et al., (2022) el análisis cualitativo se realizó debido a que cada componente genera un diagrama característico e independiente de los otros, mientras que el análisis cuantitativo se obtiene a partir de que cada componente genera una intensidad de líneas de difracción la misma que es proporcional a la cantidad del componente presente en la muestra analizada (Albir, 2021).

A través de este análisis se pudo constatar la presencia o no de aluminosilicatos en el material y verificar si es amorfo presentando condiciones óptimas para su uso en el diseño de geopolímeros como material precursor (Zhang et al., 2014 (González et al., 2021).

Fluorescencia de rayos X (FRX)

Es una técnica no destructiva utilizada para determinar la composición química elemental de muestras sólidas, líquidas o en polvo. Funciona mediante la irradiación de la muestra con rayos X primarios, lo que provoca la emisión de rayos X secundarios (fluorescentes) característicos de los elementos presentes. A diferencia de la difracción de rayos X (DRX), que se utiliza para la identificación cualitativa y cuantitativa de fases minerales cristalinas, la FRX proporciona un análisis químico cuantitativo o semicuantitativo, sin distinguir entre formas minerales (Jenkins & Snyder, 1996; Beckhoff et al., 2006). La FRX es ampliamente empleada en geociencias y en el análisis de materiales cementicios y geopoliméricos debido a su alta precisión y rapidez (Rodushkin & Öhlander, 2001). En este estudio, los equipos y el procedimiento específico aplicado para esta técnica se detallan en la sección de metodología

Análisis de tamaño de partículas por microscopía

Este método se utilizó para medir la distribución de tamaños y la morfología de las partículas en la muestra según lo establecido en la normativa internacional (ISO 133322, 2014). Según Syvitski, (1991) el proceso permitió la captura de imágenes mediante el microscopio electrónico, mismo que generó un histograma de distribución de tamaños, mostrando los valores requeridos para su interpretación como $d(0.1)$, $d(0.5)$ y $d(0.9)$, los cuales representan los percentiles de la distribución: $d(0.1)$ indica el tamaño por debajo del cual se encuentra un volumen del 10% de las partículas, $d(0.5)$ (mediana) corresponde al tamaño en el que el 50% del volumen de las partículas son más pequeñas y el otro 50% más grandes, y $d(0.9)$ señala el tamaño bajo el cual se encuentra el 90% de volumen las partículas. Este método permitió caracterizar la piedra pómez mostrando si la muestra posee el tamaño recomendable, es decir inferior a 150 micras para la elaboración de geopolímeros (Acosta, 2011).

Ensayo de absorción atómica

Es un método que permite conocer el porcentaje de aluminio presente en la piedra pómez según lo establecido en las normativas internacionales ISO 15586, (2004) ; ASTM E863, (2004) y EPA Method . El proceso comenzó con el pesaje de 0.5 g de muestra de cada yacimiento según lo descrito por (Ibrahim, 2022). Luego, las muestras fueron expuestas a ácido nítrico como agente corrosivo durante un periodo de 3 a 6 días, bajo calor, para descomponer los componentes (Kebbekus, 2003). Posteriormente, se diluyó con agua destilada hasta alcanzar 100 ml y se filtró para eliminar los residuos no digeridos. Se añadió peróxido de hidrógeno como revelador para evidenciar la presencia de aluminio en soluciones estándar con diferentes concentraciones de aluminio (Jones, 1999). Cuando las muestras estuvieron listas, se procedió a analizarlas en el espectrofotómetro de absorción atómica, comparando sus valores con los estándares para determinar el porcentaje de aluminio en cada yacimiento.

Ensayo de módulo de finura

Al no existir una normativa específica para determinar el módulo de finura de agregados inferiores a 75 micras (μm), se tomó como referencia la normativa ecuatoriana NTE INEN 489, (1987) "Determinación de la finura por tamizado seco" considerando que es la convencional para cementos y materiales pulverizados, esto se realizó empleando los tamices de 150 y 75 μm . El proceso consistió en pesar una muestra representativa, someterla a los tamices mencionados, y luego calcular el porcentaje de material que pasa a través de cada tamiz. Se realizó la aplicación de un movimiento rotacional y golpes controlados para asegurar que el material fino pase por los tamices. Finalmente, se calculó el módulo de finura utilizando fórmulas específicas de la normativa:

$$F = 100 - \frac{mR * 100}{m} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

F= Finura del material expresado en porcentaje pasante del tamiza 150 o 75 µm.

mR= Masa retenida en el tamiz 150 o 75 µm expresada en g.

m= Masa total de la muestra en g.

$$F = 100 - mRc \quad \text{Ecuación 2}$$

$$mRC = \frac{mRc}{m} + C \quad \text{Ecuación 3}$$

F= Finura del material expresado en porcentaje pasante del tamiza de 75 µm.

mRC= Masa retenida corregida en el tamiz 75 µm expresada en porcentaje.

C= Factor de corrección en porcentaje es 0.2%

El procedimiento debe repetirse por duplicado para garantizar la precisión de los resultados y verificarse que la dispersión no sea mayor al 2% caso contrario deberá repetirse el proceso.

Reducción del material a tamaño de ensayo

Se adquirió una cantidad representativa de piedra pómez en estado natural de los tres yacimientos de estudio de cada una de las minas como se observa anteriormente en la Ilustración 5, el cual se almacenó en las bodegas del laboratorio de control de calidad de materiales de la Universidad Nacional de Chimborazo (UNACH) en un ambiente seco.

Para la trituración y molienda se utilizó de inicio un molino manual de marca "Corona" el cual permitió convertir la muestra polvo y piedras de 20 mm aproximados de diámetro. Para posteriormente pasar el material por un cedazo de plástico y poder tamizar el material. Como las partículas presentaban aún un tamaño considerable se acudió a la empresa "MINABRADEC" empresa dedicada al procesamiento de minerales abrasivos en general, ubicado en la ciudad de Riobamba. El proceso se llevó a cabo de manera industrial en el cual se vertió el material en la trituradora y tamizadora, posteriormente ya en el laboratorio se separó el material inferior a 50 micras y se secó a una temperatura de 80 °C para proceder con los ensayos de microscopía.

Difracción de rayos X (XRD)

El ensayo se llevó a cabo en la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), en los laboratorios de evaluación de materiales, utilizando el equipo Difractómetro Panalytical X'Pert

PRO. El objetivo del ensayo fue realizar un análisis cualitativo de la piedra pómez, con el fin de identificar las fases minerales presentes en la muestra.

Para ello, la piedra pómez fue previamente secada y triturada hasta obtener una granulometría fina, menor a $75\text{ }\mu\text{m}$ (malla N°200), garantizando una adecuada homogeneidad y precisión en la lectura de los difractogramas. La muestra fue colocada en un porta muestras y sometida a un escaneo en un rango angular de 5° a $70^\circ 2\theta$, con un paso de escaneo de 0.02° y un tiempo de conteo adecuado por paso para optimizar la resolución del análisis.

Los patrones de difracción obtenidos fueron comparados con bases de datos cristalográficas, como la International Centre for Diffraction Data (ICDD), utilizando el software HighScore Plus. Esto permitió la identificación cualitativa de las fases cristalinas presentes, tales como feldespatos, cuarzo, anfíboles, entre otras típicas de materiales volcánicos.

En la Ilustración 10, Ilustración 11e Ilustración 12 se presentan los resultados del ensayo de difracción por rayos X de la piedra pómez procedente de Cotopaxi, Imbabura y Tungurahua, obteniendo un material principalmente amorfo. Según Risdanareni et al. (2020), los materiales amorfos son esenciales en la fabricación de geopolímeros debido a su capacidad de activación alcalina, lo que explicaría su potencial para mejorar la resistencia y dureza en aplicaciones constructivas. De acuerdo con Provis & van Deventer (2014), la presencia de fases amorfas en los materiales precursores facilita la reacción geoquímica y mejora la durabilidad del material final.

El análisis por difracción de rayos X reveló que la piedra pómez utilizada presenta un contenido mayoritario de fase amorfa, lo cual es un indicador fundamental de su alta reactividad potencial en procesos de activación alcalina. Según el estado del arte en la tecnología de geopolímeros, un precursor adecuado debe poseer una estructura amorfa predominante, así como una composición rica en silicio (Si) y aluminio (Al). Esta fracción amorfa es altamente reactiva frente a soluciones alcalinas, ya que facilita la disolución de especies silicatadas y aluminatadas necesarias para la formación del gel geopolimérico tipo N-A-S-H (Davidovits, 2008; Provis & van Deventer, 2009). Además, se identificó la presencia de aortita ordenada, un mineral aluminosilicato que evidencia la existencia de Si y Al en la estructura cristalina del material, complementando la caracterización mineralógica. En las Tablas 7, 8 y 9 se presentan los porcentajes de las fases identificadas.

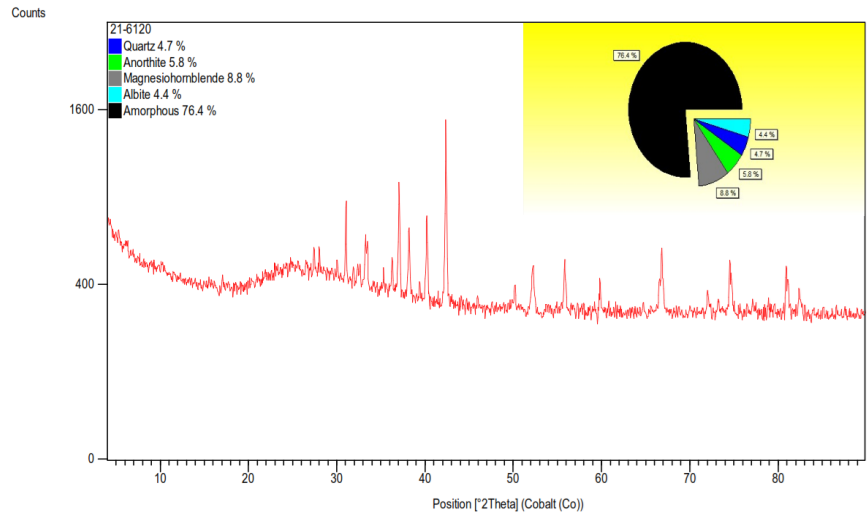


Ilustración 10. Resultados difracción de rayos X de PP de Imbabura.

Tabla 7. Resultados ensayo de difracción por rayos X de PP de Imbabura

Nombre compuesto	Fórmula química	Porcentaje
Quartz	SiO_2	4.7%
Anorthite, ordered	$Ca Al_2Si_2O_8$	5.8%
Magnesiohornblende ferroan	$Ca_2(Mg,Fe)_5(Si,Al)_8O_{22}(OH)_2$	8.8%
Albite, calcian,ordered	$(Na,Ca)Al(Si,Al)_3O_8$	4.4%
Amorphous particles	-	76.4%

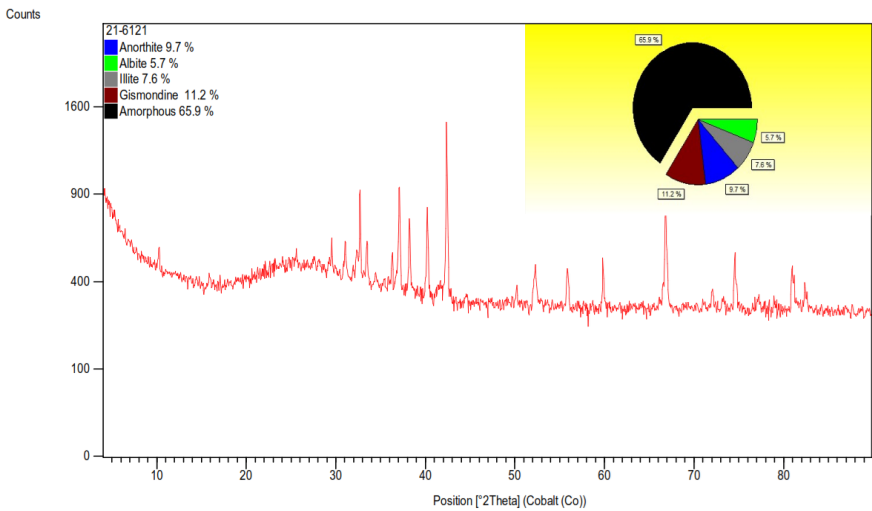


Ilustración 11. Resultados difracción de rayos X de PP de Tungurahua.

Tabla 8. Resultados ensayo de difracción por rayos X de PP de Tungurahua

Nombre compuesto	Fórmula química	Porcentaje
Anorthite, ordered	$Ca Al_2Si_2O_8$	9.7%
Albite, calcian,	$(Na,Ca)Al(Si,Al)_3O_8$	5.7%
Ordered illite		
2\ITM#1\RG	$(K,H_3O)Al_2Si_3AlO_{10}(OH)_2$	7.6%
Gismondine	$Ca Al_2Si_2O_8 \cdot 4H_2O$	11.2%
Amorphous particles	-	65.9%

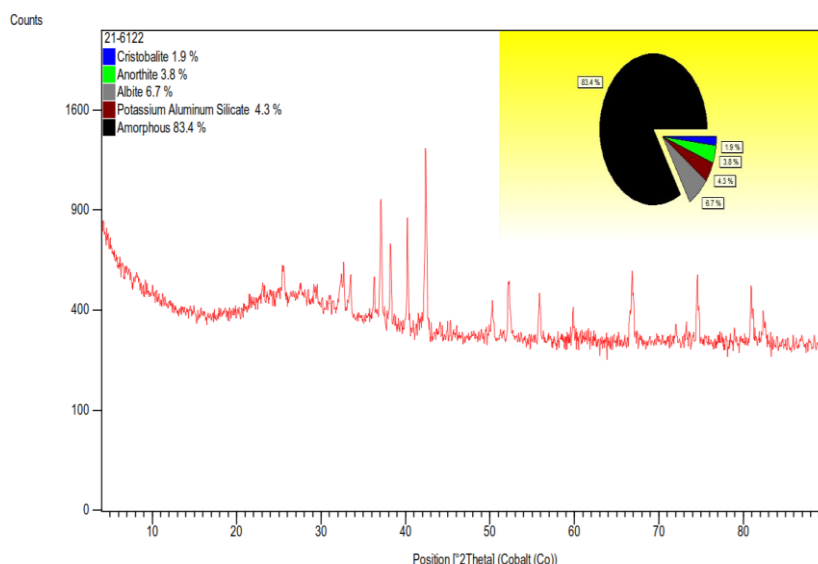


Ilustración 12. Resultados difracción de rayos x de PP de Cotopaxi.

Tabla 9. Resultados ensayo de difracción por rayos X de PP de Cotopaxi

Nombre compuesto	Fórmula química	Porcentaje
Cristobalite , syn	SiO_2	1.9%
Anorthite, ordered	$Ca Al_2Si_2O_8$	3.8%
Albite, calcian, ordered	$(Na, Ca)Al(Si, Al)_3O_8$	6.7%
Potassium Aluminum, Silicate	$K Al Si O_4$	4.3%
Amorphous particles	-	83.4%

Fluorescencia de rayos X

Como se muestra en la Tabla 10 el análisis reveló que la muestra posee una composición típica de materiales aluminosilicatados volcánicos, destacando un alto contenido de sílice (SiO_2 , 68.06 %) y alúmina (Al_2O_3 , 13.00 %), lo que la convierte en un material adecuado como precursor geopolimérico, favoreciendo la formación de geles tipo N-A-S-H, característicos de sistemas de bajo contenido de calcio (Provis & van Deventer, 2009). Además, la presencia de óxidos alcalinos como Na_2O (5.53 %) y K_2O (4.21 %) contribuye a la reactividad del sistema, facilitando la activación alcalina del precursor. Por otro lado, el contenido bajo de CaO (2.08 %) indica una limitada formación de geles tipo C-A-S-H, lo cual refuerza su clasificación como sistema de baja proporción cálcica (Duxson et al., 2007). Asimismo, se detectó compuestos como Fe_2O_3 , SO_3 y trazas de metales como Pb, Zn y Y, los cuales son comunes en materiales naturales de origen volcánico y no representan restricciones significativas para su empleo en aplicaciones cementicias sostenibles (Davidovits, 2011).

Tabla 10. Resultados de la fluorescencia de la PP de Cotopaxi.

Nombre	Elemento y/o Compuesto	Porcentaje en peso (%)
Silicio	SiO ₂	68.06 %
Aluminio	Al ₂ O ₃	13.00 %
Sodio	Na ₂ O	5.53 %
Potasio	K ₂ O	4.21 %
Azufre	SO ₃	3.41 %
Hierro	Fe ₂ O ₃	2.27 %
Calcio	CaO	2.08 %
Magnesio	MgO	0.46 %
Titanio	TiO ₂	0.35 %
Cloro	Cl	0.23 %
Bario	Ba	0.15 %
Manganeso	MnO	0.07 %
Cerio	Ce	0.05 %
Estroncio	Sr	0.04 %
Fósforo	P ₂ O ₅	0.04 %
Zirconio	Zn	0.02 %
Rubidio	Rb	0.02 %
Plomo	Pb	61 ppm*
Zinc	Zn	40 ppm*
Itrio	Y	23 ppm*
Niobio	Nb	15 ppm*

Análisis de tamaño de partículas por difracción láser

El ensayo se lo llevo a cabo en la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), en los laboratorios de evaluación de materiales utilizando el equipo Malvern Mastersizer, que incorpora un sistema de dispersión en seco o húmedo, detectores ópticos y software para interpretar los patrones de difracción.

En la Ilustración 13 se muestra el análisis de distribución de tamaño de las partículas de la PP de Imbabura. Presento un pico principal entre 80-100 μm , mostrando que la mayoría de las partículas tienen este tamaño, aunque también hubo presencia de partículas más pequeñas y una distribución relativamente ancha. Los parámetros $d(0.1)$, $d(0.5)$ y $d(0.9)$ indican que el 10%, 50% y 90% del volumen total de partículas tienen un tamaño igual o inferior a 11.238 μm , 43.965 μm y 89.230 μm , respectivamente.

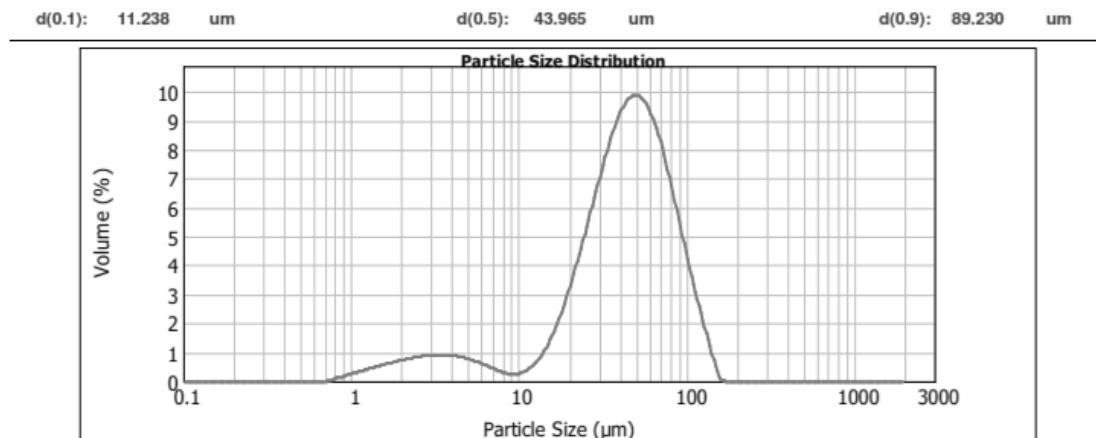


Ilustración 13. Resultados análisis de tamaño de partículas de PP de Imbabura

En la Ilustración 14 se muestra el análisis de distribución de tamaño de las partículas de la PP de Tungurahua. Gran parte de las partículas se las encontró en el rango de 80-100 μm , con un pico principal centrado en este intervalo. Sin embargo, también se observó una distribución relativamente ancha, lo que sugiere la presencia de partículas de diversos tamaños. Los parámetros $d(0.1)$, $d(0.5)$ y $d(0.9)$ indicaron que el volumen total de partículas tuvo un tamaño igual o inferior a 8.209 μm , 41.765 μm y 91.776 μm , respectivamente.

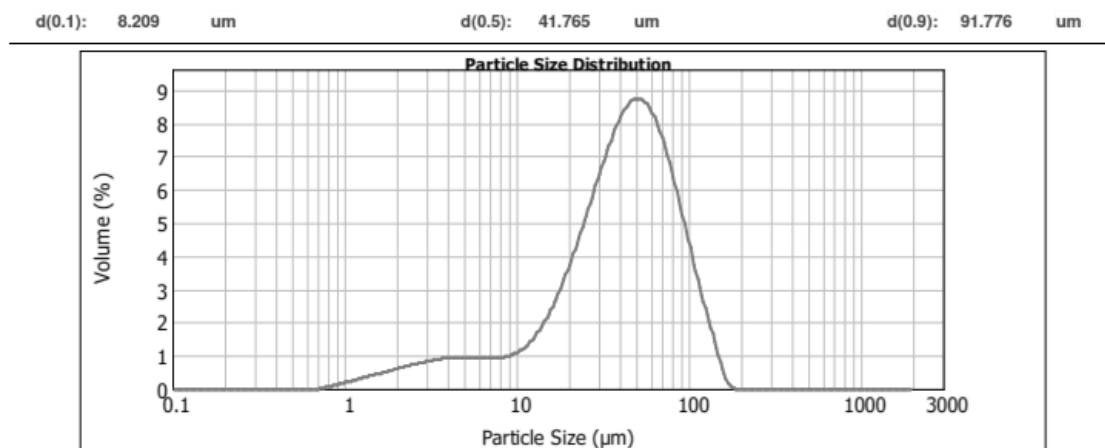


Ilustración 14. Resultados análisis de tamaño de partículas de PP de Tungurahua

La Ilustración 15 muestra el análisis del tamaño de las partículas de la muestra de PP de Cotopaxi, donde se observó que la mayoría de las partículas se concentran en el rango de 80-100 μm . Sin embargo, también se observó una distribución relativamente amplia, lo que indica la presencia de partículas de diferentes tamaños. Los parámetros $d(0.1)$, $d(0.5)$ y $d(0.9)$ indican tienen un tamaño inferior a 6.970 μm , 36.890 μm y 79.078 μm .

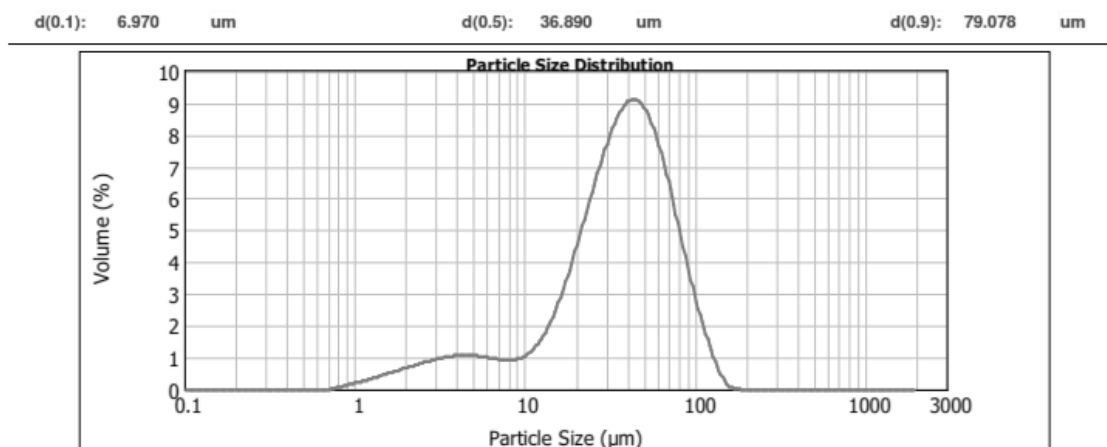


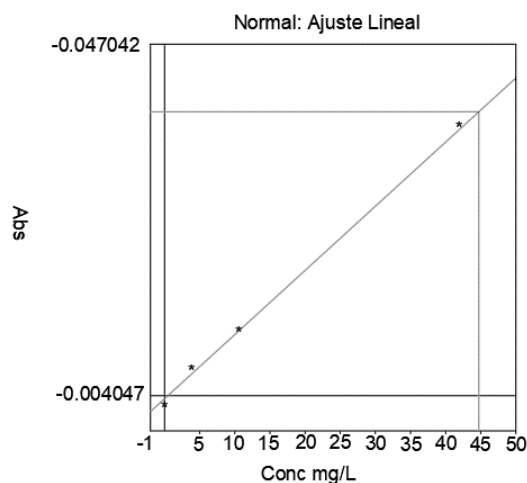
Ilustración 15. Resultados análisis de tamaño de partículas de PP de Cotopaxi

Ensayo de absorción atómica

Los análisis de difracción de rayos X (DRX) es una herramienta fundamental para la caracterización mineralógica de muestras geológicas, ya que permitió identificar la presencia de fases cristalinas específicas (Cullity & Stock, 2014). Sin embargo, esta técnica no proporcionó información cuantitativa precisa sobre la concentración de los elementos presentes, lo que limita su utilidad en estudios de composición química detallados (Klug & Alexander, 1974). Debido a esta limitación, se recurrió al ensayo de absorción atómica (AA), una técnica analítica ampliamente utilizada para la determinación cuantitativa de metales en muestras ambientales y geológicas (Welz & Sperling, 2008).

En la Ilustración 16 se puede observar la gráfica de la recta donde en el eje X representa la concentración del estándar de aluminio y en el eje Y se identifica los valores de las diferentes concentraciones analizadas. En la Tabla 11 se observa el valor de la concentración de aluminio de cada muestra.

Es relevante destacar que en la provincia de Imbabura se requirió una corrección en las lecturas debido a que los valores iniciales excedían el rango óptimo de medición (0 mg/L – 50 mg/L). En estos casos, es común aplicar una dilución con agua destilada para reducir la concentración y llevarla dentro del rango calibrado, asegurando mediciones precisas y confiables (Christian, 2018). Este procedimiento es una práctica estándar en espectrofotometría de absorción atómica para evitar errores de sobrecarga y mejorar la precisión de los resultados (Douglas A. Skoog et al., 2017).

**Ilustración 16.** Ensayo de absorción atómica del aluminio**Tabla 11.** Lecturas de muestras de ensayo de absorción atómica de aluminio

Resultados disolución aluminio			
Muestra	Conc. mg/L	Conc. mg/L Corregida	Concentración final
Imbabura L1	36.82*	73.64**	74.83
Imbabura L2	39.51*	79.03**	
Imbabura L3	35.91*	71.82**	
Tungurahua L1	35.13	35.13	34.28
Tungurahua L2	34.03	34.03	
Tungurahua L3	33.69	33.69	
Cotopaxi L1	28.86	28.86	30.15
Cotopaxi L2	30.66	30.66	
Cotopaxi L3	30.92	30.92	

*Valores obtenidos al reducir la concentración de la muestra.

** Valores de la concentración corregida de la muestra.

Conociendo el valor de la concentración se procedió a calcular el porcentaje de aluminio obteniendo los siguientes resultados. La Ecuación 4 fue utilizada para realizar el cálculo del porcentaje y se agrega adicionalmente un cálculo tipo del porcentaje de aluminio de la muestra de la provincia de Cotopaxi.

$$\%Aluminio = \frac{\text{Concentración corregida} * \text{volumen}}{\frac{\text{Peso de la muestra}}{10000}} \quad \text{Ecuación 4}$$

$$\%Aluminio = \frac{\frac{30.1518 * 100}{0.5}}{10000}$$

Como se puede observar en la Tabla 12 el análisis de absorción atómica reveló diferencias significativas en el contenido de aluminio entre las muestras de piedra pómez estudiadas. La muestra de Imbabura presentó la mayor concentración de aluminio (1.49%), superando considerablemente a las muestras de Cotopaxi (0.60%) y Tungurahua (0.68%), cuyas

concentraciones fueron notablemente menores y similares entre sí. Esta variación en la composición química muestra que la PP de Imbabura podría tener propiedades distintas a las de las otras dos muestras, posiblemente afectando su resistencia, dureza o reactividad.

Tabla 12. Resultados de porcentaje de aluminio

Porcentaje de aluminio	
Muestra	% Aluminio
Imbabura	1.49
Tungurahua	0.68
Cotopaxi	0.60

Si bien los resultados obtenidos reflejan la concentración de aluminio en las muestras analizadas, es importante destacar que no representan la totalidad del aluminio presente en la piedra pómez. Esto se debe a que una fracción significativa del aluminio puede encontrarse en fases amorfas, las cuales no son completamente detectadas mediante los métodos convencionales (Deer et al., 2013). Las estructuras amorfas, al carecer de una disposición cristalina definida, pueden resistir la disolución en ácidos minerales, lo que conlleva a una subestimación del contenido total de aluminio en el análisis (Iler, 1979).

Estudios previos han demostrado que la cuantificación precisa del aluminio en materiales silíceos requiere técnicas complementarias, como la espectroscopia de rayos X o la difracción de rayos X, que permiten diferenciar entre fases cristalinas y amorfas (Morris et al., 2000). Además, la influencia de los tratamientos térmicos en la transformación de fases amorfas a cristalinas puede modificar la reactividad del material y alterar la precisión de la medición del aluminio (Fernández et al., 2016).

Ensayo de módulo de finura NTE INEN 0489

A continuación, se presentan los datos correspondientes a cada yacimiento, indicando la masa retenida en los tamices de 75 μm y 150 μm , respectivamente (Ver Anexo 1). Cabe señalar que se aplicó la Ecuación 1 para el procesamiento de los datos. En la Tabla 13 se muestran los resultados obtenidos, a partir de los cuales se realizó una comparación entre el módulo de finura de cada yacimiento y el módulo de finura del cemento Portland tradicional, expresando ambos valores en porcentaje. Esta comparación tiene como objetivo interpretar y analizar las características granulométricas de los materiales evaluados.

Tabla 13. Resultados del ensayo del módulo de finura.

Yacimiento	Tamices μm	Ensayo 1 (%)	Ensayo 2 (%)	Media de cada ensayo (%)
Imbabura	75	80.38	79.68	80.03
	150	93.16	92.28	92.72
Cotopaxi	75	76.04	77.12	76.58
	150	96.96	97.72	97.34
Tungurahua	75	80.02	79.86	79.94
	150	93.62	93.60	93.61
Cemento Tradicional	75	95.22	95.10	95.16
	150	96.92	96.68	96.80

Los resultados muestran el porcentaje de material que pasó a través de tamices de 75 μm y 150 μm para muestras de yacimientos de Imbabura, Cotopaxi, Tungurahua y cemento para su comparación. Se observó que el cemento presentó el mayor porcentaje de paso en ambos tamices, superando el 95%, lo que indicó una granulometría más fina y uniforme. Los yacimientos de Cotopaxi mostraron el menor porcentaje de paso en el tamiz de 75 μm (76.58%), indicando la presencia de partículas gruesas. En el tamiz de 150 μm , todos los yacimientos superaron el 92% de paso, lo que indicó una distribución de tamaño de partícula más homogénea en este rango. Las diferencias entre los ensayos 1 y 2 fueron mínimas, lo que indica una buena precisión en las mediciones. Estos resultados coinciden con estudios previos que analizaron la granulometría de materiales cementantes y yacimientos volcánicos (Mehta & Monteiro, 2014 ; Snellings et al., 2012). La granulometría fue un factor importante que influyó en las propiedades de los materiales cementantes, como la reactividad, la resistencia y la trabajabilidad (Lothenbach et al., 2007).

2.4. Geopolimerización

Para realizar el proceso de geopolimerización de la PP de los yacimientos estudiados se utilizará los siguientes materiales y metodología:

2.4.1. Materiales

Piedra Pómez (PP)

Tras la caracterización del material en la sección anterior, se confirmó su idoneidad para la fabricación de un geopolímero debido a su naturaleza amorfa y la presencia de aluminosilicatos en su estructura (Davidovits, 1991). La PP ha demostrado ser efectiva en la síntesis de geopolímeros con buenas propiedades mecánicas y durabilidad (Aragón et al., 2020). Su estructura porosa y su alta reactividad la convierten en un precursor adecuado para la activación alcalina y formar una matriz geopolimérica densa y resistente.

En consecuencia, se utilizó la piedra pómez (PP) molida y secada al horno, proveniente de diversos yacimientos ecuatorianos, como precursor en la activación alcalina.

Hidróxido de sodio (NaOH)

En Ecuador, el hidróxido de sodio es un compuesto químico clasificado que requiere supervisión y control por parte de las autoridades competentes (Ministerio de Gobierno del Ecuador., 2023). Debido a su naturaleza corrosiva y los riesgos asociados a su manipulación, se implementan regulaciones específicas para su adquisición, almacenamiento y uso. En este sentido, se realizaron los procedimientos necesarios para la compra de esta sustancia a través del Ministerio de Gobierno del Ecuador, cumpliendo con los requisitos y normativas establecida.

El hidróxido de sodio tendrá una presentación comercial de bolsas de 25 kg. En la Tabla 14 se muestra las especificaciones técnicas del producto.

Tabla 14. Especificaciones técnicas del Hidróxido de Sodio.

Parámetros	Unidades	Resultados	Especificaciones	
			Mínimo	Máximo
Hidróxido de sodio (como NaOH)	% w/w	99.77	99.00	-
Carbonato de sodio (como Na ₂ CO ₃)	% w/w	0.21	-	0.4
Cloruro (como Cl)	% w/w	0.008	-	0.03
Sulfatos (como SO ₄)	% w/w	0.007	-	0.03
Silicatos (como SiO ₂)	% w/w	0.005	-	0.02
Hierro (como Fe)	ppm	4.2	-	20
Cobre (como Cu)	ppm	0.5	-	2
Níquel (como Ni)	ppm	1.3	-	2
Manganeso (Como Mn)	ppm	0.5	-	1
Cloratos y percloratos (NaClO ₃)	ppm	0.5	-	10
Material insoluble en agua	% w/w	0.005	-	0.05

Adaptado de Certificado de calidad de "Productos Químicos" Ing. Fausto Gavilanes

Silicato de sodio (Na₂SiO₃)

Fue obtenido de la empresa "ProduQuimic del Valle", situada en Quito, Ecuador. Este compuesto químico, fundamental para la activación alcalina de precursores en la producción de geopolímeros Shi et al., (2011), se obtuvo en forma líquida y se conservó de acuerdo con las instrucciones del proveedor (ProduQuimic del Valle, 2023). Para evitar que se condensara y mantener su estabilidad, se mantuvo en un sitio fresco, ventilado y oscuro (ASTM C1115-00, 2019). La Tabla 15 especifica las características técnicas del producto.

Tabla 15. Especificaciones técnicas silicato de sodio.

Propiedades	Silicato de sodio 3.2
Producto	Líquido Neutro
Densidad, °Bé	41-43
Relación en peso, Na ₂ O/SiO ₂	2.9-3.2
%SiO ₂	27.5-29.5
%Na ₂ O	9.2-11

°Bé: Grados Baumé se refiere a una disolución acuosa de cloruro de sodio (NaCl) al 10% en masa y agua destilada.

Adaptado de Certificado de calidad de (ProduQuimic, 2023)

Agua destilada (AD)

Se utilizó agua destilada de la marca "Baterías Ecuador" para disolver el hidróxido de sodio (NaOH) y alcanzar la concentración molar requerida (ASTM C114, 2019). Este procedimiento aseguró la eliminación de posibles impurezas que pudieran modificar la solución, garantizando la precisión y confiabilidad de los resultados experimentales (Brown & Skoog, 2005).

Áridos (AR)

En Ecuador, los áridos utilizados en la industria de la construcción presentan una composición variable según su origen geológico y región. En la Sierra predominan los áridos de naturaleza sílicea y volcánica, procedentes de rocas ígneas como andesitas, basaltos y riolitas, con alto contenido de sílice y buena resistencia mecánica (Moreno et al., 2015). En la región Costa se identifican áridos tanto síliceos (de origen aluvial) como calcáreos, asociados a formaciones sedimentarias, especialmente en provincias como Manabí y Guayas (Bravo & Paredes, 2018). En la Amazonía, los áridos son principalmente síliceos, compuestos por cuarzo y rocas granitoides erosionadas por la red fluvial (INEC, 2021). Esta diversidad mineralógica influye directamente en el desempeño de los áridos en mezclas de concreto y geopolímeros, afectando propiedades clave como durabilidad, reactividad álcali-sílice y compatibilidad con ligantes alcalinos. Para la presente investigación se ha decidido trabajar con áridos de la sierra ecuatoriana.

Los materiales granulares, como la arena, la grava y la piedra triturada, son componentes esenciales en la fabricación del hormigón, constituyendo entre el 60% y el 75% de su volumen total (Neville, 2011). Para esta investigación, los áridos se obtuvieron de minas ubicadas en la provincia de Chimborazo, específicamente de las empresas "Hormigones Moreno" y "COVIPAL". Se realizaron ensayos para determinar su granulometría, densidad y absorción.

2.4.2. Metodología.

En Ecuador, los áridos utilizados en la industria de la construcción presentan una composición variable según su origen geológico y región. En la Sierra predominan los áridos de naturaleza sílicea y volcánica, procedentes de rocas ígneas como andesitas, basaltos y riolitas, con alto contenido de sílice y buena resistencia mecánica (Moreno et al., 2015). En la región Costa se identifican áridos tanto síliceos (de origen aluvial) como calcáreos, asociados a formaciones sedimentarias, especialmente en provincias como Manabí y Guayas (Bravo & Paredes, 2018). En la Amazonía, los áridos son principalmente síliceos, compuestos por cuarzo y rocas granitoides erosionadas por la red fluvial (INEC, 2021). Esta diversidad mineralógica influye directamente en el desempeño de los áridos en mezclas de concreto y geopolímeros, afectando propiedades clave como durabilidad, reactividad álcali-sílice y compatibilidad con ligantes alcalinos.

Los materiales granulares, como la arena, la grava y la piedra triturada, son componentes esenciales en la fabricación del hormigón, constituyendo entre el 60% y el 75% de su volumen total (Neville, 2011). Para esta investigación, los áridos se obtuvieron de minas ubicadas en la provincia de Chimborazo, específicamente de las empresas "Hormigones Moreno" y "COVIPAL". Se realizaron ensayos para determinar su granulometría, densidad y absorción.

Dosificación del geopolímero de piedra pómez (GPP)

El cálculo de la dosificación utilizada se realizó de forma iterativa, ajustando la relación de los componentes y las tolerancias de ensayo siguiendo lo expuesto por (Allahverdi & Škvára, 2001; Davidovits, 1991; Fernández-Jiménez et al., 2007).

Cálculo del activador

El sistema activador alcalino empleado estuvo formado por dos compuestos químicos: silicato de sodio (Na_2SiO_3) e hidróxido de sodio (NaOH), comúnmente utilizados en la activación de precursores aluminosilicatados debido a su capacidad para disolver la fase amorfa y promover la polimerización del gel geopolimérico. El encontrar la relación adecuada entre los compuestos activadores es un parámetro clave en la síntesis de materiales geopoliméricos, ya que influye directamente en la reactividad del sistema, la trabajabilidad de la mezcla y las propiedades mecánicas del producto endurecido. Aplicando la Ecuación 5 y basados estudios que han determinado que una relación agua sobre material cementante (activador/mc) en el rango de 0.4 a 0.7 en peso proporciona un equilibrio adecuado entre fluidez y resistencia mecánica, favoreciendo la disolución de la fase amorfa del precursor y optimizando la formación del gel N-A-S-H (Fernández-Jiménez & Palomo, 2003; Provis & Van Deventer, 2009). Este valor será ajustado en el laboratorio.

$$\text{Peso del activador} = \text{Peso del precursor} * \text{relación} \left(\frac{\text{activador}}{\text{mc}} \right) \quad \text{Ecuación 5}$$

Cálculo de la solución de NaOH

A partir del peso molecular del hidróxido de sodio (NaOH), equivalente a 39,99 g/mol, aplicando la Ecuación 6 y Ecuación 7 se calculó la cantidad requerida de este compuesto para preparar las soluciones activadoras a diferentes concentraciones molares utilizadas en esta investigación en 1 litro de volumen de disolución. La dosificación se ajustó considerando los criterios de manejabilidad y trabajabilidad observados durante la elaboración de las pastas geopoliméricas en el laboratorio. La caracterización de estas propiedades reológicas fue esencial, ya que influyen directamente en el comportamiento en estado fresco de las mezclas y en su posterior desempeño mecánico. Se evidenció que la concentración de NaOH afectó significativamente aumentando la viscosidad de la solución alcalina, modificando así la fluidez

de la pasta, la cinética de reacción de geopolimerización y la formación de la microestructura del gel resultante (Fernández-Jiménez et al., 2005; Temuujin, J., 2009).

$$M = \frac{n}{v} \quad \text{Ecuación 6}$$

M = Molaridad

n = numero de moles de soluto

v = volumen de disolución

$$n = M * v \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

m = masa del soluto en gramos

PM = peso molecular del soluto

Cálculo de cantidades de solución de Na_2SiO_3 y NaOH .

La relación en masa entre silicato de sodio (Na_2SiO_3) e hidróxido de sodio (NaOH) en soluciones activadoras alcalinas es un parámetro fundamental en la síntesis de geopolímeros, ya que determina la cantidad de sílice soluble disponible para la reacción de geopolimerización (Allahverdi & Škvára, 2001; J Davidovits, 1991). Diversos estudios han establecido que la proporción óptima en gramos de $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ se encuentra generalmente en el rango de 1.0 a 2.5, aunque este intervalo puede variar según la naturaleza del precursor (como ceniza volante, metacaolín o piedra pómez), la concentración molar de NaOH y las condiciones de curado (temperatura y tiempo). Una relación baja (<1.0) limita el suministro de especies silíceas, lo que puede conducir a una estructura de gel pobremente polimerizada y, en consecuencia, a menores resistencias mecánicas. En contraste, una relación excesivamente alta (>2.5) incrementa la viscosidad de la mezcla fresca, dificultando su trabajabilidad y reduciendo la eficiencia del proceso de activación debido a la dilución de las especies alcalinas. Varios trabajos, como los de Fernández-Jiménez et al., (2005); Provis & Van Deventer, (2009), señalan que una relación $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ cercana a 2.0 proporciona un equilibrio favorable entre reactividad, trabajabilidad y desarrollo de propiedades mecánicas en sistemas geopoliméricos activados con soluciones de sodio. Por tal razón se estable la Ecuación 8 para el cálculo de cantidades requerida.

$$\frac{\text{Na}_2\text{SiO}_3}{\text{NaOH}} = 2,5 \quad \text{Ecuación 8}$$

$$\text{Peso del activador} = Na_2SiO_3 + Na OH$$

Ecuación 9

Para el cálculo de las cantidades de material se realizó a partir del volumen total del geopolímero a emplearse para cada dosificación. Se tomo en cuenta 6 cubos de 50 mm de aristas y 6 vigas de 40x40x160 mm por cada muestra que están especificados en la NTE INEN 488 (2009) y NTE INEN 198 (1987).

Dosificación del hormigón con geopolímero (HGP)

Densidad óptima de los agregados.

Con el fin de optimizar la dosificación de áridos en mezclas donde el geopolímero (GPP) actúa como conglomerante, se llevó a cabo un procedimiento experimental para determinar la densidad aparente máxima de la mezcla seca de agregados, como indicador de la eficiencia del empaquetamiento de partículas. Esta etapa es clave para lograr una mezcla con adecuada compacidad, trabajabilidad y desempeño mecánico en estado endurecido.

Se elaboraron mezclas secas de agregados con distintas proporciones de fino y grueso, comenzando con una base de 100 % agregado grueso e incorporando el agregado fino en incrementos del 10 %, desplazando proporcionalmente el grueso. Para cada combinación, se midió la densidad aparente según el método de compactación establecido en la norma ASTM C29/C29M. La mezcla con la mayor densidad aparente se consideró como el punto de empaquetamiento óptimo preliminar. Posteriormente, se realizaron ajustes más precisos reduciendo el contenido de fino en un 4 %, para determinar la proporción que ofreciera la densidad óptima final de la mezcla seca (López, 2014; Almeida, 2019).

La búsqueda de la máxima densidad aparente permite optimizar la distribución granulométrica, lo que mejora el contacto entre partículas, reduce vacíos y minimiza el contenido de pasta necesario, favoreciendo la compacidad y resistencia del material geopolimérico (Neville, 2011; López, 2014; Almeida, 2019).

Dosificación porcentual en peso de HGP.

Con los porcentajes de agregado con el cual se determinó la densidad óptima se procedió a realizar el cálculo de masa a incorporar en la mezcla, realizando iteraciones de 10% a 100% respecto a 1 kg de geopolímero, para posteriormente evaluar su resistencia a la compresión.

Resultados

Dosificación del PP

A partir de la Ecuación 10 se calculó la cantidad de solución activadora necesaria para 1 kg de material precursor, en este caso, piedra pómez. Posteriormente, en el laboratorio se

prepararon pastas geopoliméricas considerando las recomendaciones de estudios previos, los cuales sugieren utilizar una relación agua/material cementante (a/mc) en el rango de 0.4 a 0.7, con el objetivo de optimizar la trabajabilidad de la mezcla en estado fresco y el desarrollo de propiedades mecánicas en estado endurecido. Mediante ensayos experimentales, esta relación fue ajustada progresivamente hasta alcanzar un valor de 0.65, el cual se identificó como el más adecuado para el sistema investigado. Este valor permitió lograr un equilibrio entre la fluidez necesaria para facilitar el moldeo y la compactación, y la resistencia mecánica requerida en el material endurecido. Cabe destacar que una relación a/mc excesivamente alta puede inducir una mayor cantidad de líquido y, en consecuencia, una disminución en la resistencia, mientras que una relación demasiado baja puede dificultar la homogenización de la mezcla y limitar la extensión de la reacción de geopolimerización (Mendes et al., 2022; Temuujin, J., 2009).

$$\text{Peso del activador} = \text{Peso del precursor} * \text{relación} \left(\frac{\text{activador}}{mc} \right) \quad \text{Ecuación 10}$$

Act/material cementante

$$\text{Peso del activador} = 1kg * 0.65$$

$$\text{Peso del activador} = 0.65 \text{ kg}$$

Posteriormente aplicando la Ecuación 6 y Ecuación 7 se calcula la cantidad de hidróxido de sodio requerido en las distintas concentraciones molares utilizadas dentro de la investigación. A continuación, se detalla el cálculo tipo para 8 mol, y en la Tabla 16 se muestra los valores obtenidos ante las demás concentraciones.

$$n = M * v \quad \text{Ecuación 6}$$

$$n = \left(\frac{8 \text{ mol}}{\text{litro}} \right) * (1 \text{ litro})$$

$$n = 8 \text{ mol}$$

$$m = PM * n \quad \text{Ecuación 7}$$

$$m = \frac{39.99 \text{ g}}{\text{mol}} * 8 \text{ mol}$$

$$m = 320 \text{ g}$$

Tabla 16. Concentración molar de hidróxido de sodio en 1000 ml de solución.

Concentración molar (mol/L)	Peso NaOH (g)
8	320
12	480
16	640
20	800

Siguiendo las recomendaciones de estudios previos como los de (Allahverdi & Škvára, 2001; Davidovits, 1991), en el laboratorio se prepararon pastas geopoliméricas utilizando relaciones en masa entre silicato de sodio (Na_2SiO_3) e hidróxido de sodio (NaOH) en el rango de 2.0 a 2.5, con el objetivo de optimizar las propiedades en estado fresco y endurecido del material. Estos valores fueron ajustados experimentalmente en función del comportamiento observado en términos de trabajabilidad, viscosidad y homogeneidad de la mezcla. Coincidiendo con autores que han señalado que una proporción cercana a 2.0 ofrece un equilibrio adecuado entre reactividad, trabajabilidad y resistencia, especialmente en sistemas basados en ceniza volante, metacaolín o materiales de origen volcánico como la piedra pómez. Utilizando las Ecuación 11 y Ecuación 12, con la relación establecida mostrada a continuación el cálculo tipo para 1kg de material precursor con una relación de 2.5:

$$\text{Peso de NaOH} = \frac{\text{Peso del activador}}{\left(1 + \frac{\text{Na}_2\text{SiO}_3}{\text{NaOH}}\right)} \quad \text{Ecuación 11}$$

$$\text{Peso de solución NaOH} = \frac{0,65 \text{ kg}}{(1 + 2.5)}$$

$$\text{Peso de solución NaOH} = 0.19 \text{ kg}$$

$$\text{Peso de NaOH} = \frac{\text{Peso del activador}}{\left(1 + \frac{\text{Na}_2\text{SiO}_3}{\text{NaOH}}\right)} \quad \text{Ecuación 12}$$

$$\text{Peso de Na}_2\text{SiO}_3 = \text{Peso de NaOH} * \frac{\text{Na}_2\text{SiO}_3}{\text{NaOH}} \quad \text{Ec5}$$

$$\text{Peso de solución Na}_2\text{SiO}_3 = 0.19 \text{ kg} * 2.5$$

$$\text{Peso de solución Na}_2\text{SiO}_3 = 0,46 \text{ kg}$$

Con lo expuesto anteriormente, la dosificación para 1kg de piedra pómez como fuente de aluminosilicatos se muestra en la Tabla 17.

Tabla 17. Cantidad de material requerido en peso para 1kg de precursor.

Piedra Pómez (kg)	Relación $\text{Na}_2\text{SiO}_3 / \text{NaOH}$	NaOH (kg)	Na_2SiO_3 (kg)
1	2.5	0,19	0,46
1	2.0	0,21	0,44

Densidad óptima de los áridos

En la Tabla 18, se presentan los valores obtenidos durante la determinación de la densidad óptima de la mezcla de áridos, a partir de los cuales se definió el porcentaje ideal de agregados utilizado en la elaboración del HGP, con un volumen de la probeta de $0,01417 \text{ m}^3$.

Tabla 18. Densidad aparente máxima de los agregados

MEZCLA (%)		MEZCLA (g)		A. fino a añadir (g)	Masa Rec + mezcla (g)	Masa Mezcla (g)	Densidad Aparente (g/cm ³)
A. Grueso	A. Fino	A. Grueso	A. Fino				
100	0	30000.00	0	0.00	31230	23130	1,632
90	10	30000.00	3333.33	3333.33	32250	24150	1,704
80	20	30000.00	7500.00	4166.67	32980	24880	1,755
70	30	30000.00	12857.14	5357.14	33440	25340	1,788
60	40	30000.00	20000.00	7142.86	33860	25760	1,817
50	50	30000.00	30000.00	10000.00	33600	25500	1,799

Al valor porcentual de agregado fino correspondiente a la máxima densidad aparente, se le aplicó una reducción del 4 % para obtener la proporción óptima de agregados, según lo recomendado por López (2014) y Almeida (2019). En este caso, dicha corrección resultó en una mezcla compuesta por 36 % de árido fino y 64 % de árido grueso, proporción que se empleó en la elaboración del hormigón geopolimérico.

Preparación y evaluación a la compresión de pastas elaboradas con el GPP

Se elaboraron varios cubos similares a la Ilustración 17 por cada yacimiento variando la concentración molar de la solución de hidróxido de sodio.

**Ilustración 17.** Cantidad de material requerido en peso para 1kg de precursor de pasta de geopolímero.

Cada probeta se evaluó mediante el esfuerzo a compresión que resistió luego de un curado durante 24 horas a una temperatura de curado indicada en la Tabla 19. (Ver Anexo 2)

Tabla 19. Resultados de resistencia a la compresión de geopolímero

Fecha de elaboración	Muestra	Relación SS/SF	NaOH (mol/L)	Temp de curado (°C)	f'c (MPa)
30/11/2021	Cotopaxi	2.5	8	60	9.03
30/11/2021	Imbabura	2.5	8	60	8.14
30/11/2021	Tungurahua	2.5	8	60	9.15
22/11/2021	Cotopaxi	2	12	60	13.82
22/11/2021	Imbabura	2	12	60	11.94
22/11/2021	Tungurahua	2	12	60	15.34
17/10/2021	Cotopaxi	2	12	80	11.98
17/10/2021	Tungurahua	2	12	80	18.31
30/11/2021	Cotopaxi	2.5	16	60	19.17
30/11/2021	Imbabura	2.5	16	60	15.25
30/11/2021	Tungurahua	2.5	16	60	18.01
6/12/2021	Cotopaxi	2.5	16	80	33.49
6/12/2021	Cotopaxi	2.5	16	80	28.26
16/12/2021	Cotopaxi	2.5	16	80	16.78
6/12/2021	Imbabura	2.5	16	80	28.13
16/12/2021	Imbabura	2.5	16	80	15.46
6/12/2021	Tungurahua	2.5	16	80	19.45
6/12/2021	Tungurahua	2.5	16	80	27.88
6/12/2021	Tungurahua	2.5	16	80	26.28
16/12/2021	Tungurahua	2.5	16	80	17.25
8/12/2021	Cotopaxi	2.5	20	80	33.3
8/12/2021	Cotopaxi	2.5	20	80	37.53
8/12/2021	Imbabura	2.5	20	80	22.66
8/12/2021	Imbabura	2.5	20	80	32.72
16/12/2021	Imbabura	2.5	20	80	41.71
16/12/2021	Imbabura	2.5	20	80	31.23
8/12/2021	Tungurahua	2.5	20	80	32.46
8/12/2021	Tungurahua	2.5	20	80	32.23
16/12/2021	Tungurahua	2.5	20	80	36.96

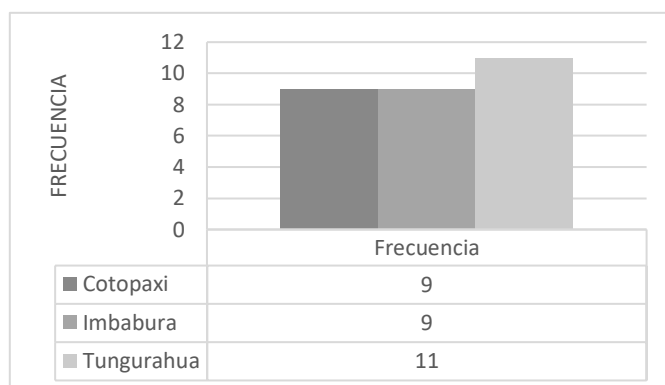
Las probetas fueron evaluadas a los 28 días de edad, tras haber sido sometidas a un proceso de curado térmico en horno. Por limitaciones de espacio en el laboratorio, el curado se realizó en distintos hornos. Los resultados obtenidos del ensayo de resistencia a compresión de los cubos de geopolímero posteriormente fueron analizados mediante el software IBM SPSS Statistics. El análisis descriptivo se centrará en evaluar la de resistencia a la compresión. A partir de este análisis, se determinará la dosificación óptima para el diseño de un hormigón geopolimérico.

Análisis descriptivo de resistencia a la compresión en cubos de GPP

En la Tabla 20 e Ilustración 18 se puede observar las frecuencias de las probetas, en la cual se muestra la distribución de 29 muestras en tres categorías según el GPP de cada yacimiento. Cotopaxi e Imbabura representan el 31% cada uno (9 muestras respectivamente), mientras que Tungurahua tiene una representación ligeramente mayor, con el 38% (11 muestras).

Tabla 20. Muestra de cubos de pasta geopolimérico

	Frecuencia	Porcentaje	Porcentaje válido	Porcentaje acumulado
Cotopaxi	9	31	31.0	31.0
Imbabura	9	31	31.0	62.1
Tungurahua	11	38	37.9	100.0
Total	29	100	99.9	

**Ilustración 18.** Diagrama de barras del análisis de frecuencia simple.

Los resultados presentados en la Tabla 21 muestran variabilidad en la resistencia a la compresión de los cubos de geopolímero. La media, con un valor de 22.89 MPa, es ligeramente superior a la mediana de 19.45 MPa, lo que indica una distribución equilibrada sin un sesgo significativo en los datos. La variabilidad en la resistencia a la compresión coincide con estudios previos que destacan la respuesta de los geopolímeros a las variaciones en la composición del material precursor y las condiciones de activación (Provis & Van Deventer, 2009). Se ha documentado el impacto del origen de la materia prima en las características mecánicas de los geopolímeros, subrayando la importancia de una descripción detallada de los materiales de origen para mejorar las propiedades del producto final (Duxson, Fernández-Jiménez, Provis, Lukey, Palomo, & Van Deventer, 2007).

Tabla 21. Análisis descriptivo de datos en función de la resistencia.

Resistencia (MPa)	
N	29
Media	22.8938
Error estándar de la media	1.80816
Mediana	19.4500
Desviación	9.73724
Varianza	94.814
Rango	33.57
Mínimo	8.14
Máximo	41.71

En la Ilustración 19 se muestra la distribución de la resistencia a la compresión de las probetas. Cotopaxi e Imbabura presentan valores entre 10 MPa y 40 MPa, con mayor frecuencia en torno a 30 MPa en Imbabura, mientras que Tungurahua tiene menor dispersión, concentrándose su pico de frecuencia en 20 MPa. Estos hallazgos concuerdan con estudios que destacan la influencia de la composición mineralógica y la activación alcalina en las

propiedades mecánicas de los geopolímeros (Provis & Van Deventer, 2009). La presencia de fases minerales específicas, como la anortita, puede afectar significativamente la resistencia a la compresión, como lo han demostrado investigaciones previas sobre materiales geopoliméricos (Davidovits, 1991).

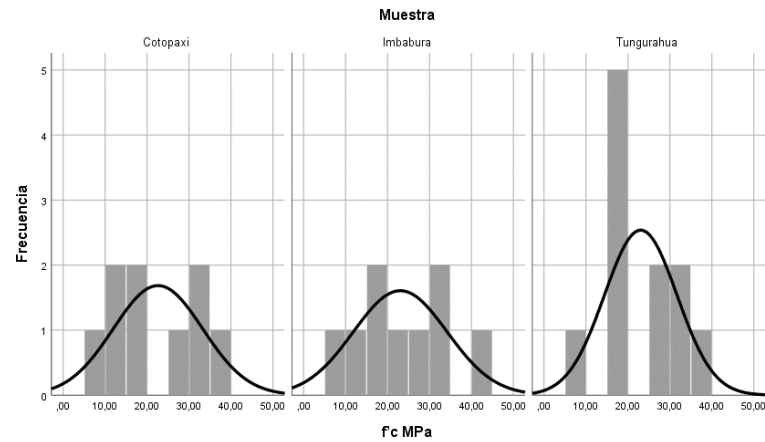


Ilustración 19. Distribución de la resistencia a la compresión de las probetas

Tras analizada la frecuencia en el gráfico de distribución normal, se procede a evaluar la resistencia a la compresión de cada yacimiento. En la Ilustración 20 se indica que los geopolímeros provenientes de Tungurahua e Imbabura exhiben las mayores resistencias a la compresión, con valores promedio de 23.091 MPa y 23.067 MPa, respectivamente. Estas cifras sugieren que la composición y estructura de la piedra pómez de estos yacimientos favorecen la formación de geopolímeros con propiedades mecánicas superiores. Aunque el geopolímero de Cotopaxi muestra una resistencia ligeramente inferior (22.60 MPa), la diferencia en comparación con los otros yacimientos es relativamente pequeña, lo que indica que la piedra pómez de Cotopaxi también posee un potencial considerable para la producción de geopolímeros.

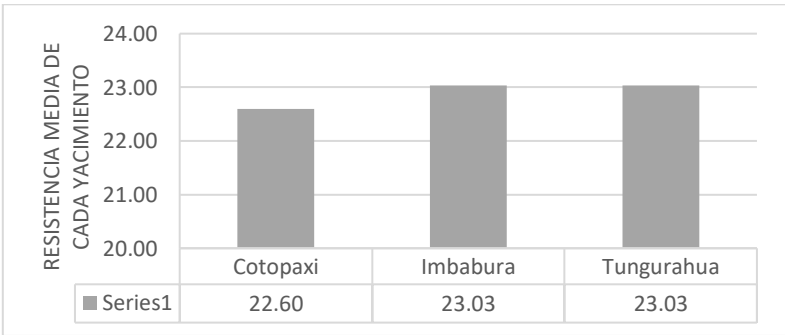


Ilustración 20. Diagrama de barras de la resistencia media de cada yacimiento.

A continuación, en las Tabla 22, Tabla 23 y Tabla 24 se muestra el análisis descriptivo en la resistencia a la compresión de cada uno de los yacimientos:

Tabla 22. Análisis descriptivo de datos de Cotopaxi.

Muestra	Estadístico	Error estándar
Media	22.59	3.55
95% de intervalo de confianza para la media	14.40	
Media recortada al 5%	22.51	
Mediana	19.17	
Varianza	11.4	
Desviación estándar	10.65	
Mínimo	9.03	
Máximo	37.53	
Rango	28.50	
Asimetría	0.19	0.71

Tabla 23. Análisis descriptivo de datos de Imbabura.

Muestra	Estadístico	Error estándar
Media	23.02	3.72
95% de intervalo de confianza para la media	14.43	
Media recortada al 5%	22.81	
Mediana	22.66	
Varianza	124.84	
Desviación estándar	11.17	
Mínimo	8.14	
Máximo	41.71	
Rango	33.57	
Asimetría	0.294	0.71

Tabla 24. Análisis descriptivo de datos de Tungurahua.

Muestra	Estadístico	Error estándar
Media	23.02	2.60
95% de intervalo de confianza para la media	17.22	
Media recortada al 5%	23.02	
Mediana	19.45	
Varianza	74.71	
Desviación estándar	8.4	
Mínimo	9.15	
Máximo	36.96	
Rango	27.81	
Asimetría	0.165	0.66

Los resultados revelan que las tres muestras poseen valores medios de resistencia a la compresión similares, con poca variabilidad entre ellas. La muestra de Imbabura destaca por su mayor dispersión de datos, reflejada en una varianza y desviación estándar elevadas, así como en un rango amplio. Esta variabilidad podría atribuirse a heterogeneidades en la composición del material o a fluctuaciones en las condiciones de ensayo.

La asimetría positiva observada en las tres muestras sugiere una distribución de datos sesgada hacia valores más bajos. Este fenómeno es común en ensayos de resistencia a la compresión, donde la presencia de defectos o discontinuidades en el material puede resultar en valores atípicos bajos (Neville, 2011). Con estos datos se procede a realizar el diagrama de cajas y bigotes mostrados en la Ilustración 21.

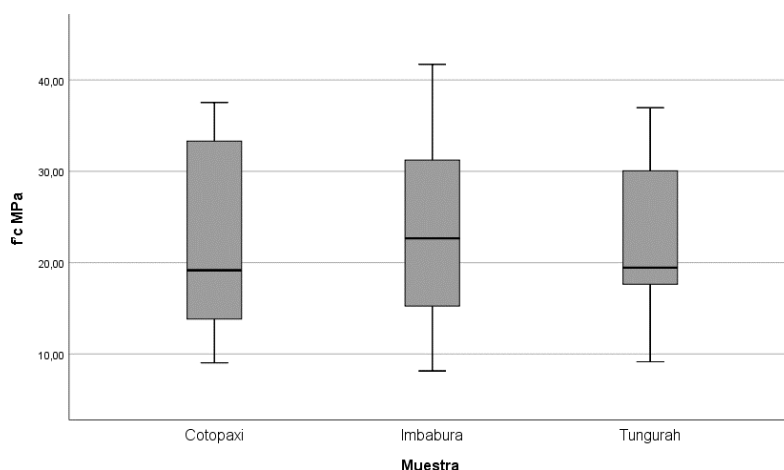


Ilustración 21.Diagrama de cajas en función de la resistencia de cada yacimiento.

En la Ilustración 21 se observa que la muestra de Imbabura presenta la mayor dispersión de datos y el valor máximo de resistencia, con una mediana cercana a los 23 MPa, lo que sugiere un mayor potencial mecánico, aunque con mayor variabilidad. En cambio, las muestras de Cotopaxi y Tungurahua muestran distribuciones más compactas, con medianas similares en torno a los 19 MPa y rangos de resistencia comprendidos entre aproximadamente 10 MPa y 36 MPa. La muestra de Cotopaxi tiene una leve asimetría negativa, mientras que la de Tungurahua presenta una distribución más equilibrada.

En la Ilustración 22 se presenta la dispersión de puntos donde se muestra la resistencia en función de la concentración molar: existe una relación directa entre la concentración de hidróxido de sodio y la resistencia a la compresión. A medida que aumenta la concentración de hidróxido de sodio, la resistencia a la compresión también se incrementa. Estos resultados evidencian que la alcalinidad del medio favorece la activación del material precursor, mejorando las propiedades mecánicas del geopolímero. Adicionalmente se destaca que la PP de Cotopaxi muestra los mayores valores de resistencia con una molaridad de concentración molar 16 de hidróxido de sodio presenta la dispersión de puntos que correlaciona la resistencia a la compresión con la concentración molar de hidróxido de sodio, evidenciando una relación directa y positiva entre ambas variables. A medida que se incrementa la concentración de hidróxido de sodio, la resistencia a la compresión también aumenta. Estos resultados coinciden con la literatura en el campo de los geopolímeros, la cual establece que una mayor alcalinidad del medio favorece la disolución de los aluminosilicatos presentes en el material precursor, promoviendo así la formación de fases gel geopoliméricas que contribuyen al desarrollo de las propiedades mecánicas (Davidovits, 2015; Provis & van Deventer, 2014; Duxson et al., 2007). Particularmente, PP de Cotopaxi exhibe los valores de resistencia más elevados, destacando un pico óptimo de rendimiento a una concentración de 16 M de hidróxido de sodio. Este hallazgo subraya la importancia de la optimización de la molaridad del activador alcalino para

maximizar las propiedades mecánicas del geopolímero, un factor crítico en el diseño de estos materiales (Palomo et al., 1999).

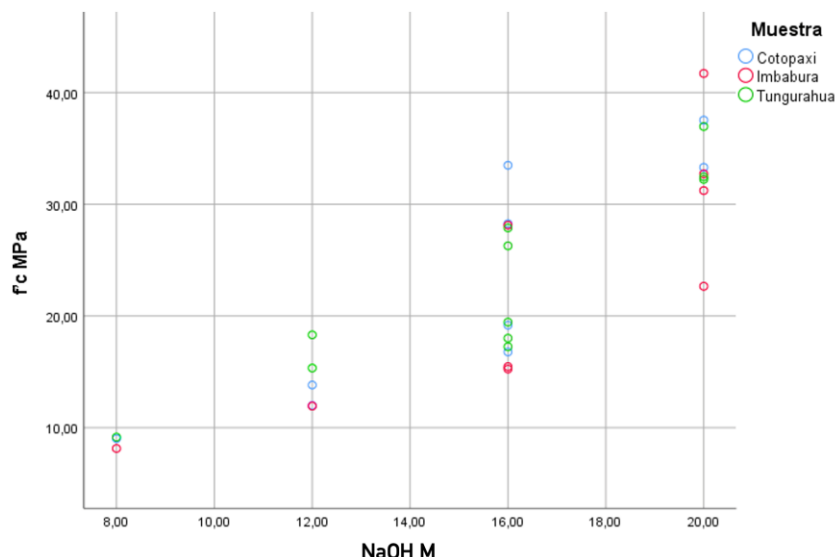


Ilustración 22. Dispersión de puntos en función de la resistencia a la compresión y la concentración molar de NaOH.

Condición inicial para elaborar hormigones: Cálculo de las propiedades físicas de los áridos a utilizar en la elaboración de HGP

Tabla 25. Tamaño máximo (TM), Tamaño máximo nominal (TMN) y Módulo de finura (MF)

Empresa	Ensayo	TM	TMN	MF
Hormigones Moreno	Granulometría	No. 4	No. 30	2.38
	Árido Fino			
	Granulometría	1"	¾"	2.50
Covipal	Granulometría	No.4	No. 50	2.38
	Árido Fino			
	Granulometría	1"	¾"	2.49
LÍMITE SUPERIOR				
Hormigones Moreno	Granulometría	3/8"	No. 16	2.30
	Árido Fino			
	Granulometría	¾"	3/8"	2.31
LÍMITE INFERIOR				
Hormigones Moreno	Granulometría	3/8"	No. 8	3.09
	Árido Fino			
	Granulometría	1"	3/8"	2.85

Los depósitos de Imbabura y Tungurahua presentaron valores similares en el tamiz de 75 μm (cerca del 80%), lo que indicó una distribución parecida de partículas finas. Sin embargo, el depósito de Cotopaxi mostró un valor significativamente menor (16.04% en el tamiz de 75 μm), lo que indicó un mayor porcentaje de partículas de gran tamaño en este material. En el tamiz de 150 μm , todos los depósitos registraron valores superiores al 92%, con distribución más uniforme de partículas en este rango de tamaño. Estos cambios en la granulometría pudieron

influir considerablemente en las características de los geopolímeros que se generaron, tales como la reactividad, la resistencia y la capacidad de trabajo (Lothenbach et al., 2007).

Tabla 26. Condiciones iniciales del HGP.

	D_(sss) g/cm³	%Abs
Agregado Fino	2.67	1.70
Agregado Grueso	2.43	1.190

En la Tabla 26 se presentan los resultados obtenidos de los ensayos de densidad en condición saturada superficialmente seca ($D_{(sss)}$) y porcentaje de absorción (%Abs) realizados tanto al agregado fino como al agregado grueso. El agregado fino presentó una densidad $D_{(sss)}$ de 2.67 g/cm³ y una absorción de 1.70%, mientras que el agregado grueso mostró una densidad $D_{(sss)}$ de 2.43 g/cm³ y una absorción ligeramente menor de 1.19%. Estos valores se encuentran dentro del rango esperado para materiales pétreos utilizados en construcción, lo que indica una adecuada compacidad y una porosidad controlada, factores relevantes para su desempeño en mezclas cementicias o geopoliméricas.

Dosificación y preparación del HGP

Utilizando la proporción óptima de áridos previamente determinada, se procedió a calcular las cantidades en masa de agregados requeridas por kilogramo de material precursor geopolimérico. Estos valores se obtuvieron aplicando las relaciones porcentuales definidas y se detallan en la Tabla 27.

Tabla 27. Cantidad de material utilizado en el HGP

Geopolímero	Árido	Geopolímero				Arena	Árido	
		Piedra pómez	Hidróxido de sodio	Silicato de sodio	Total geopolímero		Ripio	Total árido
%	%	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)	(g)
10%	90%	100	29	46	175	605	970	1575
20%	80%	200	58	92	350	280	420	1400
30%	70%	300	87	138	525	245	368	1225
40%	60%	400	116	184	700	210	315	1050
50%	50%	500	145	230	875	175	263	875
60%	40%	600	174	276	1050	140	210	700
70%	30%	700	203	322	1225	105	158	525
80%	20%	800	232	368	1400	70	105	350
90%	10%	900	261	414	1575	3	53	175
100%	0%	1000	290	460	1750	0	0,00	0

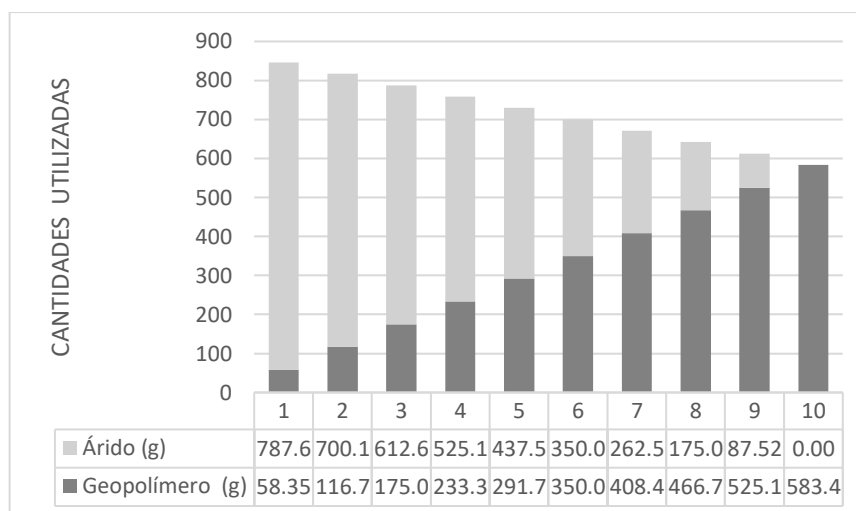


Ilustración 23. Cantidades utilizadas para la elaboración de probetas.

Preparación y evaluación de resistencia a la compresión en HGP

En la Tabla 28 se presenta la resistencia a la compresión de HGP elaborado con GPP de Cotopaxi, las probetas fueron evaluadas a los 28 días de edad, tras haber sido sometidas a un proceso de curado térmico en horno. Por limitaciones de espacio en el laboratorio, el curado se realizó en distintos hornos. Los hallazgos mostraron una variación significativa en la resistencia, incluso dentro del mismo porcentaje. Se observó que la relación 30/70 (GPP/AR) presenta valores de resistencia bastante bajos (5.64 MPa y 6.34 MPa) lo cual podría estar relacionado con una mezcla inadecuada o una incompatibilidad entre el conglomerante y los agregados (Joseph, 2008). Además, el fenómeno de expansión en la parte superior de la probeta indica posibles reacciones de expansión térmica o química, lo cual se ha documentado en estudios previos (Palomo et al., 1999). Al aumentar la proporción a 40/60, la resistencia a la compresión va disminuyendo (3.21 MPa, 3.60 MPa, 5.09 MPa y 5.37 MPa), y de igual manera persiste los problemas en el acabado superficial y la aparición de fisuras, lo que muestra que el aumento de la proporción de AR podría haber comprometido la resistencia mecánica y la integridad estructural (Zhao et al., 2017). Estos resultados indican que la relación 30/70 es la más adecuada con este GPP (Rios et al., 2014).

Tabla 28. Resultados ensayos de compresión de la provincia de Cotopaxi.

N°	Muestra	Pómez / Áridos	Resistencia		Observaciones
			Resistencia MPa		
1	Cotopaxi	10/90	0.95	14/02/2022	Fisuras, cavidades grandes sin hinchazón, fisuras, desmoronamiento de áridos.
2	Cotopaxi	20/80	0.98	14/02/2022	Fisuras, cavidades grandes sin hinchazón, presenta fisuras, desmoronamiento de áridos
3	Cotopaxi	40/60	3.21	2/2/2022	Acabado superficial regular, no presenta hinchazón, pero sí fisuras.
4	Cotopaxi	40/60	3.6	2/27/2022	Acabado superficial regular, presenta hinchazón y sí fisuras.
5	Cotopaxi	100/0	3.87	15/02/2022	Acabado superficial regular, no presenta hinchazón, pero sí fisuras.
6	Cotopaxi	80/20	3.94	9/2/2022	Acabado superficial regular, presenta cierta hinchazón en la parte superior y fisuras.
7	Cotopaxi	70/30	4.36	15/02/2022	Acabado superficial bueno, presenta cierta hinchazón en la parte superior y pocas fisuras.
8	Cotopaxi	50/50	4.41	7/2/2022	Acabado superficial regular, presenta cierta hinchazón en la parte superior, pero sí fisuras.
9	Cotopaxi	90/10	4.42	9/2/2022	Acabado superficial regular, no presenta hinchazón, pero sí fisuras.
10	Cotopaxi	50/50	4.89	16/02/2022	Acabado superficial bueno no presenta fisuras, pero si poros pequeños
11	Cotopaxi	40/60	5.09	27/1/2022	Acabado superficial malo, expansión en la parte superior de la probeta.
12	Cotopaxi	40/60	5.37	27/1/2022	Acabado superficial malo, expansión en la parte superior de la probeta.
13	Cotopaxi	30/70	5.64	26/1/2022	Mezcla seca, expansión en la parte superior de la probeta se requirió incorporar más solución.
14	Cotopaxi	60/40	6.1	14/02/2022	Acabado superficial bueno no presenta fisuras, pero si poros pequeños
15	Cotopaxi	30/70	6.34	26/1/2022	Mezcla seca, expansión en la parte superior de la probeta.

En la Tabla 29 se presenta la resistencia a compresión de HGP elaborado con GPP de Imbabura, las probetas fueron evaluadas a los 28 días de edad, tras haber sido sometidas a un proceso de curado térmico en horno. Por limitaciones de espacio en el laboratorio, el curado se realizó en distintos hornos. Las resistencias obtenidas oscilan entre 0.97 MPa y 13.31 MPa, donde se alcanzaron valores superiores a 12 MPa, estos resultados son consistentes con estudios previos que destacan la importancia de la relación entre el precursor y el árido en la resistencia final del material, donde un adecuado equilibrio entre el conglomerante y el árido mejora la cohesión estructural y la resistencia mecánica (Palomo et al., 1999).

Las mezclas con menor contenido de árido (10/90 y 30/70) presentaron los valores más bajos de resistencia y problemas como fisuras, lo que resalta la sensibilidad del HGP a la proporción de los materiales empleados (Joseph, 2008). En términos de acabado superficial, la mayoría fueron buenos, aunque algunas muestras mostraron fisuras en la parte superior. Además, se identificó una ligera expansión en la mezcla 60/40, lo que podría estar relacionado con la reactividad del geopolímero, fenómeno ya reportado en otros estudios que vinculan la expansión con la interacción de los materiales alcalinos con los precursores (Kaufmann et al., 2012). Sin embargo, la mejor proporción fue de 40/60 ya que presentó una resistencia a la compresión de 13.31 MPa con un acabado superficial bueno. Estos resultados indican que la relación 40/60 es la más adecuada con este GPP.

Tabla 29. Resultados ensayos de compresión de la provincia de Imbabura.

Nº	Muestra	Pómez/Áridos	Resistencia MPa	Observaciones	
1	Imbabura	30/70	3.86	26/1/2022	Acabado superficial bueno, no presenta hinchazón.
2	Imbabura	40/60	4.07	27/1/2022	Acabado superficial regular, no presenta hinchazón, pero sí fisuras.
3	Imbabura	40/60	3.86	27/1/2022	Acabado superficial regular, no presenta hinchazón, pero sí fisuras.
4	Imbabura	40/60	13.20	2/27/2022	Acabado superficial bueno, no presenta hinchazón, pero fisuras en la parte superior.
5	Imbabura	40/60	13.31	2/27/2022	Acabado superficial bueno, no presenta hinchazón, pero fisuras en la parte superior.
6	Imbabura	50/50	10.63	7/2/2022	Acabado superficial bueno, no presenta hinchazón, pero fisuras en la parte superior.
7	Imbabura	80/20	11.57	9/2/2022	Acabado superficial regular, no presenta hinchazón, pero sí fisuras.
8	Imbabura	65/45	4.96	9/2/2022	Acabado superficial malo, no presenta hinchazón, pero sí fisuras.
9	Imbabura	10/90	0.97	14/02/2022	Fisuras, cavidades grandes sin hinchazón, fisuras, desmontamiento de áridos
10	Imbabura	20/80	9.20	14/02/2022	Fisuras, sin hinchazón, acabado malo, poroso, no existía trabajabilidad.
11	Imbabura	60/40	9.15	14/02/2022	acabado bueno, sin fisuras, ligera expansión
12	Imbabura	70/30	12.25	15/02/2022	Acabado superficial bueno, no presenta hinchazón en la parte superior y pocas fisuras.
13	Imbabura	100/0	9.42	16/02/2022	
14	Imbabura	90/10	12.19	14/02/2022	Acabo superficial bueno, poros pequeños sin fisuras
15	Imbabura	30/70	2.16	16/02/2022	

En la Tabla 30 se presenta la resistencia a la compresión de HGP elaborado con PP de Tungurahua, las probetas fueron evaluadas a los 28 días de edad, tras haber sido sometidas a un proceso de curado térmico en horno. Por limitaciones de espacio en el laboratorio, el curado se realizó en distintos hornos. Con cantidades reducidas GPP con las relaciones 30/70 y 40/60 (GPP/AR), la resistencia es baja (de 5.20 MPa a 3.36 MPa), de igual manera presentó dificultades en el acabado superficial y en la expansión del material. Al incrementar el porcentaje de GPP (de 60/40 a 80/20), se observa un notable aumento en la resistencia (de 10.32 MPa a 14.45 MPa), así como mejoras en el acabado y una reducción de grietas. Las proporciones más elevadas de GPP (90/10 y 100/0) exhiben altas resistencias (de 11.69 MPa a 15.15 MPa). Sin embargo, la mejor proporción fue de 50/50 ya que presentó una resistencia a la compresión de 16.16MPa con un acabado superficial bueno y sin fisuras. Estos resultados indican que la relación 50/50 es la más adecuada con este GPP.

Tabla 30. Resultados ensayos de compresión de la provincia de Tungurahua.

N°	Muestra	Pómez/Áridos	Resistencia MPa	Observaciones
1	Tungurahua	30/70	5.20	26/1/2022 Acabado superficial regular, expansión en la parte superior de la probeta.
2	Tungurahua	40/60	4.31	27/1/2022 Acabado superficial malo, expansión en la parte superior de la probeta.
3	Tungurahua	40/60	3.36	27/1/2022 Acabado superficial malo, expansión en la parte superior de la probeta.
4	Tungurahua	90/10	11.69	9/2/2022 Acabado superficial regular, presenta cierta hinchazón en la parte superior, pero sí fisuras.
5	Tungurahua	90/10	12.16	9/2/2022 Acabado superficial regular, presenta cierta hinchazón en la parte superior, pero no fisuras.
6	Tungurahua	10/90	0.96	14/02/2022 Acabado superficial regular, no presenta hinchazón, pocas fisuras.
7	Tungurahua	20/80	1.01	14/02/2022 Fisuras, sin hinchazón, acabado malo, poroso, no existía trabajabilidad.
8	Tungurahua	60/40	10.32	15/02/2022 acabado superficial bueno, presenta un poco de poros, pero ninguna fisura
9	Tungurahua	70/30	12.94	15/02/2022 Acabado superficial regular, presenta cierta hinchazón en la parte superior, pero no fisuras.
10	Tungurahua	100/0	15.85	15/02/2022
11	Tungurahua	80/20	14.45	14/02/2022 acabado superficial bueno, presenta un poco de poros, pero ninguna fisura
12	Tungurahua	30/70	14.61	16/02/2022 acabado superficial bueno, presenta un poco de poros, pero ninguna fisura
13	Tungurahua	40/60	5.43	16/02/2022 acabado superficial bueno, presenta un poco de poros, pero ninguna fisura
14	Tungurahua	50/50	16.16	17/02/2022 acabado superficial bueno, presenta un poco de poros, pero ninguna fisura
15	Tungurahua	90/10	11.69	9/2/2022 Acabado superficial regular, presenta cierta hinchazón en la parte superior, pero sí fisuras.

Los resultados obtenidos del ensayo de resistencia a compresión de los cilindros de HGP posteriormente fueron analizados mediante el software IBM SPSS Statistics. El análisis descriptivo se centrará en evaluar la de resistencia a la compresión.

Análisis descriptivo de resistencia a la compresión en cilindros de HGP

En la Tabla 31 e Ilustración 24 se puede observar las frecuencias de las probetas, en la cual se muestra la distribución de 45 muestras en tres categorías según el HGP de cada yacimiento. Cotopaxi, Imbabura y Tungurahua representan el 33.33% cada uno (15 muestras respectivamente). Al tener un porcentaje válido y acumulado de 100 indica que no existe datos faltantes para el análisis.

Tabla 31. Muestra de cilindros de hormigón geopolimérico.

Muestra	Frecuencia	Porcentaje	Porcentaje válido	Porcentaje acumulado
Cotopaxi	15	33.3	33.3	33.3
Imbabura	15	33.3	33.3	66.7
Tungurahua	15	33.3	33.3	100.0
Total	45	100	100	

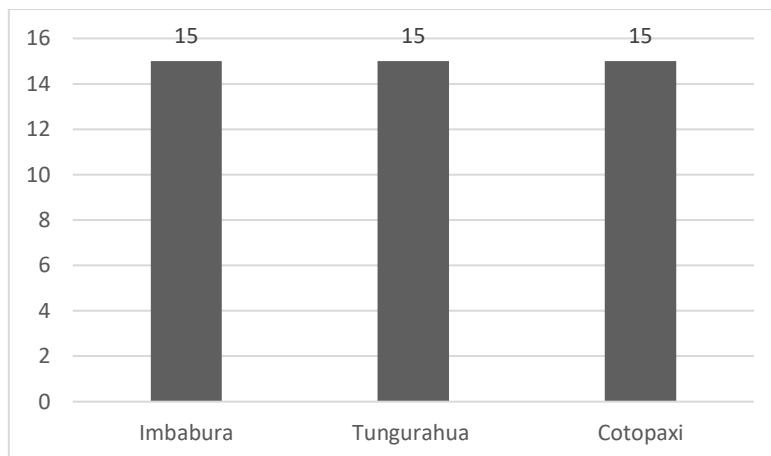


Ilustración 24. Diagrama de barras del análisis de frecuencia simple del número de probetas.

Los resultados muestran que el HGP elaborado con materia prima del yacimiento de Cotopaxi obtuvo la menor resistencia media a la compresión, lo que muestra que la piedra pómez de esta procedencia posee una menor reactividad o características fisicoquímicas menos favorables para el desarrollo de la matriz geopolimérica. En contraste, las muestras provenientes de Imbabura y Tungurahua alcanzaron valores más altos y comparables entre sí, lo cual indica un mejor desempeño mecánico y una mayor efectividad de activación alcalina en sus mezclas. Estos resultados reflejan la influencia directa del origen geológico de la piedra pómez en la resistencia del HGP, subrayando la importancia de la caracterización del material precursor en el diseño de geopolímeros de alto rendimiento.

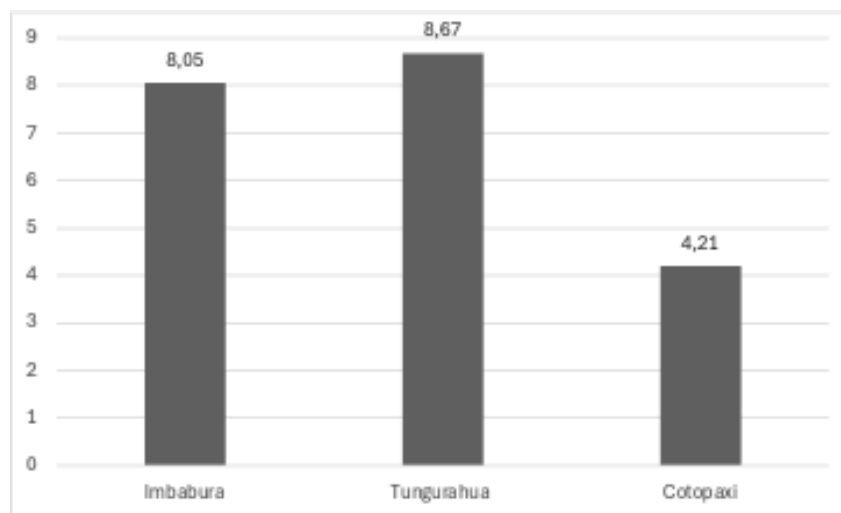


Ilustración 25. Diagrama de barras del análisis de frecuencia simple de resistencia a compresión.

A continuación, en la Tabla 32, Tabla 33 y Tabla 34 se muestra el análisis descriptivo en la resistencia a la compresión del HGP con la materia prima de cada yacimiento:

Tabla 32. Análisis descriptivo de datos de resistencia a compresión del HGP con el GPP elaborado con precursor la PP Cotopaxi.

Muestra	Estadístico	Error estándar
Media	4.21	0.41
95% de intervalo de confianza para la media	3.33	
Media recortada al 5%	4.27	
Mediana	4.41	
Varianza	2.53	
Desviación estándar	1.59	
Mínimo	0.95	
Máximo	6.34	
Rango	5.39	
Asimetría	-0.97	0.58

Tabla 33. Análisis descriptivo de datos de resistencia a compresión del HGP con el GPP elaborado con precursor la PP Imbabura.

Muestra	Estadístico	Error estándar
Media	8.05	1.10
95% de intervalo de confianza para la media	5.67	
Media recortada al 5%	8.15	
Mediana	9.20	
Varianza	18.40	
Desviación estándar	4.29	
Mínimo	0.97	
Máximo	13.31	
Rango	12.34	
Asimetría	-0.32	0.580

Tabla 34. Análisis descriptivo de datos de resistencia a compresión del HGP con el GPP elaborado con precursor la PP Tungurahua.

Muestra	Estadístico	Error estándar
Media	8,67	1,47
95% de intervalo de confianza para la media	5,51	
Media recortada al 5%	8,68	
Mediana	10,32	
Varianza	32,58	
Desviación estándar	5,70	
Mínimo	0,96	
Máximo	16,16	
Rango	15,20	
Asimetría	-0,09	0,58

Las tablas anteriores muestran diferencias significativas en la resistencia a la compresión del HGP en función de la materia prima utilizada en cada GPP. En particular, Tungurahua presenta la mayor resistencia promedio (8.67 MPa), pero también la mayor variabilidad en los datos, reflejada en su alta varianza y desviación estándar. Por otro lado, Imbabura muestra una resistencia intermedia (8.05 MPa) con una variabilidad moderada, mientras que Cotopaxi

exhibe la menor resistencia promedio (4.21 MPa), aunque con la menor dispersión de resultados. La distribución de los datos en todas las muestras presenta una asimetría negativa, lo que indica una concentración de valores hacia el extremo superior del rango, corroborada por una mediana ligeramente superior a la media. Estos resultados mostraron que la composición y las características minerales de cada materia prima influyen significativamente en la resistencia del HGP, como lo han demostrado estudios previos sobre la influencia de la granulometría y la composición química en materiales geopoliméricos (Duxson, Fernández-Jiménez, Provis, Lukey, Palomo, & Van Deventer, 2007; Fernández-Jiménez et al., 2005; Zuhua Zhang et al., 2014).

Tras analizar los resultados anteriores, se elaboró un diagrama de cajas y bigotes (Ilustración 26) que revela diferencias en la resistencia a la compresión entre muestras de distintos yacimientos. La muestra de HGP con materia prima de Tungurahua exhibe la mediana más alta, lo que sugiere una mayor resistencia a la compresión en comparación con las otras muestras. Por otro lado, la muestra de HGP con materia prima de Cotopaxi presenta la mediana más baja y la presencia de valores atípicos, que se atribuye a problemas durante la reacción entre el árido (AR) y el geo polímero precursor (GPP) en ciertas proporciones de la mezcla.

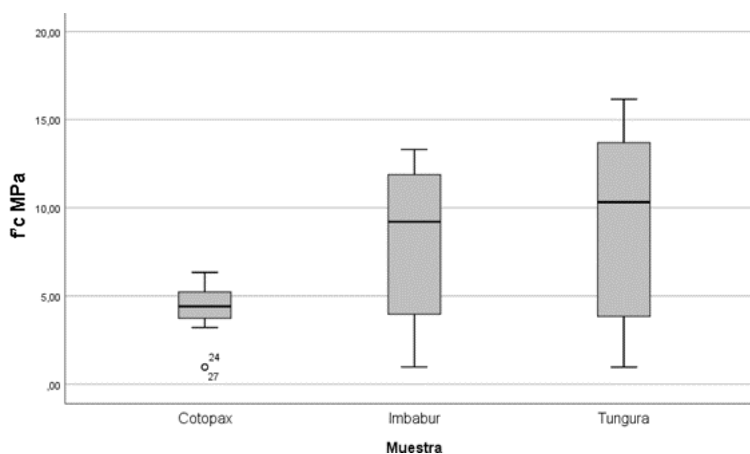


Ilustración 26. Diagrama de cajas en función de la resistencia de cada yacimiento.

Las variaciones en la resistencia a la compresión pueden atribuirse a las propiedades mineralógicas y granulométricas de cada muestra individual. Investigaciones han demostrado que la reacción de los precursores en los geopolímeros se ve significativamente afectada por la composición química de la materia prima y la relación de activadores alcalinos utilizados en su fabricación (Zhao et al., 2017). Además, la variabilidad observada en Imbabura y Tungurahua pudo estar relacionado con variaciones en la distribución del tamaño de las partículas y la presencia de fases amorfas en las materias primas empleadas, factores que se han reconocido como esenciales en la resistencia mecánica de los geopolímeros (Duxson, Fernández-Jiménez, Provis, Lukey, Palomo, & Van Deventer, 2007). Por otro lado, la menor

dispersión en Cotopaxi indica un comportamiento más homogéneo en la resistencia de sus muestras, lo que podría indicar una composición más uniforme o una menor reactividad de su precursor (Criado et al., 2020). Estas diferencias resaltan la importancia de un control de calidad en la selección y procesamiento de las materias primas para optimizar las propiedades mecánicas del material final.

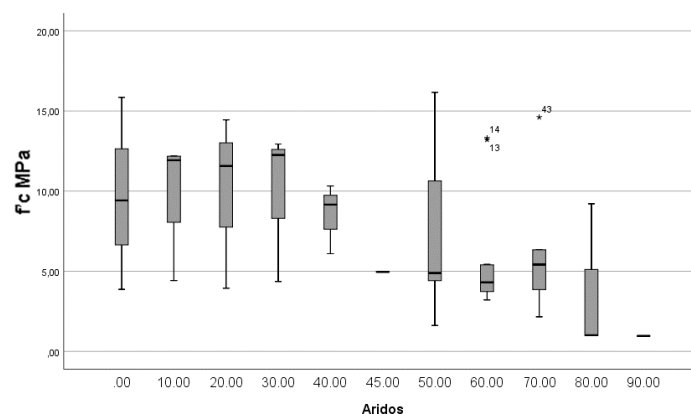


Ilustración 27. Diagrama de cajas en función del porcentaje de áridos.

La Ilustración 27 muestra la relación entre el porcentaje de áridos y la resistencia a la compresión. Para valores bajos de áridos (0 % - 30 %), la resistencia es mayor y más estable, mientras que a partir del 40 % disminuye y la variabilidad aumenta, con valores atípicos en 50 % y 70 %. A partir del 60 %, la resistencia es más uniforme pero baja, alcanzando valores mínimos en 80 % y 90 %. Esto indica porosidad por defecto de la pasta.

De igual manera se realizó lo mismo para el HGP con cada uno de los GPP de cada yacimiento, como se muestra en la Ilustración 28, Ilustración 29 e Ilustración 30.

Análisis descriptivo de datos de Cotopaxi.

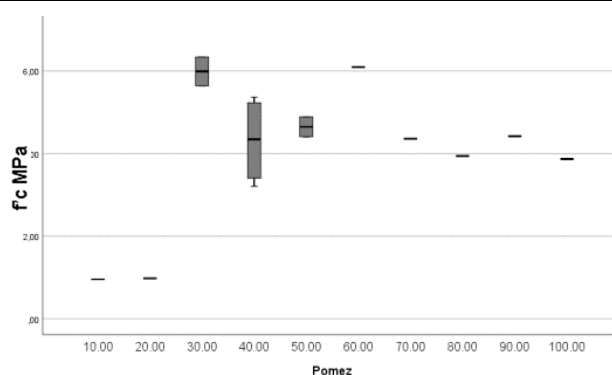


Ilustración 28. Análisis descriptivo de datos de Cotopaxi.

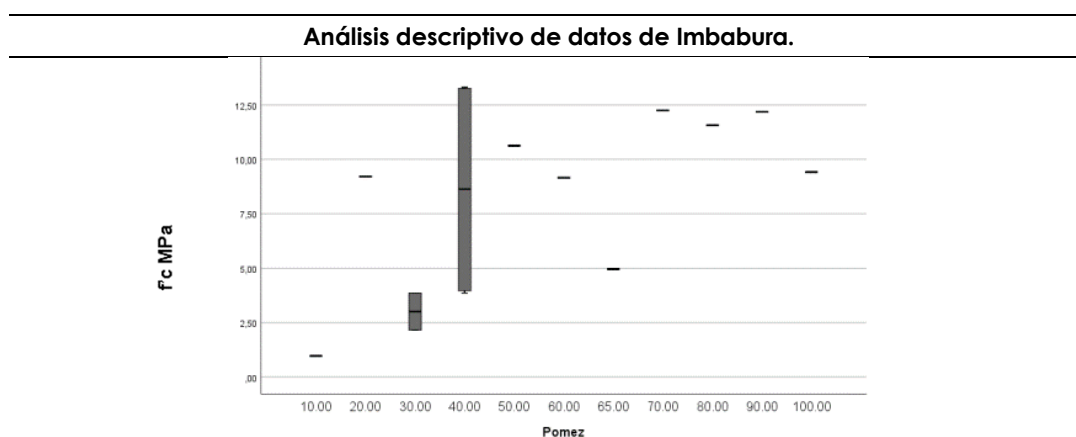


Ilustración 29. Análisis descriptivo de datos de Imbabura.

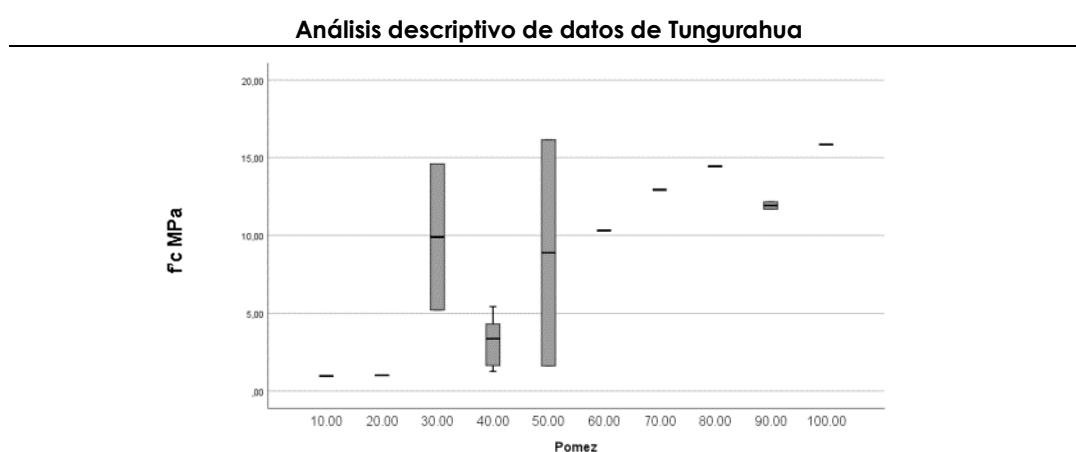


Ilustración 30. Análisis descriptivo de datos de Tungurahua.

En este análisis se observa que existe diferencias significativas en la resistencia a la compresión entre las muestras. Sin embargo, el HGP con materia prima de Tungurahua presenta la mayor resistencia promedio a la compresión (8.67 MPa), seguida por HGP con materia prima de Imbabura (8,05 MPa) y luego HGP con materia prima Cotopaxi (4.21 MPa). Aunque el HGP con materia prima de Cotopaxi y Tungurahua tienen la misma proporción de pómez y áridos (50% cada uno), el HGP con materia prima Tungurahua muestra una resistencia mayor, sin embargo, la molaridad es un parámetro a considerar dentro de sus aplicaciones como conglomerante de hormigones.

2.5. Discusión capítulo 2

La microscopia electrónica mostró la presencia de aluminosilicatos dentro de la estructura amorfa del material (76,4% Imbabura; 65,9 Tungurahua y 83,4 Cotopaxi) lo que mostró con su aplicación en el diseño de geopolímeros una composición altamente reactiva bajo condiciones alcalinas. Adicionalmente el análisis químico reveló una composición de aluminosilicato volcánico con un alto contenido de sílice (SiO_2 de 68.06%) y alúmina (Al_2O_3 de

13%) lo que lo hace ideal como precursor geopolimérico para geles tipo N-A-S-H (Provis & van Deventer, 2009). La presencia de óxidos alcalinos (Na_2O de 5.53% ; K_2O de 4.21%) favorece su activación, mientras que el bajo CaO (2.08%) lo clasifica como un sistema de baja proporción cálcica (Duxson et al., 2007). Otros compuestos detectados son comunes y no restringen su uso sostenible (Davidovits, 2011).

Siguiendo los criterios iniciales de (Davidovits, 1991), se realizó la dosificación del geopolímero. Se utilizó la relación de solución alcalina a aluminosilicatos (0.65) y la proporción de silicato de Na_2SiO_3 / NaOH (de 2 a 2.5) para lograr la activación alcalina del geopolímero. Criado et al. (2020) y Zhang et al. (2014) mencionan que un equilibrio óptimo entre estos componentes es esencial para obtener una alta reactividad, así como propiedades mecánicas y de durabilidad adecuadas, ya que influyen directamente en la disolución de aluminosilicatos y en la formación de estructuras poliméricas, coincidiendo con Fernández-Jiménez & Palomo (2011). Una mayor proporción de silicato de sodio favorece la formación de cadenas de aluminosilicatos, lo que mejora la cohesión; sin embargo, un exceso puede aumentar la porosidad.(Criado et al., 2020; Duxson, Fernández-Jiménez, Provis, Lukey, Palomo, & Van Deventer, 2007; Villariquin et al., 2013).

Siguiendo los criterios iniciales de (Davidovits, 1991) se realizó la dosificación del geopolímero. Se utilizó la relación de solución alcalina a aluminosilicatos (1.65) y la proporción de silicato de sodio/hidróxido de sodio (2.5) para lograr la activación alcalina del geopolímero. Criado et al., (2020) y Zhang et al., (2014) mencionan que un equilibrio óptimo entre estos componentes es esencial para obtener una alta reactividad, así como propiedades mecánicas y de durabilidad adecuadas, ya que influyen directamente en la disolución de aluminosilicatos y en la formación de estructuras poliméricas coincidiendo con Fernández-Jiménez & Palomo, (2011). Una mayor proporción de silicato de sodio favorece la formación de cadenas de aluminosilicatos, lo que mejora la cohesión; sin embargo, un exceso puede aumentar la porosidad (Duxson, Fernández-Jiménez, Provis, Lukey, Palomo, & Van Deventer, 2007; Rovnaník, 2010)

Las pastas con GPP de Tungurahua e Imbabura presentan una elevada resistencia a la compresión, alcanzando valores cercanos a 23 MPa, lo que los coloca por encima de Cotopaxi. Esta resistencia se atribuye a la mayor concentración molar de hidróxido de sodio (20M), que favorece la formación de geles N-A-S-H y mejora la cohesión de la matriz geopolimérica (Criado et al., 2020; Duxson, Fernández-Jiménez, Provis, Lukey, Palomo, & Van Deventer, 2007). Sin embargo, el uso de concentraciones tan elevadas de NaOH conlleva desventajas significativas. Investigaciones anteriores han señalado que esto puede aumentar la porosidad y reducir la durabilidad del material, afectando su desempeño a largo plazo (Pacheco-Torgal et al., 2008). Además, el uso intensivo de NaOH eleva los costos de producción

y genera riesgos ambientales y de seguridad, lo que compromete la sostenibilidad del proceso (Bernal & Provis, 2014; Ministerio de Gobierno del Ecuador., 2023; Zhao et al., 2017)

Por otro lado, las pastas con GPP de Cotopaxi, con una resistencia de 22.60 MPa con una concentración de molar 16 de hidróxido de sodio, exhibe una menor dispersión en los resultados y, considerando criterios desde un enfoque ambiental y económico, su viabilidad como sustituto del cemento Portland se ve reforzada debido a un menor consumo de material activador y a la reducción de emisiones de CO₂ en comparación con los cementos convencionales Zhang et al., (2014), ya que la sostenibilidad del proceso depende del balance entre la cantidad de activador utilizada y el impacto ambiental asociado a su producción, un aspecto fundamental en el desarrollo de materiales de construcción ecológicos (Habert et al., 2011)

En la evaluación mecánica de la resistencia a la compresión de los HGP con materia prima de distintas regiones del Ecuador mostro diferencias significativas en su desempeño. En particular, el HGP elaborado con piedra pómez de Tungurahua alcanzó la mayor resistencia a la compresión, con un valor promedio de 8.67 MPa, seguido por el de Imbabura, con 8.05 MPa, mientras que el HGP con materia prima de Cotopaxi presentó la menor resistencia, registrando 4.21 MPa. Estas variaciones se atribuyen a la composición mineralógica y granulométrica de la piedra pómez de cada yacimiento, factores que influyen directamente en la reactividad de la matriz geopolimérica y en su interacción con los áridos (J. Provis & van Deventer, 2014)). Investigaciones anteriores han evidenciado que el tamaño de las partículas y la existencia de fases amorfas en los materiales precursores pueden influir de manera notable en la resistencia mecánica de los geopolímeros, mejorando o restringiendo su rendimiento estructural (Bernal & Provis, 2014; Davidovits, 2015; Deventer, 2009; Salirrosas, 2020).

Davidovits, (1991) destacó que las propiedades mecánicas de los geopolímeros dependen en gran medida de la naturaleza y calidad de las materias primas utilizadas. Además, estudios más recientes, como los de Joseph Davidovits, (2015) ; Juenger et al., (2011) y Zhang et al., (2014), han enfatizado el papel fundamental de la distribución de partículas y la reactividad de los materiales en la microestructura y resistencia final.

2.6 Conclusiones

La piedra pómez de las provincias de Tungurahua, Imbabura y Cotopaxi contiene aluminosilicatos en su estructura amorfa, lo que permite su activación geopolimérica. Esto confirma su potencial como alternativa sostenible al cemento Portland.

La resistencia a la compresión de pastas geopoliméricas varía según la procedencia de la piedra pómez. Los valores más altos se obtuvieron con GPP de Tungurahua e Imbabura,

aunque requieren una mayor concentración de hidróxido de sodio, lo que impacta en la eficiencia del proceso.

El GPP con piedra pómez de Cotopaxi alcanzó una resistencia de 22.60 MPa con una menor concentración de hidróxido de sodio (16M), lo que reduce el consumo de reactivos y las emisiones de CO₂. Esto lo posiciona como la opción más viable en términos de sostenibilidad y disponibilidad de insumos.

La resistencia del HGP varía significativamente según la región de origen de la piedra pómez. El HGP con materia prima de Tungurahua presentó la mayor resistencia, seguido del de Imbabura y el de Cotopaxi. Esto sugiere que la composición mineralógica y granulométrica influye en la consolidación de la matriz geopolimérica. Esto debido a que la presencia de diversos minerales y el tamaño de la partícula afectan la consolidación de la matriz geopolimérica.

Se observó que una mayor concentración de hidróxido de sodio mejora la resistencia a la compresión, aunque con un costo ambiental y económico mayor. Esto implica la necesidad de optimizar la dosificación para lograr un equilibrio entre desempeño mecánico y sostenibilidad.

La capacidad de activación alcalina de la piedra pómez ecuatoriana permite su uso en la formulación de geopolímeros, lo que abre la posibilidad de su aplicación en la construcción sostenible. Sin embargo, se recomienda continuar con estudios que analicen la durabilidad y el comportamiento estructural a largo plazo.

Es importante considerar que la finalidad de este conglomerante es cumplir con los requisitos mínimos para la elaboración de mampuestos, ofreciendo una alternativa amigable con el medio ambiente. Por ello, en los siguientes capítulos se realizarán mejoras a la matriz geopolimérica con adiciones complementarias para alcanzar este objetivo reduciendo la concentración del hidróxido de sodio.

CAPÍTULO 3. COMPARACIÓN DE LA DURABILIDAD FRENTE A ÁCIDOS ENTRE EL GEOPOLÍMERO DE PIEDRA PÓMEZ CON HUMO DE SÍLICE (GPP+SF) Y EL CEMENTO

3.1. Introducción

La resistencia del hormigón de CP se ve afectada por la exposición a sustancias agresivas, como ácidos y sulfatos, que deterioran su microestructura y reducen tanto su capacidad mecánica como su durabilidad (Mehta & Monteiro, 2014). Este problema se intensifica en ambientes urbanos e industriales, donde la presencia de compuestos químicos acelera la corrosión del material (Neville, 2011). Además, debido a su naturaleza alcalina, el CP es especialmente susceptible a la degradación ácida, lo que compromete su estabilidad estructural y su desempeño en condiciones ambientales extremas (Scrivener & Snellings, 2018).

La contaminación ambiental, generada por la actividad humana e industrialización, propicia la proliferación de diversos ácidos en el entorno. Ducci et al., (2023), destaca que el desarrollo en áreas pobladas genera múltiples contaminantes, incluyendo hidrocarburos, nitratos, metales pesados, bacterias fecales y ácidos, entre otros.

Los procesos industriales emplean una amplia variedad de productos químicos, y aunque existen protocolos de seguridad para el manejo de sustancias peligrosas, los derrames y fugas accidentales siguen siendo frecuentes (Wang et al., 2021). Cuando estos compuestos entran en contacto con estructuras de hormigón, pueden acelerar su deterioro y comprometer su resistencia (Mehta & Monteiro, 2014). De igual manera la contaminación industrial genera gases con compuestos de nitrógeno y azufre que se transforman en ácidos nítrico y sulfúrico, los cuales, al mezclarse con la humedad atmosférica, forman la llamada lluvia ácida, con un pH entre 5 y 3. Esta precipitación ácida corroe las estructuras de hormigón, acelerando su deterioro (Provis & Van Deventer, 2009; Ralli, G., & Pantazopoulou, 2021; Ramaswamy & Santhanam, 2017).

Particularmente en el sector agrícola, las instalaciones suelen estar construidas con hormigón, y durante las etapas de recolección, almacenamiento y procesamiento de productos, se generan ácidos orgánicos que, con el tiempo, pueden reaccionar negativamente con la matriz del material (ACI 201., 2016; Shi et al., 2011). Como resultado, esta industria se convierte en una de las principales fuentes de contaminación por ácidos, aumentando el riesgo de degradación estructural y afectando la sostenibilidad de las construcciones.

El hormigón elaborado con CP es vulnerable a ambientes ácidos, especialmente con pH por debajo de 6.5 (Mehta & Siddique, 2016; Neville, 2011; Taylor, 1997). La acidez disuelve los componentes del hormigón, debilitando su estructura (Scrivener & Snellings, 2018).

El hormigón geopolimérico, de igual manera, es vulnerable a ambientes ácidos, y ello se debe principalmente al intercambio iónico y al ataque electrofílico de protones (Allahverdi & Škvára, 2001; Bella, J., Saout, C. L., & Bennani, 2020; Joseph, 2008; Tran, T. T., & Ghosh, 2020). Este ataque puede despolimerizar la estructura de aluminosilicato y liberar ácido silícico, afectando incluso a geopolímeros con alto contenido de silicio (Fernández-Jiménez et al., 2005; Okoye et al., 2017). Si bien algunos cationes como el calcio pueden mejorar la resistencia (Davidovits, 1991; Davidovits, 2015), el grado de deterioro depende de la naturaleza y concentración del ácido, así como de la microestructura del geopolímero (Bakharev, 2005; A. Mehta & Siddique, 2016; Ralli, G., & Pantazopoulou, 2021; Rees et al., 2007).

Este proceso implica un intercambio iónico entre cationes de compensación de carga (sodio, potasio o calcio) e iones de hidrógeno, así como un ataque electrofílico de protones ácidos que expulsa aluminio tetraédrico de la estructura de aluminosilicatos, desintegrándola parcialmente (Okoye, F. N., Prakash, S., & Singh, 2017). Payá et al., (2022) menciona que los activadores se pueden clasificar en: activadores tradicionales como hidróxidos, silicatos y carbonatos, activadores alternativos basado en sílice o álcali y activadores alternativos resultado de la combinación de sílice-álcali.

Según Payá et al., (2022), el humo de sílice (SF), también conocido como microsílce, es un subproducto obtenido durante el proceso de reducción de cuarzo de alta pureza en la fabricación de aleaciones de silicio y ferrosilicio. Este material ha sido ampliamente investigado debido a su capacidad para mejorar significativamente las propiedades mecánicas de los geopolímeros. Investigaciones previas realizadas por Das et al., (2020); Huey Li et al., (2021); Min et al., (2022) han demostrado que una adición del 2% en peso de SF incrementa notablemente la resistencia a la compresión de estos materiales. Sin embargo, cuando la proporción de SF aumenta al 4%, se observa una disminución en este parámetro, lo que sugiere un punto óptimo en términos de dosificación.

Por otro lado, (Kockal et al., 2018) argumentan que incorporaciones de hasta un 5% de SF pueden proporcionar resultados estructurales óptimos, equilibrando tanto la resistencia como la trabajabilidad del material. Sin embargo, (Andrade et al., 2022) muestra que el 10% de adición de SF es la cantidad adecuada para incrementar resistencias mecánicas con geopolímeros específicamente con piedra pómez.

La durabilidad de los geopolímeros, ha sido objeto de estudio en relación con su resistencia mecánica y su comportamiento ante ataques ácidos. Investigaciones como las de

Duxson et al., (2007); Hayes et al., (2021); Safari et al., (2020); Wong, (2022); Z. Zhang et al., (2018); entre otros han explorado el incremento de estas propiedades mediante la incorporación de materiales ricos en sílice y aluminio, elementos clave en la estructura de los geopolímeros. Por esta razón, la incorporación de piedra pómez en la matriz conglomerante, un recurso natural abundante en Ecuador y con un alto contenido de aluminosilicatos, se presenta como una estrategia para mejorar la durabilidad de las matrices de activación de geopolímero junto al SF.

3.2. Materiales

Se emplearon los materiales descritos en el capítulo 2 para la elaboración de probetas de geopolímero de piedra pómez, pero en este capítulo se incorporó humo de sílice como aditivo para mejorar sus propiedades. Con el objetivo de comparar su comportamiento con el del cemento Portland (CP) frente al ataque de ácido nítrico, además del equipamiento básico del laboratorio de química y de control de calidad de materiales de la UNACH, se requirieron los siguientes materiales adicionales para el análisis:

3.2.1. Geopolímero con SF (GPP+SF)

Al geopolímero con PP de Cotopaxi estudiado en el capítulo 3, el cual ha presentado mejores características como pasta conglomerante se le añadirá humo de sílice para mejorar sus propiedades mecánicas, durabilidad y comportamiento microestructural. Este residuo industrial fue adquirido en polvo a la empresa "Ferrekret" ubicada en la ciudad de Guayaquil en una presentación de 5 kg y fue almacenado en las bodegas de los Laboratorio de Control de Calidad de Materiales de la UNACH, las características del material se pueden observar en la Tabla 35.

Tabla 35. Composición química del SF

Componente	Unidad	Resultado
SiO ₂	% w/w	91.10
C libre	% w/w	-
SiC	% w/w	-
MgO	% w/w	0.27
Si libre	% w/w	-
Fe ₂ O ₃	% w/w	0.13
Al ₂ O ₃	% w/w	6.82
CaO	% w/w	0.47
Na ₂ O	% w/w	0.96
K ₂ O	% w/w	0.34
S total	% w/w	-

Tomado de Composición química de "Ferrekret"

3.2.2. Cemento portland tipo GU (CP)

Se utilizó el CP Chimborazo tipo GU, es un cemento que cumple con los requisitos de la normativa ecuatoriana INEN 2380 (2019) que regula los cementos por desempeño para

construcción en general. Es un conglomerante que se compone de clinker (aluminosilicatos de calcio derivados de caliza y arcilla), sulfato de calcio (regulador de fraguado) y adiciones minerales (puzolanas, escorias) para optimizar durabilidad y resistencia química (ASTM C150., 2022; Taylor, 1997). Se lo considera de uso común ya que no requiere aditivos especiales, según lo señalado por Mehta & Monteiro, (2014). Este material fue seleccionado como referencia para comparar su desempeño con el geopolímero desarrollado. Su amplia aplicación en construcciones convencionales lo convierte en un punto de referencia adecuado para evaluar alternativas cementicias, dado su uso en la industria de la construcción y sus propiedades establecidas Neville (2011). En la Tabla 36 se observa sus características.

Tabla 36. Información técnica del cemento portland tipo GU marca "CHIMBORAZO".

Información técnica del cemento portland tipo GU marca CHIMBORAZO	
Requisitos físicos	Valor esperado
Expansión en autoclave (%)	0.418%
Fraguado Vicat Inicial (minuto)	140 – 160 minutos
Fraguado Vicat Final (minuto)	200 – 240 minutos
Tiempo de curado	Resistencia a la compresión (MPa)
3 días	13 – 16
7 días	20 – 25
28 días	28 - 30

Adaptado de ficha técnica de empresa "Cemento Chimborazo"

Los valores esperados pueden ya que obedecen a valores promedios de laboratorio, obtenido de la ficha técnica del material.

3.2.3. Ácido nítrico

Según (Ajay et al., 2020), la penetración de los ácidos modifica la composición de los materiales, afectando sus propiedades físicas y mecánicas, por lo que estos efectos deben considerarse en el diseño y mantenimiento de infraestructuras. En este estudio, se empleó ácido nítrico (HNO_3) como agente agresivo para evaluar el ataque químico en las muestras. Este reactivo, suministrado por el Laboratorio de Química de la Universidad Nacional de Chimborazo, presentaba una pureza del 69,5% y una densidad de 1,415 g/ml. Además, en la Tabla 37 se detallan sus propiedades químicas. La exposición a este ácido generó un proceso de corrosión característico, reduciendo el volumen de la capa afectada debido a la lixiviación del nitrato de calcio, una sal altamente soluble que se forma como resultado de la reacción química.

Tabla 37. Características del ácido nítrico usado.

Características del ácido nítrico usado	
Masa molecular HNO_3	M. W. 63,01
Color	
Densidad	1,51 g/cm ³
Pureza	69,0-70,0 %
Límites máximos de impurezas:	
Residuos en ignición	0,0005 %
Cloruro (Cl)	0,00005 %
Fosfato y silicato ($\text{P}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$)	0,0001 %
Sulfato (SO_4)	0,0001 %
Arsénico (As)	0,000001 %
Cobre (Cu)	0,00001 %
Hierro (Fe)	0,00002 %
Metales pesados (como Pb)	0,00002 %
Manganeso (Mn)	0,00004 %

Adaptado de ficha técnica de empresa "Loba Cheime"

3.2.3. Disoluciones patrón para regular el pH-metro.

Un ácido patrón es una solución con una concentración precisa y estable, empleada como referencia en análisis químicos para determinar la concentración de otras sustancias (Vogel, 2020). Para garantizar resultados exactos en laboratorio, estos ácidos deben ser de alta pureza, no volátiles y reaccionar de manera completa y predecible con las bases o compuestos analizados (Harris, 2015). En esta investigación se utilizó el ácido que fue suministrado por el Laboratorio de Química de la Universidad Nacional de Chimborazo, su función fue calibrar el equipo de medición del pH, utilizando soluciones patrón de pH 7.00 y pH 4.01, adecuadas para los ensayos realizados en un ambiente ácido (Skoog et al., 2014).

3.2.4. Fenolftaleína

Es un compuesto químico indicador de pH que cambia de color en función de la acidez o basicidad del medio en el que se encuentra, permitiendo identificar variaciones en el pH de una solución, mismo que fue suministrado por el Laboratorio de Química de la Universidad Nacional de Chimborazo. Este compuesto al entrar en contacto con sustancias básicas, el indicador adquiere un tono rosado, lo que lo convierte en una herramienta esencial en titulaciones ácido-base para determinar el punto de equivalencia, momento en el que un ácido ha sido completamente neutralizado por una base (Harris, 2015). Este cambio visual facilitó la identificación precisa del momento en que la neutralización se completó, garantizando así la obtención de la concentración deseada. Además, este compuesto se utilizó para mejorar la visibilidad de grietas y huecos en las probetas sometidas a condiciones de acidez controlada y extrema, facilitando su observación mediante microscopía óptica (Skoog et al., 2014).

3.2.5. Reactivos para valoración de ácido.

Para determinar la concentración de ácido nítrico en una disolución de 1 M (o mol/L), se realizó una reacción de neutralización utilizando carbonato de sodio como base. Según Zumdahl, S. S., & Zumdahl, (2014) las reacciones ácido-base se rigen por un principio de transferencia de protones, lo que permite calcular con precisión la concentración del ácido mediante la estequiometría de la reacción.

3.3. Métodos

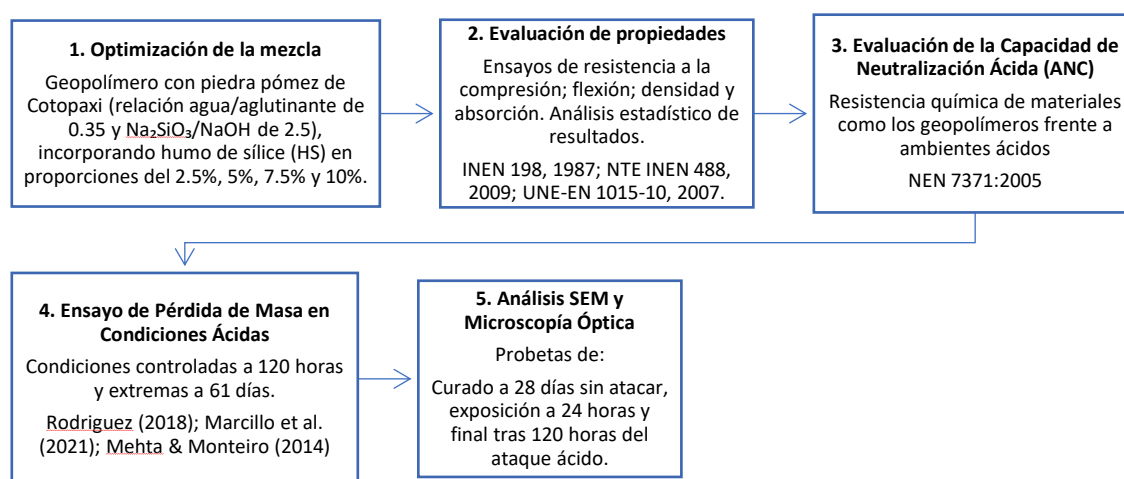


Ilustración 31. Metodología a seguir capítulo 3

3.3.1. Capacidad de neutralización ácida (ANC) de pH combinado

La Capacidad de Neutralización Ácida (ANC) es un indicador esencial que se utiliza para evaluar la capacidad de un material para neutralizar ácidos y mantener la estabilidad del pH en diversos contextos (Blowes et al., 2003; Lothenbach et al., 2007; Nordstrom & Alpers, 1999)). Se siguió los lineamientos de la normativa internacional UNE 196-5, (2011); EA NEN 7371., (2005). Esta capacidad se evaluó en condiciones de pH reguladas, específicamente a niveles de 7, 4 y 2. En estos ensayos, el pH 7 representó un entorno neutro, el pH 4 simuló condiciones de acidez moderada, similares a la lluvia ácida, y el pH 2 correspondió a ambientes de alta acidez, ideales para medir la resistencia del material en situaciones críticas, como la lixiviación de metales pesados (Johnson & Hallberg, 2005; Sposito, 2008)

3.3.2. Pérdida de masa de las probetas en condiciones controladas y extremas

La pérdida de masa en materiales expuestos a medios ácidos es un parámetro clave para evaluar su resistencia y durabilidad. Consiste en, luego de sumergir muestras en soluciones ácidas, medir la cantidad de material disuelto debido a la degradación química. Se aplica en el análisis en hormigones, CP, rocas y residuos industriales, ya que permite analizar la estabilidad química de los materiales en entornos urbanos hasta entornos agresivos como el drenaje ácido

de minas (AMD) y la lluvia ácida (Lothenbach et al., 2007; Nordstrom & Alpers, 1999). Se ha demostrado que modificar la microestructura de materiales mejora la resistencia a la corrosión ácida, reduciendo la pérdida de masa y prolongando su durabilidad (Sanchez & Sobolev, 2010). Para el procedimiento se siguió lo establecido por (Marcillo et al., 2021; Pérez, 2015)

3.3.3. Microscopia electrónica de barrido (SEM) y óptica

La microscopía electrónica de barrido (SEM, del inglés Scanning Electron Microscopy) es una técnica de caracterización avanzada que utiliza un haz de electrones para escanear la superficie de una muestra, generando imágenes de alta resolución y gran profundidad de campo, con ampliaciones que pueden superar las 300,000 “aumentos” a su tamaño real, gracias a estas capacidades, el SEM se convierte en una herramienta fundamental para el análisis detallado de la morfología superficial, la textura, la composición química elemental y la microestructura de diversos materiales. Esta técnica permite analizar la morfología, textura, composición química y estructura de materiales, siendo fundamental en estudios a nivel micro y nanométrico (Goldstein et al., 2018; Reed, 2005).

Se siguió los lineamientos de las normativas internacionales ASTM E1508., (2012), que guía el análisis químico mediante espectroscopía de energía dispersiva de rayos X (EDS) acoplada al SEM; ISO 16700 (2016), que establece directrices para el procesamiento y análisis de imágenes en SEM; y ASTM E766 (2015), que define prácticas para la evaluación de imágenes SEM en fractografía de materiales (ISO, 2016).

Por otro lado, la microscopía óptica utiliza luz visible y lentes ópticos para ampliar muestras con resoluciones de hasta 0,2 μm , siendo ampliamente empleada en la caracterización de microestructuras, fallas en materiales y defectos superficiales, especialmente en análisis metalúrgicos, biológicos y de materiales (Callister & Rethwisch, 2018). La microscopía óptica es una técnica fundamental en el estudio de materiales debido a su capacidad para proporcionar imágenes de alta calidad de estructuras microscópicas (Goldstein et al., 2018; Murphy, 2016).

Se siguió los lineamientos de las normativas internacionales ASTM E883I., (2011), que guía el análisis metalográfico mediante microscopía óptica; la ISO 18264., (2016), que especifica métodos para la microscopía óptica de luz reflejada en materiales.

3.3.4. Ensayos utilizados para comparar la durabilidad frente a ácidos entre pastas de GPP+SF y CP

Para medir la capacidad de neutralización ácida (ANC) y evaluar la pérdida de masa de probetas se utilizó la siguiente metodología:

- Dosificación del GPP+SF

- Ensayo a la compresión de pastas elaborados con el GPP+SF (se encuentra descrito en el capítulo 2 según las normativas ecuatorianas para morteros (INEN 198, 1987; NTE INEN 488, 2009))

- Ensayo a la flexión de pastas elaborados con el GPP+SF

- Ensayo de densidad y absorción aparente de pastas.

- Preparación de pastas con GPP+SF y CP.

- Ensayos mecánicos de pastas de CP y GPP+SF.

- Ensayo de capacidad de neutralización ácida (ANC) condición controlada a pH7, pH4 y pH2

- Pérdida de masa de las probetas en condiciones controladas y extremas

- Microscopia electrónica de barrido SEM y óptica

Dosificación del GPP+SF

A la mejor dosificación del GPP con piedra pómez de Cotopaxi, manteniendo una relación agua y conglomerante de 0.35 (Corrales, 2015; Sierpes et al., 2016) conservando un 2.5 de relación entre el silicato de sodio e hidróxido de sodio Asayesh et al., (2021); Haddad & Lababneh, (2020); A. Safari et al., (2020) según lo realizado en el capítulo 2, se le incorporó SF buscando incrementar su resistencia mecánica. Karthiyaini & Konduru, H., (2025); Luo et al., (2022); Sawan et al., 2020; Sukontasukkul & Chindaprasirt, (2020); Vogel, (2020) entre otros, indican que los porcentajes de incorporación de SF en la elaboración de las probetas, debe expresarse como una proporción del peso del conglomerante empleado, estos porcentajes varían entre un 2% y un 10%. Basándose en estos antecedentes, en la investigación se añadió porcentualmente el 2,5%, 5%, 7,5% y 10% para evaluar su influencia en el comportamiento mecánico a compresión y flexión del material desarrollado.

Preparación de probetas de pastas con GPP+SF y CP

De inicio las probetas de Cemento Portland fueron curadas durante 24 horas en una cámara húmeda, manteniendo una temperatura ambiente de 23 ± 1 °C. Una vez endurecidas, se procedió a su desmolde y posterior inmersión en agua saturada con cal dentro de una piscina de curado. Por otro lado, las probetas de GPP+SF se curaron inicialmente a temperatura ambiente de 23 ± 1 °C durante las primeras 24 horas. Transcurrido este tiempo, las probetas fueron desmoldadas y sometidas a un curado térmico de 120 horas (Safari et al., 2020; Salehi et al., 2017). Este proceso consistió en introducir las probetas en un horno a una temperatura constante de 60 °C (Liew et al., 2016; Livi & Repette, 2017; Safari et al., 2020; Salehi et al., 2017). Al completar el curado térmico, las probetas se cubrieron con película de plástico (film) y se

almacenaron en un ambiente controlado con una temperatura promedio de 18 °C y una humedad relativa del 50 %.

Posteriormente fueron secadas en una estufa a 65°C durante 30 minutos para eliminar la humedad, se trituraron con mortero y combo hasta obtener un polvo fino, el cual fue tamizado a 125 µm, repitiendo el proceso de molienda si era necesario. La muestra tamizada se secó nuevamente en estufa a 65°C por 2 horas para garantizar la eliminación total de humedad y se almacenó en un desecador hasta su análisis.

Finalmente, para valorar el ácido nítrico (determinación del factor de concentración, f), para esto se pesó $0,2000 \pm 0,0001$ g de carbonato de sodio seco, los cuales se disolvieron en 50 mL de agua destilada en un matraz Erlenmeyer de 100 mL, añadiendo 5 gotas de indicador naranja de metilo. Luego, se usó esta base para valorar una disolución de ácido nítrico 1 mol/L utilizando una bureta graduada, agregando el ácido lentamente hasta observar un cambio de color de naranja a rosado, registrando el volumen consumido de ácido hasta final de la valoración. Finalmente se calcula el factor de corrección con la siguiente ecuación:

$$f = \frac{2 * m * 1000}{105,989 * C * v} \quad \text{Ecuación 13}$$

Donde:

m = Masa del carbonato de sodio (g).

105,989 = Masa molecular del carbonato de sodio (g/mol).

C = Concentración del ácido nítrico (1 mol/L)

v = Volumen del ácido usado (mL).

Pérdida de masa de las probetas de pastas en condiciones controladas a 120 horas y extremas a 61 días

Según lo descrito por Marcillo et al., (2021); Rodríguez., (2018); Pérez, (2015) para evaluar la pérdida de masa en condiciones controladas, se sumergieron tres probetas prismáticas curadas durante 28 días ($10 \times 10 \times 60$ mm) en ácido nítrico (1 mol/L), manteniendo un pH constante de $2,00 \pm 0,10$ mediante dosificación controlada. Se preparó la disolución en un vaso de precipitación de 500 mL con 200 mL de agua destilada, y se introdujo la barra de agitación magnética. Luego de calibrar el pH-metro, se registró los valores de pH inicial y masa, antes de conectar el dosificador. Durante el ensayo, que duró 120 horas, se monitorearon los volúmenes de ácido añadidos y la pérdida de masa de las probetas en intervalos determinados. Finalmente, se realizó una medición de pH y masa final, permitiendo analizar la resistencia química de las muestras en un ambiente ácido controlado (Mehta & Monteiro, 2014).

Para evaluar la pérdida de masa en condiciones extremas se evaluó la resistencia química de tres probetas cúbicas ($5 \times 5 \times 5$ cm) curadas por 28 días, exponiéndolas a ácido nítrico (1 mol/L). Se preparó la disolución ácida, midiendo su pH inicial, y se colocaron las probetas en un recipiente hermético sobre una parrilla, asegurando el contacto total con la solución antes de añadir el ácido. Durante el ensayo, se monitoreó y ajustó el pH, reemplazando la solución cuando superaba el valor de 2,50 unidades de pH. Además, las probetas fueron extraídas periódicamente para registrar su masa residual, evaluando la degradación del material. El ensayo concluyó tras 61 días o cuando la masa residual alcanzó aproximadamente el 50% de la inicial.

Microscopia electrónica de barrido SEM y óptica

El análisis SEM se llevó a cabo en tres etapas utilizando muestras de GPP+SF. La primera etapa se realizó en una probeta que completó 28 días de curado; la segunda, en un espécimen que fue sometido al ensayo de pérdida de masa en ambiente controlado y analizado 24 horas después de ser expuesto al ácido; y la tercera, en otro espécimen que ya había concluido el mismo ensayo de pérdida de masa. Previo a la ejecución del ensayo, las muestras, con dimensiones de $5 \times 5 \times 2$ mm, fueron preparadas mediante un recubridor por pulverización catódica. Este proceso tuvo como objetivo convertir las muestras en conductoras, permitiendo así su correcta observación y análisis en el microscopio electrónico de barrido (SEM).

Mientras que, para la microscopia óptica se capturó imágenes de alta calidad de las muestras expuestas al ataque con ácido. La nitidez y claridad de las imágenes fue posible gracias a la tecnología apocromática del equipo, la cual minimiza las aberraciones cromáticas y mejora la resolución. Se examinaron ambos tipos de muestras, tanto en su superficie como en su sección transversal, utilizando aumentos de 10x, 20x, 30x y 40x, lo que permitió una observación detallada de las características morfológicas y estructurales.

3.4. Resultados

3.4.1. Dosificación del GPP+SF (Hasta encontrar la mezcla óptima)

La Tabla 38 muestra la composición de mezclas geopoliméricas considerando distintos porcentajes de reemplazo de PP por SF (2.5%, 5.0%, 7.5% y 10.0%) y dos concentraciones de hidróxido de sodio (NaOH) (8M y 12M) para evaluar el efecto de la alcalinidad. La presencia de SF disminuye la cantidad de conglomerante en la mezcla, lo que influyó en la densidad y distribución de partículas. La relación activador/material cementante se mantiene constante en 0.35, asegurando uniformidad en la fluidez y trabajabilidad. De igual manera la proporción de solución activadora $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ se mantiene en 2.5, garantizando una activación geopolimérica estandarizada. También el peso del agua permanece fijo en 1565 kg

controlando que la hidratación del material sea una constante dentro de la elaboración de las pastas de geopolímero.

Tabla 38. Relaciones de los materiales usados en la dosificación de las muestras

% de reemplazo SF	Concentración de NaOH	Na ₂ SiO ₃ / NaOH	Solución Alcalina/ Conglomerante	Solución Alcalina	Conglomerante (kg)	Polvo de PP (kg)	SF (kg)	Na ₂ SiO ₃ (kg)	NaOH (kg)
2.5%	8 M	2.5	0.35	1.369	3.912	3.814	0.098	0.978	0.391
2.5%	12 M	2.5	0.35	1.369	3.912	3.814	0.098	0.978	0.391
5.0%	8 M	2.5	0.35	1.369	3.912	3.716	0.196	0.978	0.391
5.0%	12 M	2.5	0.35	1.369	3.912	3.716	0.196	0.978	0.391
7.5%	8 M	2.5	0.35	1.369	3.912	3.618	0.293	0.978	0.391
7.5%	12 M	2.5	0.35	1.369	3.912	3.618	0.293	0.978	0.391
10.0%	8 M	2.5	0.35	1.369	3.912	3.520	0.391	0.978	0.391
10.0%	12 M	2.5	0.35	1.369	3.912	3.520	0.391	0.978	0.391

3.4.2. Resistencia a la compresión vs tiempo

Las Tabla 39 presentan la evolución de la resistencia a la compresión en función del tiempo, considerando concentraciones de 8M y 12M de NaOH, evaluando cinco mezclas con distintos porcentajes de SF (SF): 0%, 2.5%, 5%, 7.5% y 10% lo que permite evaluar la variabilidad de los resultados.

Tabla 39. Resistencia a la compresión vs tiempo: concentración de NaOH = 8M.

Edad de ensayo (días)	Resistencia a la compresión (MPa)				
	0% SF	2.5% SF	5% SF	7.5% SF	10% SF
7	5.5	6.0	6.0	6.5	8.0
14	5.8	6.5	7.0	8.0	10
21	6.0	6.8	7.5	9.0	11
28	6.3	7.0	8.0	10	12

En la Tabla 40 se muestra que los 7 días, las mezclas alcanzan mayores resistencias a mayor contenido de SF mejorando el desarrollo temprano de resistencia. Esta tendencia se mantiene a 28 días, donde los valores llegan a 6.3, 7.0, 8.0, 10.0 y 12.0 MPa respectivamente para los porcentajes de SF, confirmando que el SF incrementa significativamente la resistencia final (Zhang, P., 2021). La mejora es mayor entre 7.5% y 10% de SF, donde se observa un incremento aproximado de 2 MPa, lo que indica un rango adecuado de dosificación para maximizar el desempeño mecánico (Siddique & Klaus, 2009). Estos hallazgos concuerdan con estudios previos que atribuyen el efecto del SF a la densificación de la matriz por reacción puzolánica y efecto filler, que reducen la porosidad y mejoran la interfaz pasta-agregado (Scrivener et al., 2018).

Tabla 40. Resistencia a la compresión vs tiempo: concentración de NaOH = 12M.

Edad de ensayo (Días)	Resistencia a la compresión (Mpa)				
	0% SF	2.5% SF	5% SF	7.5% SF	10% SF
7	6,5	7,0	7,5	8,0	10
14	7,0	7,5	8,0	9,0	11
21	7,3	8,0	8,5	10	12
28	7,5	8,5	9,0	11	13

A una mayor concentración de NaOH, estas resistencias se incrementan significativamente a los 28 días, alcanzando 7,5; 8,5; 9; 11 y 13 MPa para las mismas dosificaciones. Esto evidencia que el SF mejora notablemente las propiedades mecánicas; por ejemplo, la adición de un 10% de SF resulta en una resistencia a los 28 días un 58% mayor (13.00 MPa vs 7,5 MPa) en comparación con la mezcla de control (0% SF).

3.4.3. Resistencia a la flexión vs tiempo

En las Tabla 41 se muestra la evolución de la resistencia a la flexión (σ) en función del tiempo para distintas mezclas que incorporan diferentes porcentajes de SF para evaluar su variabilidad, utilizando concentraciones de activador alcalino de 8M y 12M, .

Tabla 41. Resistencia a la flexión vs tiempo: concentración de NaOH = 8M.

Edad de ensayo (Días)	Resistencia a la flexión (MPa)				
	0% SF	2.5% SF	5% SF	7.5% SF	10% SF
7	1.5	2.5	2.8	3.0	3.5
14	2.0	3.0	3.3	3.5	4.0
21	2.5	3.3	3.5	4.0	4.3
28	3.3	3.8	4.0	4.3	4.5

Los resultados de la Tabla 42 muestran un incremento progresivo en la resistencia a flexión con el tiempo de curado, alcanzando su máximo desempeño a los 28 días. La adición de humo de sílice (SF) potencia significativamente este comportamiento, observándose que las muestras con 10% SF logran 4.5 MPa (28 días), superando en un 36% a las que no contienen SF (3.3 MPa). Este efecto se debe a que el SF reduce la porosidad mediante su reactividad puzolánica Siddique & Klaus, (2009); así como también a la sinergia de sílice existente acelerando la formación de una matriz más homogénea y resistente (Mehta & Monteiro, 2014; Scrivener et al., 2018)

Tabla 42. Resistencia a la flexión vs tiempo: concentración de NaOH = 12M.

Edad de ensayo (Días)	Resistencia a la flexión (MPa)				
	0% SF	2.5% SF	5% SF	7.5% SF	10% SF
7	2.0	2.5	3.0	3.3	4.0
14	2.5	3.0	3.5	3.8	4.3
21	3.0	3.5	3.8	4.0	4.5
28	4.0	4.0	4.3	4.5	4.8

En la Tabla 42 se evidencia que a mayor presencia de concentración molar la resistencia se incrementa. la adición de humo de sílice (SF) mejora significativamente la resistencia mecánica, con valores que van desde 4.0 MPa (0% SF) hasta 4.75 MPa (10% SF) a los 28 días.

Los resultados con ambas concentraciones destacan lo beneficioso del humo de sílice (SF) en la mejora de la resistencia a la flexión del hormigón. La adición de SF conduce a una microestructura más densa y una mayor formación de geles, lo que se traduce en una mayor resistencia (Lothenbach et al., 2007)

3.4.5. Densidad del GPP+SF

En la Ilustración 32 se muestra la relación entre la densidad media de las probetas en función del porcentaje de humo de sílice (SF) y la molaridad del activador alcalino. Se observa un ligero incremento en la densidad con el aumento del contenido de SF y la molaridad, evidenciado por las tendencias exponencial y lineal de las densidades aparente y promedio, respectivamente. Sin embargo, este aumento no es significativo en comparación con la mejora en resistencia mecánica observada en estudios previos.

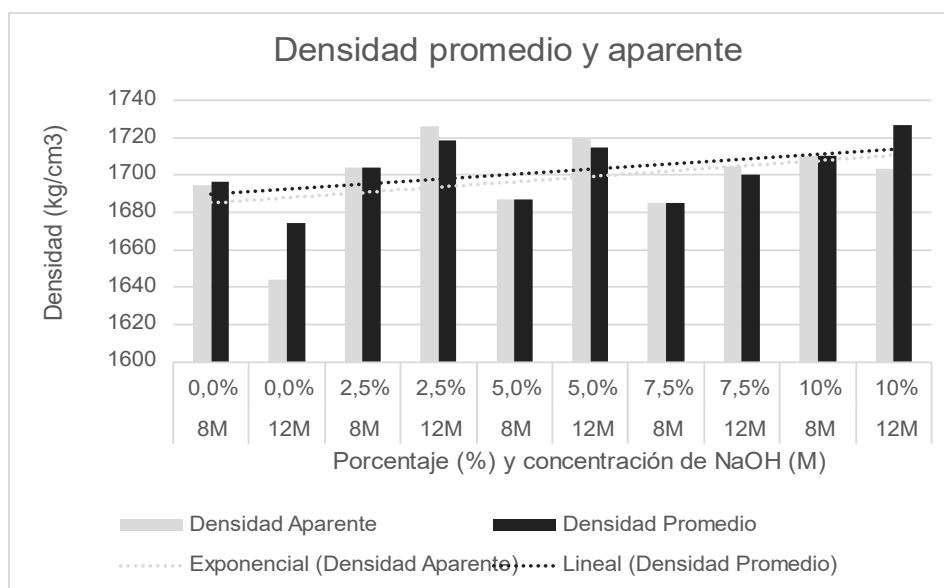


Ilustración 32. Densidad media a concentraciones de 8M y 12M.

Esto nos indica que el refuerzo estructural no está directamente relacionado con la densificación del material, sino con el desarrollo de una microestructura más homogénea y compacta. Según Scrivener et al., (2018) la incorporación de partículas finas altamente reactivas, como el SF, promueve la formación de una matriz de aluminosilicatos más densa y cohesiva, reduciendo la porosidad perjudicial sin un incremento sustancial en la densidad global.

3.4.6. Absorción aparente

En la Ilustración 33 se muestra el porcentaje de absorción del geopolímero a los 28 días, el contenido inicial sin adición de SF-8M (0%) presentó la mayor absorción media con un 33,17%, mientras que al incorporar 2,5% y 5% de SF-8M, este valor disminuyó levemente a 31,69% y 31,66% respectivamente. Sin embargo, a partir del 7,5% de adición, la reducción fue más significativa,

alcanzando 29,88% y 29,83% para 10%, lo cual representa una disminución cercana al 10% respecto al valor inicial. Esta reducción en la absorción puede atribuirse a la alta finura del humo de sílice permite una mejor distribución de partículas dentro de la mezcla, lo que favorece la densificación y reduce la conectividad de los poros (Fernandez&Palomo, 2003).

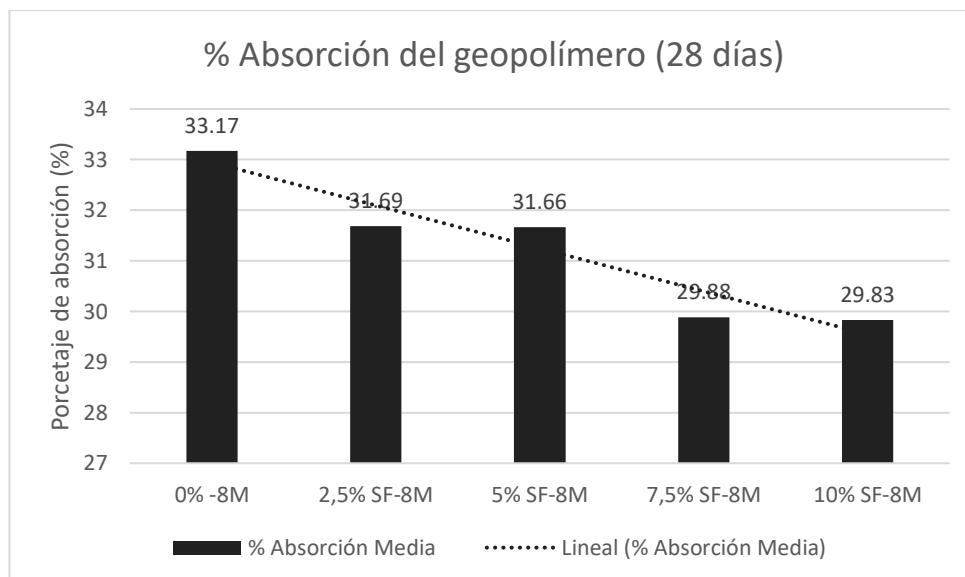


Ilustración 33. Porcentaje de absorción del GPP+SF con 8M de concentración a los 28 días

En la Ilustración 34 se muestra el porcentaje de absorción de agua de un GPP+SF a los 28 días, en función del contenido de SF a 12M. Se observa que la absorción de agua tiende a disminuir ligeramente a medida que aumenta el contenido de SF. La muestra con 0% de SF muestra la mayor absorción promedio (31.34%), mientras que la muestra con 10% de SF muestra la menor absorción promedio (29.06%). Las muestras con 2.5%, 5% y 7.5% de SF muestran absorciones intermedias.

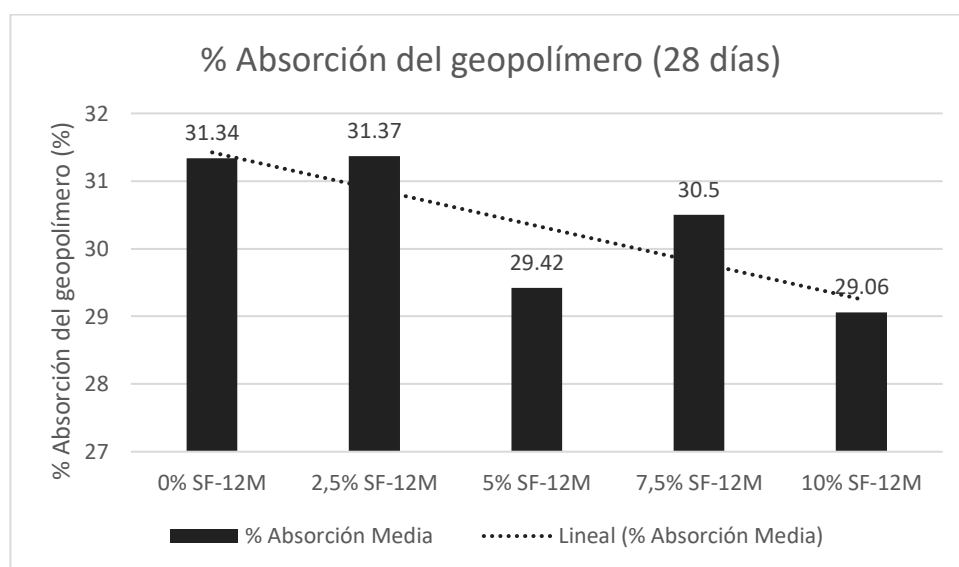


Ilustración 34. Porcentaje de absorción del GPP+SF con 12M de concentración a los 28 días

Con lo descrito anteriormente se define la dosificación que presentó mejores características y que se usará para la elaboración de probetas para el ataque ácido. Se debe considerar que el curado de las probetas fue usando la estufa desde temperatura ambiente, mientras que el curado para la siguiente etapa de la investigación fue con la estufa estabilizada a una temperatura de curado seleccionada, lo que afectó de manera positiva para incrementar su resistencia ya que un curado a temperatura constante favorece una reacción más homogénea y eficiente en la formación de productos de hidratación y polimerización (Temuujin., 2009). Según Zhang et al., (2014), el mantenimiento de una temperatura estable durante el curado de materiales geopoliméricos mejora la reacción de activación alcalina, promoviendo una mejor compactación de la microestructura y reduciendo la porosidad. Adicionalmente, García-Lodeiro, et al., (2015) sostienen que el curado térmico controlado favorece la formación de una matriz más densa y resistente, optimizando la distribución de los productos de reacción y mejorando la adherencia entre partículas.

Preparación de pastas con GPP+SF y CP (Con la mezcla óptima)

Para la ejecución de los ensayos, se fabricaron un total de 49 probetas, divididas en dos grupos: 26 correspondientes a una matriz de piedra pómez y 23 elaboradas con CP, cumpliendo en todos los casos con las especificaciones normativas establecidas.

En relación con los ensayos de resistencia a compresión y flexión, se utilizaron 24 prismas dimensionados a 40x40x160 mm, distribuidos equitativamente entre ambos tipos de materiales (12 por cada matriz). Para evaluar la capacidad de neutralización ácida (ANC), se emplearon 6 probetas prismáticas de 10x10x60 mm, asignadas proporcionalmente a las matrices de piedra pómez y CP.

En el caso de los ensayos relacionados con la pérdida de masa bajo condiciones de acidez controlada, así como para los análisis mediante microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido (SEM), se utilizaron 6 especímenes de 10x10x60 mm y 1 de 50x50x50. De estos, 5 fueron de GPP+SF y 2 de CP, siendo únicamente las muestras de GPP+SF sometidas al análisis por SEM. Por último, para los ensayos que evaluaban la pérdida de masa en condiciones extremas y para los estudios mediante microscopía óptica, se prepararon 6 probetas cúbicas de 50x50x50 mm, distribuidas de manera equitativa entre ambas matrices como se puede observar en la Tabla 43.

Tabla 43. Número de probetas utilizadas por cada ensayo.

Ensayo	Forma	Dimensiones (mm)	No. matrices de CP	No. matrices Piedra Pómez	Total
Compresión	Prisma	40x40x160	6	6	12
Flexión	Prisma	40x40x160	6	6	12
ANC	Prisma	10x10x60	3	3	6
Pérdida de masa controlada	Prisma	10x10x60	3	3	6
Pérdida de masa extrema	Cubo	50x50x50	3	3	6
Microscopía	Cubo	50x50x50	1	1	2
Óptica	Prisma	10x10x60	1	1	2
SEM	Prisma	10x10x60	-	3	3

A partir de la dosificación establecida en el apartado anterior, ahora con una temperatura constante de curado del GPP+SF y el número de probetas requeridas para cada tipo de ensayo, se calculó el volumen total necesario para cada muestra determinando las cantidades requeridas de cada material necesarias para la fabricación de ambos tipos de probetas, las cuales se detallan a continuación en la tabla Tabla 44.

Tabla 44. Cantidad de material utilizado por cada mezcla.

Tipo de muestra	Volumen total (cm³)	Peso total (g)	Agu a (g)	CP (g)	Piedra Pómez (g)	Hidróxido de Sodio (g)	Silicato de Sodio (g)	SF (g)
Matriz de CP	4180	7979	2280	5699	-	-	-	-
Matriz de GPP+SF	4201	9243	2641	-	4401	489	1223	489

Para la matriz de CP como se muestra en la Ilustración 41, siguiendo la norma NTE INEN 488, (2009), el procedimiento para elaborar las probetas comenzó estableciendo una relación agua-CP de 0.40, valor seleccionado en base a estudios previos de Corrales, (2015); Sierpes et al., (2016). En un recipiente, se colocó la cantidad exacta de CP y se agregó gradualmente el agua mientras se realizaba un amasado manual durante 60 segundos después de incorporar toda el agua. Posteriormente, los moldes fueron engrasados con un desencoformado y llenados en dos capas dentro de un tiempo máximo de 2 minutos y 30 segundos, apisonándolo en cada compartimento 32 veces en 4 rondas seguidas, en cada ronda se compactó con 8 golpes en dirección perpendicular. Una vez llenados y compactados, los moldes fueron cubiertos con plástico film para preservar la humedad de la mezcla.

Para el GPP+SF como se muestra en la Tabla 44, se preparó una mezcla con una relación de 0.4 entre el agua y conglomerante; 0.35 de solución alcalina y conglomerante; 2.5 entre silicato de sodio e hidróxido de sodio una concentración de 12M y un % de reemplazo de PP por SF de 10%, según lo definido en los resultados iniciales del capítulo 2. Posteriormente se procedió a engrasar los moldes correspondientes con líquido de desencoformar para poder colocar la pasta ya mezclada, se los llenó dentro de un intervalo de tiempo no mayor de 2 minutos y 30 segundos en dos capas, colocando la primera aproximadamente hasta la mitad de la profundidad del molde y apisonando por la misma cantidad de veces en 4 rondas, sin embargo estas probetas para comenzar con el proceso de endurecimiento, se dejó reposar

en moldes durante 24 horas a temperatura ambiente de $23\pm 1^{\circ}\text{C}$. Después de haber transcurrido las 24 horas, las probetas fueron desmoldadas y sometidas a un proceso de curado de 120 horas, en el cual se introdujo las mismas a un horno con temperatura constante de 60°C cómo se observa en la Ilustración 37.



Ilustración 35. Elaboración de las probetas de CP.



Ilustración 36. Elaboración de las probetas de GPP+SF



Ilustración 37. Curado de las probetas de GPP+SF en el horno.

Se evaluó las propiedades mecánicas de las matrices de activación, con la finalidad de verificar su resistencia a los esfuerzos aplicados, se determinó que la dosificación de los

materiales utilizados en la mezcla fue adecuada y se logró una activación alcalina eficiente. Se realizaron ensayos de resistencia a compresión y flexión en ambos tipos de muestras, siguiendo los lineamientos establecidos en la normativa ecuatoriana (INEN 198, 1987).

3.4.7. Compresión en mpastas de CP y GPP+SF

Se realizó ensayos de compresión a los 7 y 28 días, a continuación, en la Tabla 45 se muestra los resultados estadísticos y en la Ilustración 38 e Ilustración 39 la representación de su media.

Tabla 45. Análisis estadístico de los resultados de la resistencia a compresión a los 7 y 28 días en probetas de CP y GPP+SF

Nombre	Media	Límite Inf.	Límite Sup.	Mediana	Varianza	Desv. Estándar	Mínimo	Máximo	Rango	Asimetría
CP-7días	32.45	29.57	35.33	31.92	1.35	1.16	31.65	33.78	2.13	1.63
GPP+SF-7días	14.63	13.21	16.06	14.84	0.33	0.57	13.98	15.07	1.09	-1.43
CP-28días	52.22	48.77	55.67	51.47	1.93	1.39	51.38	53.82	2.45	1.72
GPP+SF-28días	16.27	13.00	19.55	15.89	1.74	1.32	15.19	17.74	2.55	1.21

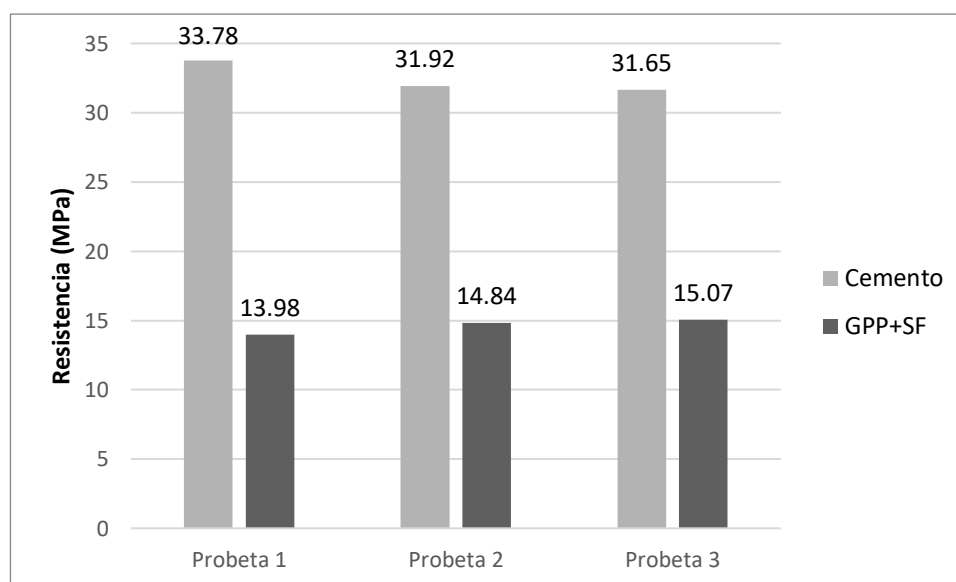


Ilustración 38. Resistencia a compresión a la edad de 7 días en probetas de CP y GPP+SF

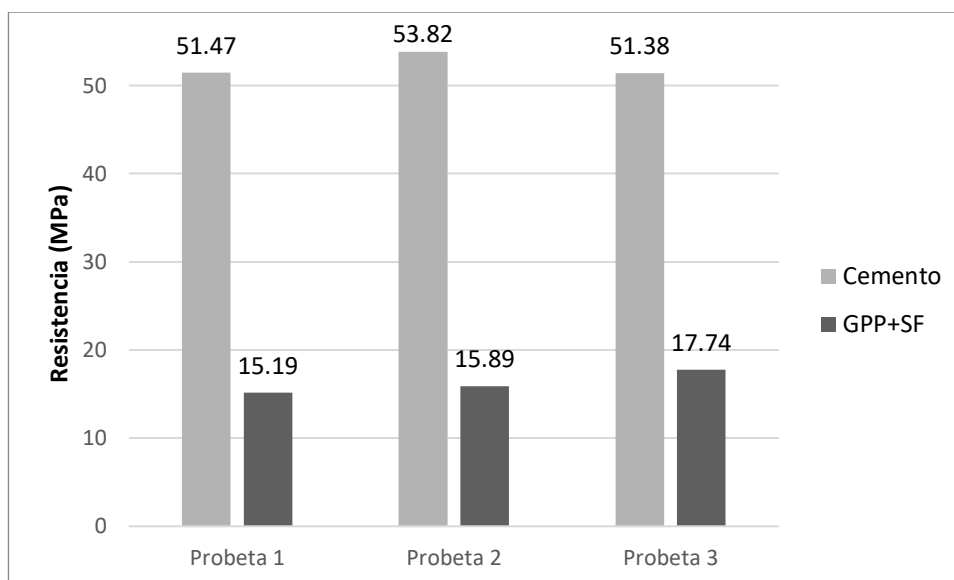


Ilustración 39. Resistencia a compresión a la edad de 28 días en probetas de CP y GPP+SF.

Los resultados muestran la clara diferencia en el desempeño de resistencia entre el cemento y el GPP+SF. A los 7 días, la resistencia media del cemento (32.45 MPa) es mucho mayor que la del GPP+SF (14.633 MPa), lo que indica un desarrollo inicial más rápido en los materiales a base de CP, como lo indican estudios previos (Provis & Van Deventer, 2014). A los 28 días, el cemento alcanza una media de 52.22 MPa, mientras que el GPP+SF llega a 16.27 MPa, por consecuente la hidratación del cemento funciona de mejor manera en el tiempo, coincidiendo con (Shi et al., 2011).

En términos de dispersión, la varianza y desviación estándar son mayores en el CEM-28 días (1.28 y 1.388) en comparación con el CEM-7 días (1.346 y 1.16), lo que implica una mayor dispersión de los datos conforme avanza el tiempo. Para el GPP+SF, la varianza a los 28 días (1.738) es mucho mayor que a los 7 días (0.328), indicando una mayor variabilidad en su comportamiento mecánico.

La asimetría indica diferencias en la distribución de los datos: el cemento presentó valores positivos (1.626 y 1.724), mostrando que la mayoría de los valores son menores a la media con algunos valores atípicos altos, mientras que el GPP+SF a 7 días tiene asimetría negativa (-1.433), lo que indica una distribución sesgada hacia valores altos, pero a los 28 días cambia a positiva (1.207), lo que refleja una mayor heterogeneidad en la activación alcalina (Criado et al., 2020).

Por tal razón el CP es más eficiente en resistencia a la compresión, mientras que el geopolímero muestra mayor variabilidad y menor resistencia mecánica, lo que podría estar relacionado con diferencias en la cinética de reacción y la calidad de la activación alcalina (Davidovits, 2015).

3.4.8. Flexión del CP y GPP+SF

Se realizó ensayos de flexión a los 7 y 28 días, a continuación, en la Tabla 46 se muestra los resultados estadísticos y en la Ilustración 40 e Ilustración 41 la representación de su media.

Tabla 46. Análisis estadístico de los resultados de la resistencia a la flexión a los 7 y 28 días en probetas de CP y GPP+SF

Nombre	Media	Límite Inf.	Límite Sup.	Mediana	Varianza	Desv. Estándar	Mínimo	Máximo	Rango	Asimetría
CEM-7días	6.60	5.81	7.39	6.58	0.10	0.32	6.29	6.93	0.63	1.23
GPP+SF-7días	3.91	3.28	4.54	3.89	0.06	0.25	3.67	4.17	0.50	1.23
CEM-28días	8.22	6.30	10.14	8.22	0.60	0.77	7.45	8.99	1.55	0.00
GPP+SF-28días	5.81	4.94	6.67	5.99	0.12	0.35	5.40	6.03	0.00	-1.71

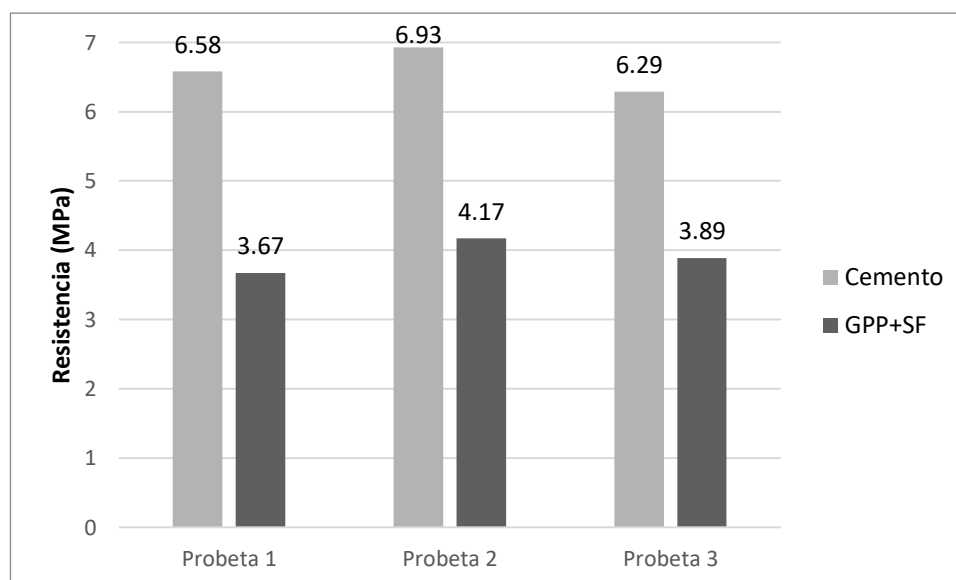


Ilustración 40. Resistencia a flexión a la edad de 7 días en probetas de CP y GPP+SF.

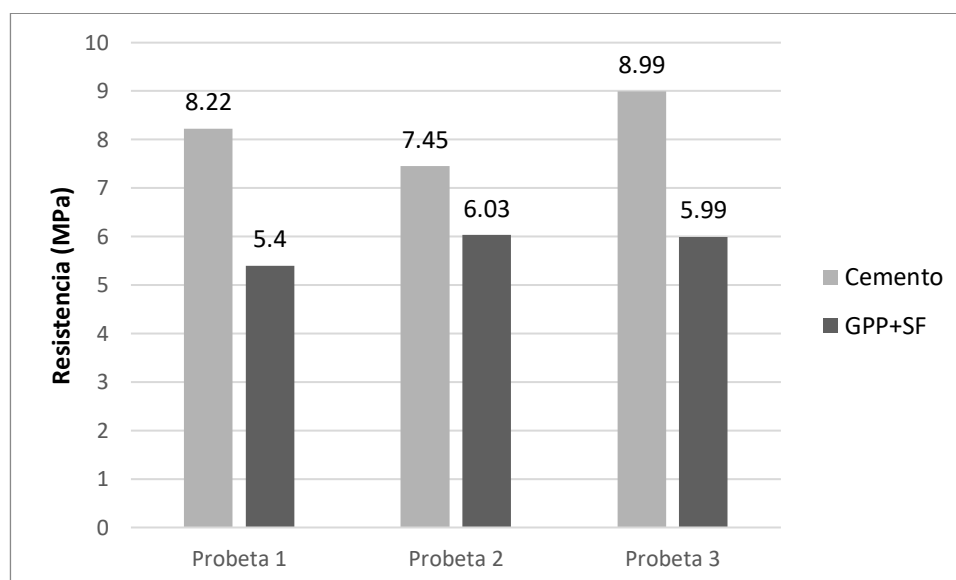


Ilustración 41. Resistencia a flexión a la edad de 28 días en probetas de CP y geopolímero de piedra pómez.

El análisis de los datos revela diferencias significativas entre las muestras de CP y el GPP+SF en términos de resistencia y variabilidad. A los 7 días, el CP presenta una media de 6.60 MPa y una desviación estándar de 0.318, lo que indica dispersión en los valores obtenidos. Mientras que el GPP+SF muestra una menor resistencia inicial de 3.91 MPa y menor variabilidad con una desviación estándar de 0.252, mostrando un comportamiento más uniforme en su desarrollo de resistencia temprana. A los 28 días, ambas muestras aumentan su resistencia, siendo más notable en el CP de 8.22 MPa, que presenta una varianza considerablemente mayor (0.60), lo que refleja una mayor heterogeneidad en su comportamiento mecánico. Por otro lado, el GPP+SF presenta una resistencia de 5.81 MPa mantiene una menor variabilidad con su varianza de 0.12; lo que indica que su desarrollo de resistencia es más estable. La asimetría negativa en ambas muestras a los 28 indica que los valores más altos son más frecuentes, con pocos valores extremos hacia la baja resistencia.

Estos resultados son coherentes con estudios previos que indican que los geopolímeros activados alcalinamente presentan un desarrollo de resistencia más lento pero uniforme en comparación con el CP, que experimenta una mayor ganancia inicial de resistencia debido a la hidratación de los silicatos cálcicos (Payá et al., 2022; J. Provis & van Deventer, 2014). Sin embargo, la estabilidad química y menor variabilidad en los GPP+SF podría hacerlos más adecuados para aplicaciones donde la uniformidad estructural es crítica (Duxson, Fernández-Jiménez, Provis, Lukey, Palomo, & Van Deventer, 2007). Aunque el cemento muestra una resistencia mayor, su mayor dispersión en los datos podría indicar una mayor susceptibilidad a variaciones en el curado y en la composición de la mezcla (Kockal et al., 2018; Shi et al., 2011)

3.4.9. Capacidad de neutralización ácida (ANC)

Se realizó una valoración ácido-base utilizando ácido nítrico 1 mol/L para determinar la cantidad necesaria para neutralizar $0,2000 \pm 0,0001$ g de carbonato de sodio disuelto en 50 mL de agua destilada, con naranja de metilo como indicador. El cambio de color de amarillo-naranja a rosado indicó el punto final de la reacción, registrándose el volumen de ácido consumido como se muestra en la Ilustración 42.

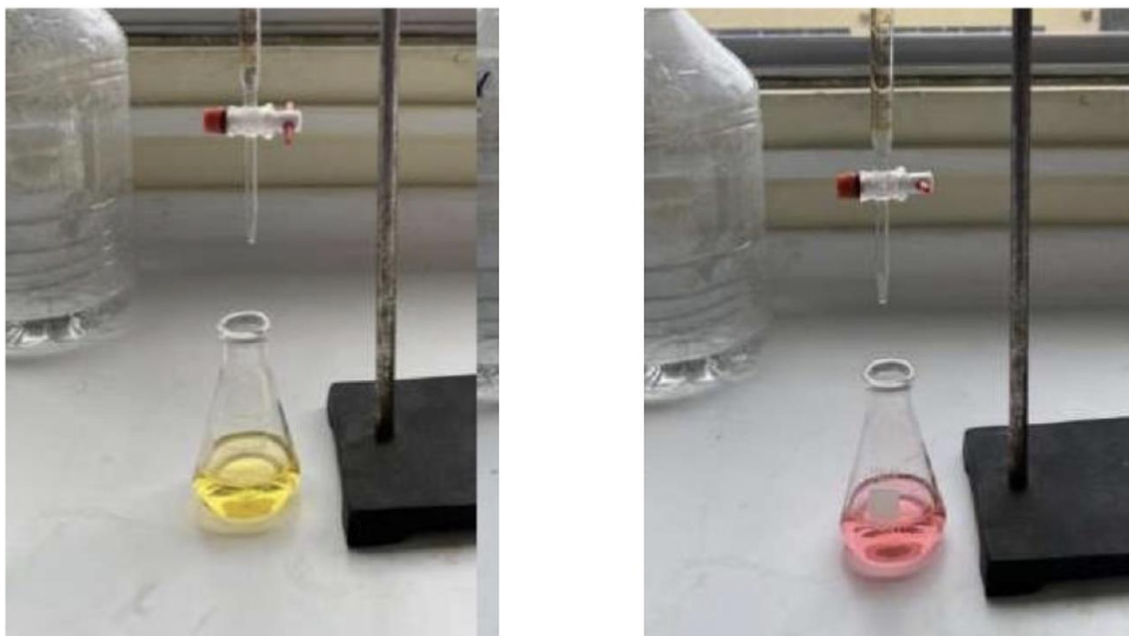


Ilustración 42. Valoración del ácido nítrico antes y después del cambio de color del indicador.

Con los obtenidos se procedió a calcular el factor de corrección a través de la Tabla 47 como se observa el resumen de los datos.

Tabla 47. Factor de corrección ANC

FACTOR DE CORRECCIÓN ANC		
Masa del carbonato de sodio	0.2	g
Masa molecular del carbonato de sodio	105.989	g/mol
Concentración del ácido nítrico	1	mol/l
Volumen del ácido usado	3.6	ml
FACTOR DE CORRECCIÓN	1.048	(-)

ANC con valores de pH combinados 2,4 y 7

De acuerdo con la norma EA NENE 7371, (2005) y las recomendaciones de (Marcillo et al., 2021; Pérez, M., 2015), se llevó a cabo el ANC para evaluar la resistencia de muestras de CP y GPP+SF frente a agentes químicos agresivos. Este procedimiento consistió en determinar la cantidad de ácido nítrico necesaria para estabilizar el pH en muestras pulverizadas de ambos materiales. La capacidad de neutralización ácida es un indicador clave de la resistencia de los materiales a la degradación química. Para garantizar la precisión de los resultados, se realizaron tres repeticiones por tipo de muestra, sumando un total de seis ensayos. Antes de exponer las muestras al ácido, se midió el pH inicial para clasificarlas como alcalinas, neutras o ácidas, lo que permitió predecir su comportamiento frente a la agresión química. Los valores iniciales de pH se presentan en la Tabla 48.

Tabla 48. Valores de pH inicial de las muestras antes del ensayo ANC de pH combinado.

Material	Número de Muestra	Tiempo de curado	pH inicial
Cemento	1	1 día	11.6
	2	7 días	11.3
	3	28 días	11.4
GPP+SF	1	1 día	10.6
	2	7 días	10.6
	3	28 días	10.5

Los valores iniciales de pH en el cemento se mantuvieron elevados, oscilando entre 11.3 y 11.6, lo cual es característico del CP. Este comportamiento se debió a la presencia de hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), que se genera durante la hidratación de los silicatos de calcio, tal como se describe en estudios previos (Taylor, 1997)

En contraste, la mezcla GPP+SF presentó un pH ligeramente menor, indicando un consumo progresivo de los compuestos de hidróxido y silicato de sodio durante la reacción. Este proceso favorece la formación de geles NASH (sodio-aluminio-silicato-hidratado), responsables de la cohesión y resistencia del material.

En la Tabla 49 se presentan los resultados obtenidos en el ensayo de ANC de pH combinado con su respectivo análisis, consiguiendo un promedio de la cantidad de ion H^+ añadido por cada gramo de material para los tres valores de pH.

Tabla 49. Resultados ANC de pH combinado para valores de pH de 7, 4 y 2.

pH	Muestra ANC	(mmol H^+ /g)	Media (mmol H^+ /g)	Desviación estándar
pH 7	CEM	7,862	7,618	0,264
		7,338		
		7,653		
	GPP+SF	0,629	0,594	0,061
		0,629		
		0,524		
pH 4	CEM	11,007	10,937	0,121
		11,007		
		10,798		
	GPP+SF	0,943	0,943	0
		0,943		
		0,943		
pH 2	CEM	14,257	14,083	0,16
		13,943		
		14,048		
	GPP+SF	1,468	1,433	0,061
		1,468		
		1,363		

El análisis de los datos muestra una diferencia significativa de la ANC entre el CP (CEM) y la mezcla de GPP+SF a diferentes niveles de pH. En pH 7, el CP muestra una media de 7.618 mmol H^+ /g con una desviación estándar de 0.264, lo que indica una mayor capacidad de neutralización en comparación con GPP+SF, cuya media es 0.594 mmol H^+ /g con una desviación estándar de 0.061, reflejando menor variabilidad en los datos. Esto significa que, al consumir más ácido por parte de CP, la capacidad es mayor pero a la vez la reacción de neutralización estará disolviendo fundamentalmente hidróxido cálcico y carbonato cálcico,

además de algunos geles cementantes de tipo CSH: Por el contrario, el que el consumo de ácido de GPP+SF sea bajo, nos sugiere que los geles tipo NASH son más resistentes y estables frente al ácido a este valor de pH.

A pH 4, la tendencia se mantiene, con el CP registrando una media de 10.937 mmol H⁺/g y una baja desviación estándar de 0.121, mientras que GPP+SF mantiene un valor constante de 0.943 mmol H⁺/g, sin variabilidad entre las mediciones. A pH 2, el CP alcanza su máxima capacidad de neutralización con una media de 14.083 mmol H⁺/g, mientras que GPP+SF presenta una media considerablemente menor (1.433 mmol H⁺/g) con una desviación estándar de 0.061.

Estos resultados sugieren que el CP tiene una mayor capacidad de neutralizar un ácido en comparación con el GPP+SF, lo que está en concordancia con estudios previos que destacan la importancia del contenido de hidróxido de calcio (Ca(OH)₂) en la neutralización de agentes ácidos (Mehta & Monteiro, 2014; Taylor, 1997). Sin embargo, también nos indica que los geles cementantes del sistema GPP+SF pueden ser más estables y que no se pierda la capacidad resistente desde el punto de vista mecánico (Mehta & Monteiro, 2014; Taylor, 1997)

En la Ilustración 43 se representa la cantidad de iones H⁺ que se han agregado a la solución con las 3 muestras de cemento. Ver Anexo 4

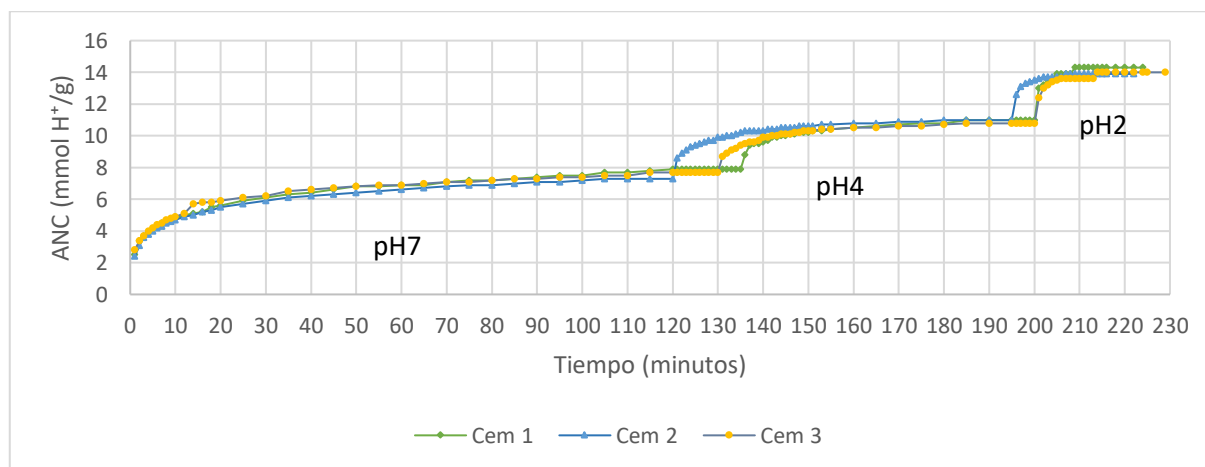


Ilustración 43. ANC de pH combinado (2-4-7) en muestras de CP.

El aumento de la ANC con el tiempo se debió a la disolución gradual de los compuestos alcalinos en el CP, como el hidróxido de calcio (Ca(OH)₂), que neutralizaron el ácido (Taylor, 1997). La mayor pendiente en las curvas de ANC a pH 4 y pH 2 indica que la reacción de neutralización se llevó a cabo de manera más acelerada en estos rangos de acidez. Este comportamiento se da por una mayor presencia de compuestos alcalinos capaces de reaccionar con los protones en solución, lo que facilita una respuesta química más eficiente (Chen et al., 2019)

Además, la uniformidad en los resultados obtenidos para las muestras de CP demuestra la reproducibilidad y confiabilidad del proceso de neutralización ácida, respaldando así su aplicabilidad en estudios de estabilización de residuos y en la mejora del desempeño de materiales cementantes (Argent et al., 2020)

La Ilustración 44 revela cómo la composición del precursor, específicamente la relación Si/Al y el contenido de calcio, en conjunto con el tipo y la concentración del activador alcalino, inciden directamente en la formación de la red polimérica N-A-S-H y en la cantidad de álcali residual en el material final. Estos factores son determinantes para establecer la reserva alcalina del geopolímero, un parámetro crucial que afecta su durabilidad a largo plazo y su resistencia a fenómenos de degradación (Duxson et al., 2007; Mehta & Monteiro, 2014). La presenta la ANC entre ambos materiales evaluados, proporcionando una medida de su capacidad para resistir ataques ácidos en el tiempo.

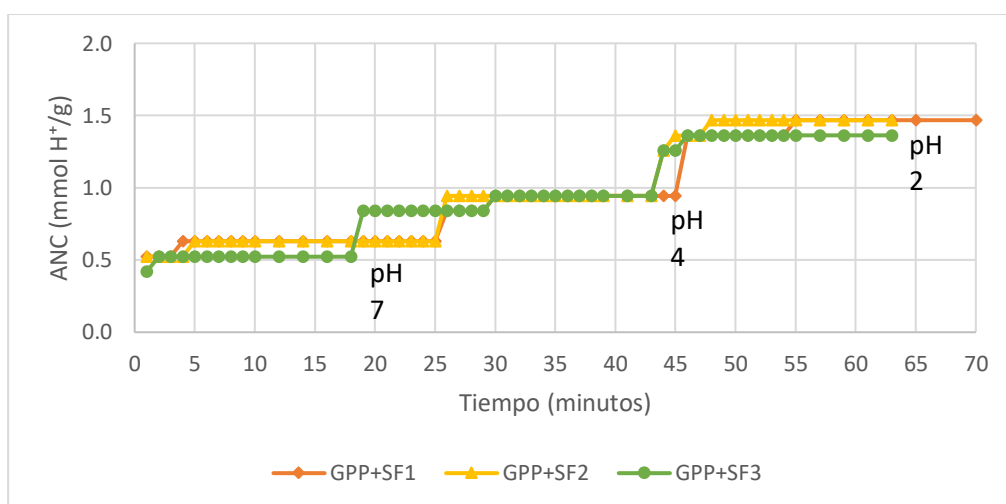


Ilustración 44. ANC de pH combinado (2-4-7) en muestras de GPP+SF

Se observa en la ilustración anterior que la composición del precursor, incluyendo la relación Si/Al y el bajo contenido de calcio, en conjunto con el tipo y la concentración del activador alcalino, influyen directamente en la formación de la red N-A-S-H y en la cantidad de álcali residual. Estos parámetros son cruciales para definir la reserva alcalina del material (Duxson, Fernández-Jiménez, Provis, Lukey, Palomo, & van Deventer, 2007; P. Mehta & Monteiro, 2014). La Ilustración 45 presenta la ANC entre ambos materiales evaluados, proporcionando una medida de su capacidad para resistir ataques ácidos en el tiempo.

Finalmente se muestra en la Ilustración 45 la media de ANC entre ambos materiales.

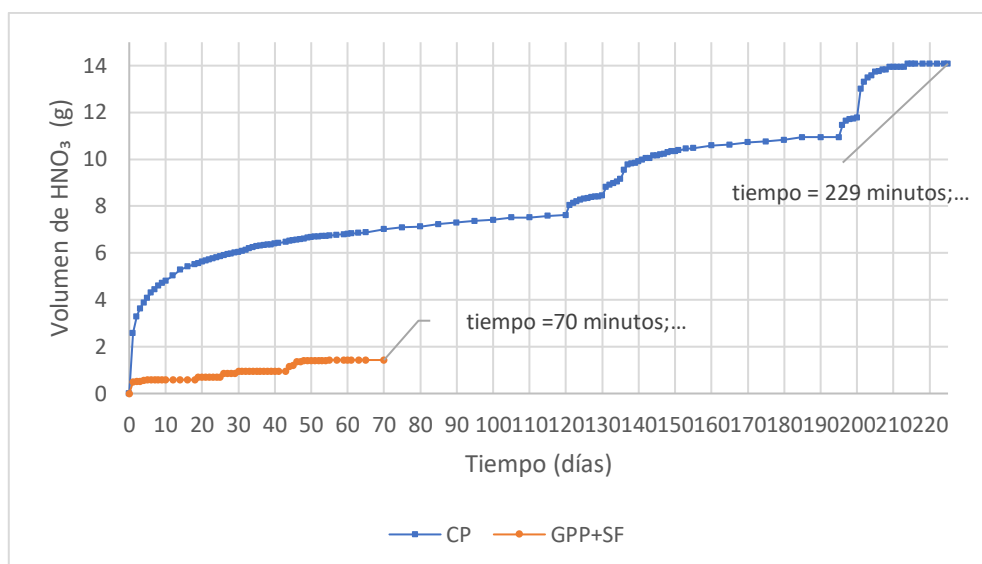


Ilustración 45. ANC de pH combinado (2-4-7) en matrices de CP y GPP+SF.

El CP mostró una mayor demanda de reactivo y un tiempo de reacción prolongado, con un promedio de 229 minutos y una adición de 14.08 mmol H^+ /g. En contraste, el GPP+SF tuvo un comportamiento más eficiente, con un tiempo de neutralización de solo 70 minutos y un consumo de 1.43 mmol H^+ /g, lo que equivalió aproximadamente al 30.57% del tiempo y al 14.14% de los iones requeridos por el CP. Esto debido por las diferencias en la composición química y el mecanismo de reacción de cada material, ya que el CP contenía un alto contenido de hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) y CSH, que reaccionó progresivamente con el ácido, los GPP+SF poseían una menor concentración de compuestos altamente alcalinos y una mayor estabilidad de los geles cementantes (basados en sodio, y no en calcio como ocurre con CP), lo que redujo su capacidad de retener y reaccionar con iones H^+ (Duxson et al., 2007). Estudios previos han demostrado que los geopolímeros presentaron una mayor resistencia química en medios ácidos debido a su baja solubilidad y a la formación de geles (Payá et al., 2022; Provis & Van Deventer, 2014)

Pérdida de masa de las probetas en un entorno controlado

En la Ilustración 46, Ilustración 47 e Ilustración 48 se presenta la pérdida de masa porcentual de las probetas de CP comparada con el volumen de ácido que se añadió a lo largo de 120 horas. La tabla de datos se encuentra en el Anexo 5

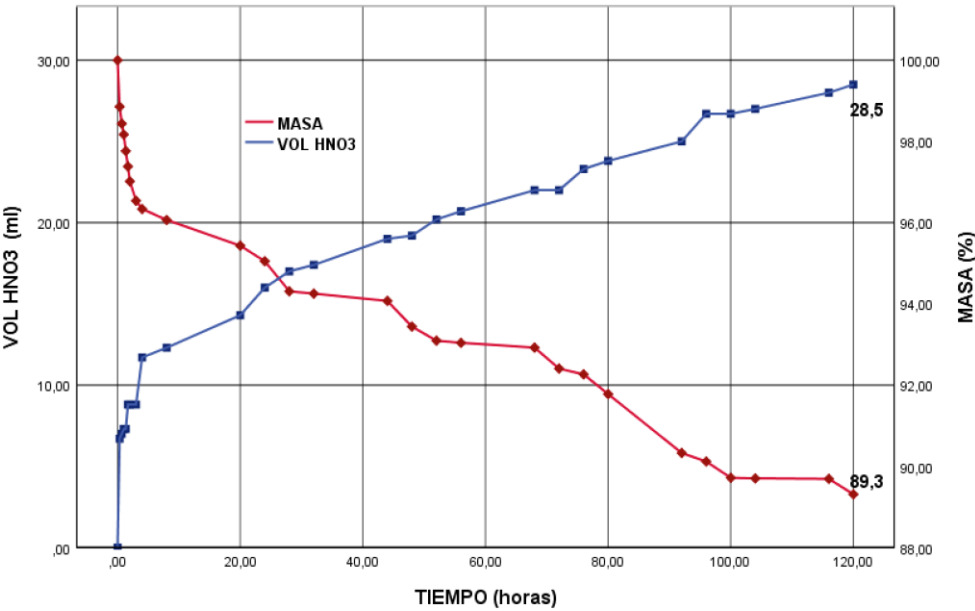


Ilustración 46. Ácido añadido y masa residual vs tiempo en probeta de CP 1.

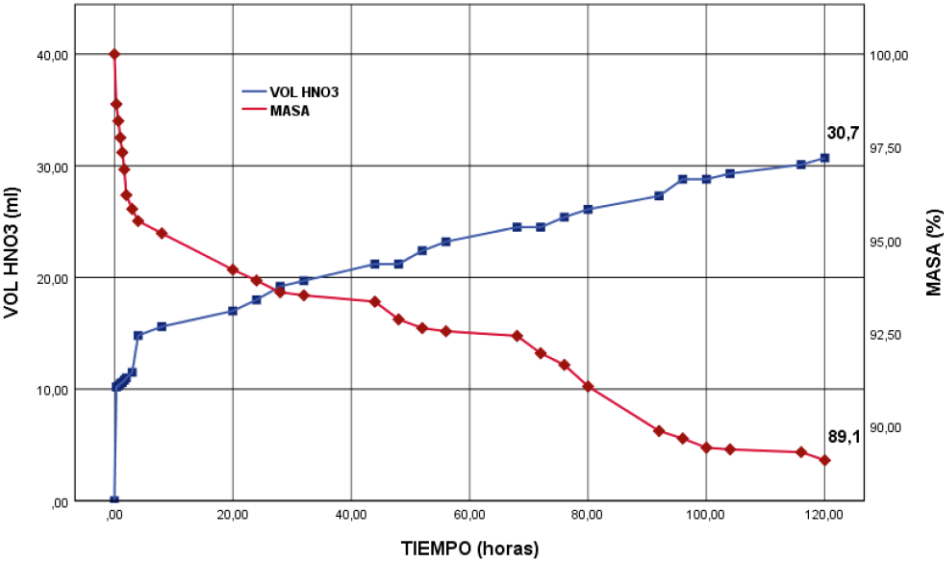


Ilustración 47. Ácido añadido y masa residual vs tiempo en probeta de CP 2.

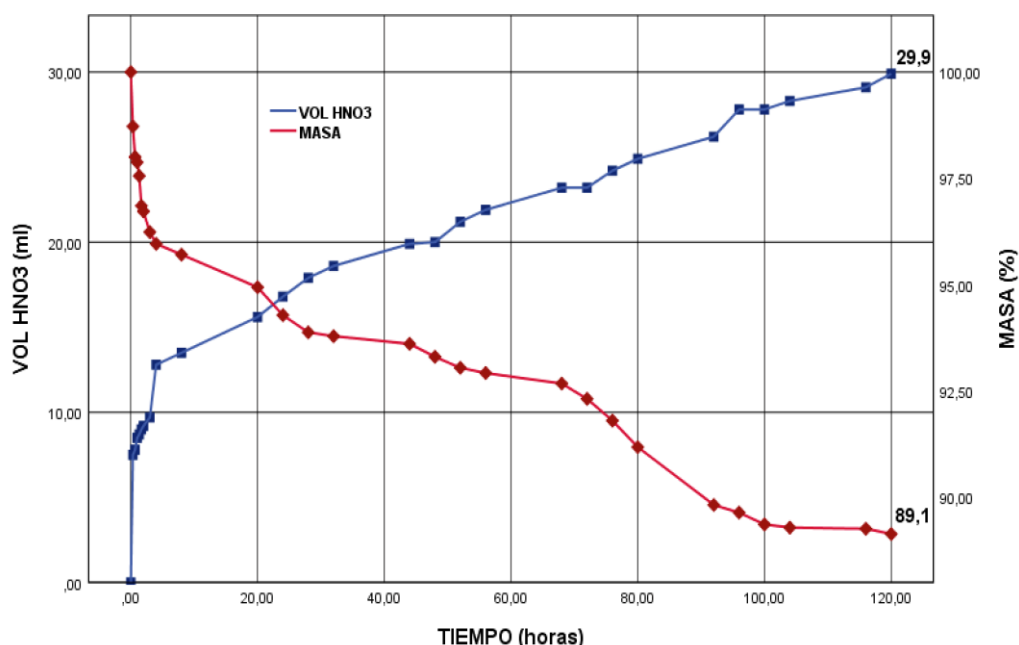


Ilustración 48. Ácido añadido y masa residual vs tiempo en probeta de CP 3.

En las tres probetas se observa una relación inversa entre el volumen de HNO_3 agregado y la masa del material a lo largo del tiempo. Inicialmente, la pérdida de masa ocurre de manera acelerada, lo que sugiere una intensa reacción química con el ácido. Sin embargo, a medida que avanza el ensayo, la disminución de masa se ralentiza, lo que indica una posible reducción en la velocidad de disolución. Al final de cada periodo de evaluación, la masa remanente representa aproximadamente el 89.3% del valor inicial a las 24 horas (con un consumo de 28.5 ml de HNO_3), el 89.1% a los 7 días (30.7 ml de HNO_3) y el 89.1% a los 28 días (29.9 ml de HNO_3). Esta tendencia sugiere que el proceso de degradación está influenciado por la resistencia química del material, lo que coincide con estudios previos sobre la estabilidad de geopolímeros y cementos en medios ácidos (Pérez, 2015; Martín 2018; Marcillo et al. (2021). La disminución en la velocidad de pérdida de masa en geopolímeros sometidos a ataque ácido se debe a que, conforme avanza la disolución de la matriz, se genera una capa externa degradada o parcialmente disuelta. Esta capa actúa como una barrera difusiva, de modo que el ácido debe penetrar a través de los canales porosos formados por la disolución previa para alcanzar y reaccionar con las zonas internas aún intactas del geopolímero. Este proceso de difusión limita la velocidad de deterioro, ya que el transporte del ácido hacia el interior se vuelve progresivamente más lento. Este comportamiento es típico en mecanismos de ataque desde el exterior, como ocurre con agentes agresivos comunes (cloruros, sulfatos, ácidos), y es particularmente relevante en geopolímeros debido a su estructura porosa y su distinta resistencia química en comparación con los cementos Portland tradicionales, un fenómeno característico en materiales cementantes alternativos con alta resistencia química. (Marcillo et al., 2021; Martín Rodríguez, 2018 ; Pérez, 2015)

En la Ilustración 49, Ilustración 50 e Ilustración 51 se presenta la pérdida de masa porcentual de las probetas de GPP+SF comparada con el volumen de ácido que se añadió a lo largo del tiempo en horas. La tabla de datos se encuentra en el Anexo 5.

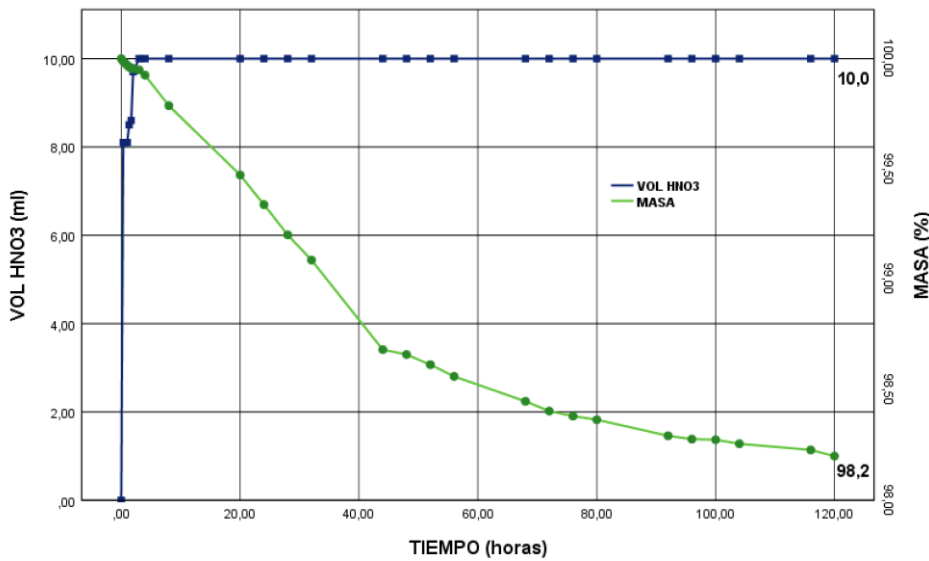


Ilustración 49. Ácido añadido y masa residual vs tiempo en probeta de GPP+SF 1.

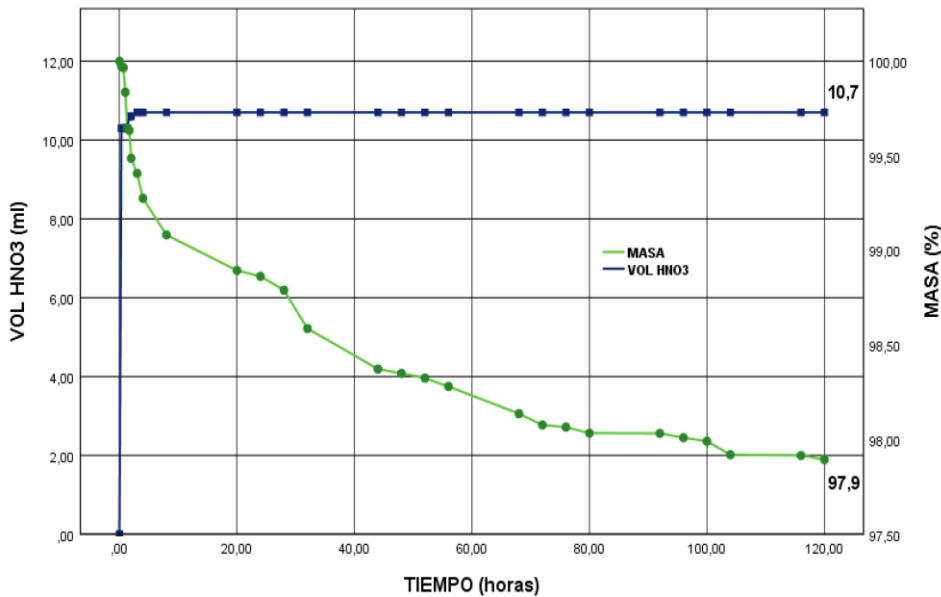


Ilustración 50. Ácido añadido y masa residual vs tiempo en probeta de GPP+SF 2.

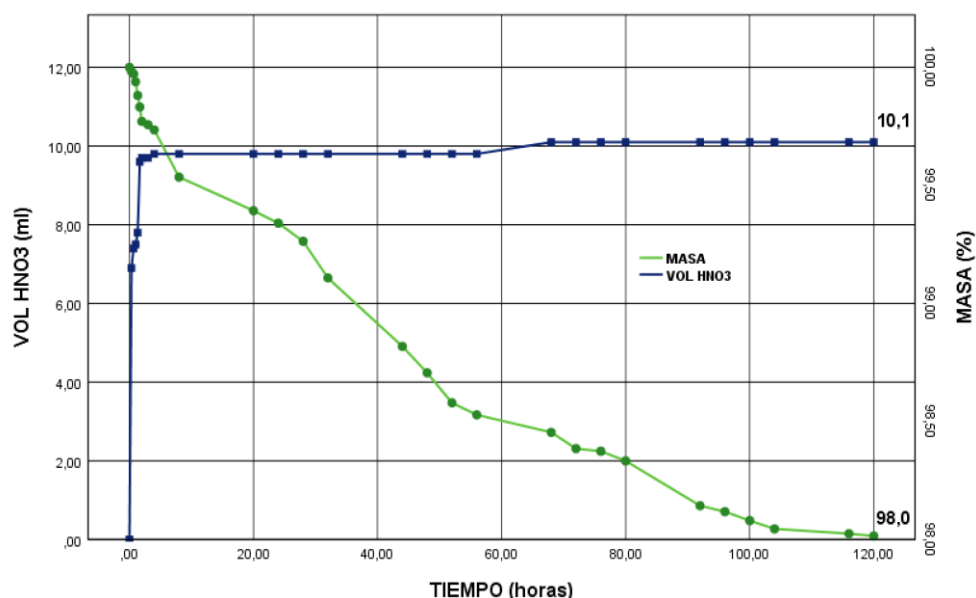


Ilustración 51. Ácido añadido y masa residual vs tiempo en probeta de GPP+SF 3.

Las gráficas anteriores muestran la evolución de la masa del material y el volumen de HNO_3 agregado a lo largo del tiempo, evidenciando una relación inversa entre ambas variables. Inicialmente, se observó una disminución abrupta de la masa, debido a una reacción química rápida con el ácido nítrico en las primeras horas del ensayo. Sin embargo, a medida que avanzó el tiempo, la tasa de pérdida de masa se redujo considerablemente, estabilizándose en torno a una media del 98% del valor inicial después de 120 horas. Por otro lado, el volumen de HNO_3 consumido se incrementó súbitamente, manteniéndose casi constante a partir de unas pocas horas, hasta alcanzar una media 10,3 ml, indicando un menor requerimiento de ácido en comparación con el cemento. Este comportamiento es característico de materiales con alta resistencia química, donde la formación de productos de reacción, como geles de sílice o capas pasivantes, pudo haber limitado la penetración del ácido y disminuido la velocidad de disolución (Marcillo et al., 2021; M. Pérez, 2015). En comparación con cementos tradicionales o geopolímeros sin modificaciones, la menor pérdida de masa muestra una estructura más estable y duradera en ambientes ácidos del GPP+SF, lo que fue consistente con estudios previos sobre materiales cementantes alternativos diseñados para mejorar la durabilidad frente a la lixiviación ácida (Duxson, Fernández-Jiménez, Provis, Lukey, Palomo, & Van Deventer, 2007; P. Mehta & Monteiro, 2014).

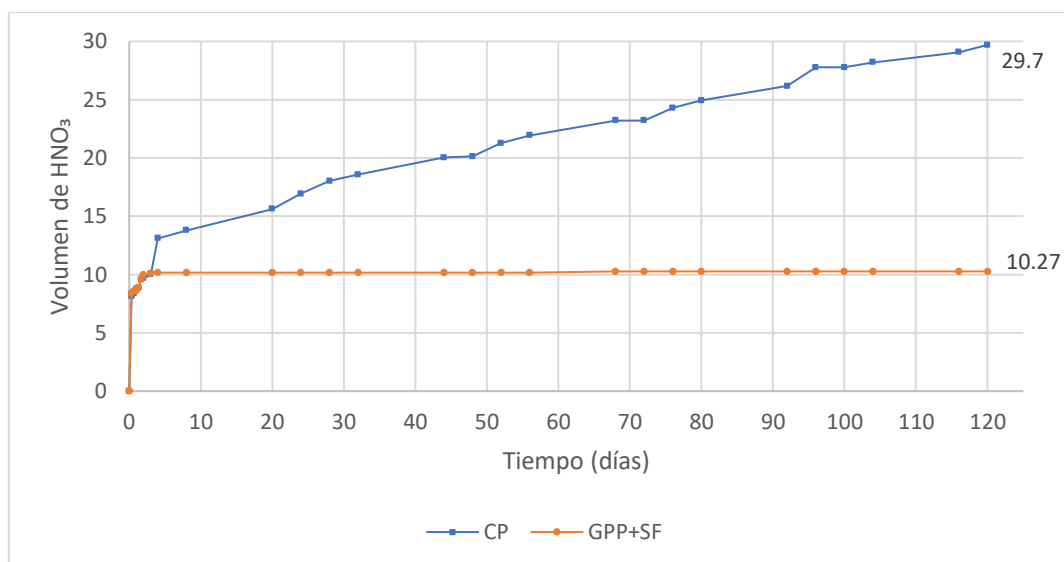


Ilustración 52. Cantidad promedio de ácido añadido frente al tiempo en CP y GPP+SF.

En el gráfico mostrado se observa que, en las primeras tres horas del experimento hasta aproximadamente los primeros 8 ml de HNO_3 añadidos, ambas muestras presentan una aparente inactividad, lo que indica que el ácido nítrico no está atacando directamente los sólidos, sino interactuando con 200ml de agua destilada presente en el medio de reacción (Smith et al., 2020). Al ser ácido fuerte, el HNO_3 se disocia completamente, liberando iones hidronio (H_3O^+) y participando en reacciones de equilibrio, como la formación de iones nitrato (NO_3^-) y la protonación del agua (García & Torres, 2019). Este proceso inicial genera un consumo previo de ácido, en cual no está relacionado con la degradación de las muestras hasta que el sistema se satura con iones H_3O^+ , y de ahí permite el inicio del ataque químico sobre los sólidos (Rodríguez & Pérez, 2021). Si se considera que 8 ml actúan directamente sobre el agua destilada en realidad la cantidad de ácido utilizada para degradar las probetas aproximadamente sería de 21,7ml para el cemento y 2,3ml para el GPP+SF.

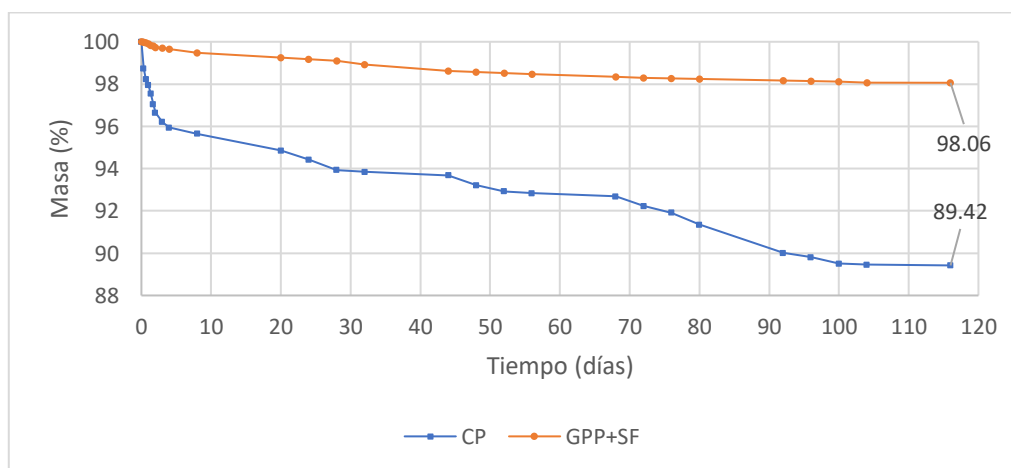


Ilustración 53. Pérdida de masa en probetas de CP vs GPP+SF en el tiempo

En la Ilustración 54 se presentan los valores medios de desgaste de las probetas a lo largo del ensayo, evidenciando una reducción de masa en ambos tipos de material. Sin embargo, las probetas geopoliméricas mostraron una mayor resistencia en comparación con las de CP, las cuales experimentaron un desprendimiento de masa promedio del 10.58%, mientras que las probetas de geopolímero solo perdieron un 1.94%. Esto indica que el CP tiene una menor resistencia frente a ambientes ácidos en condiciones controladas, en contraste con el GPP+SF. Estos resultados coinciden con estudios previos que sugieren que los geopolímeros, especialmente aquellos modificados con SF, presentan una mayor estabilidad química y resistencia a la degradación en medios ácidos en comparación con el Cemento Portland. (Bernal & Provis, 2014; Payá et al., 2022)

Registro fotográfico de probetas prismáticas atacadas en un entorno agresivo controlado.

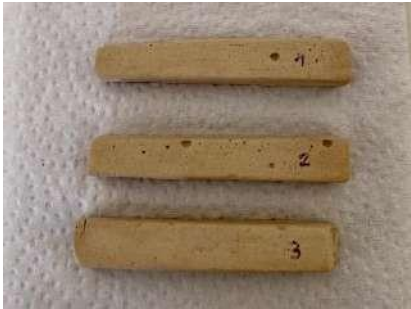
Tiempo de ensayo	CEM	GPP+SF
0 horas		
120 horas		

Ilustración 54. Muestras prismáticas monolíticas de CP y geopolímero GPP+SF después de ensayar 120 horas en ácido nítrico

En la Ilustración 54 se observa que las probetas de cemento experimentaron un cambio de color significativo al finalizar el ensayo, pasando de gris oscuro a crema-rojizo. Este cambio se atribuye a la formación de una capa corroída en las superficies externas, la cual se desprendía con facilidad. Mientras que las probetas geopoliméricas no mostraron variaciones de color notables, mostrando una mayor resistencia a la degradación ácida. Se observó un

leve aumento en la porosidad superficial, lo que indica que existe una ligera alteración estructural sin formación de una capa de deterioro evidente.

Pérdida de masa de las probetas en un entorno extremo

El ensayo evaluó la resistencia de dos matrices cementantes en un ambiente altamente ácido, sumergiendo probetas cúbicas (5x5x5 cm) en una solución de ácido nítrico a 1 mol/L, con un pH controlado por debajo de 2.5. Se realizaron seis pruebas, monitoreando la pérdida de masa, la variación del pH y el tiempo transcurrido durante 61 días o hasta alcanzar el 50% de la masa inicial. Sin embargo, ninguna probeta sufrió tal pérdida, permitiendo completar el ensayo dentro del período previsto. La tabla de datos se encuentra en el Anexo 5.

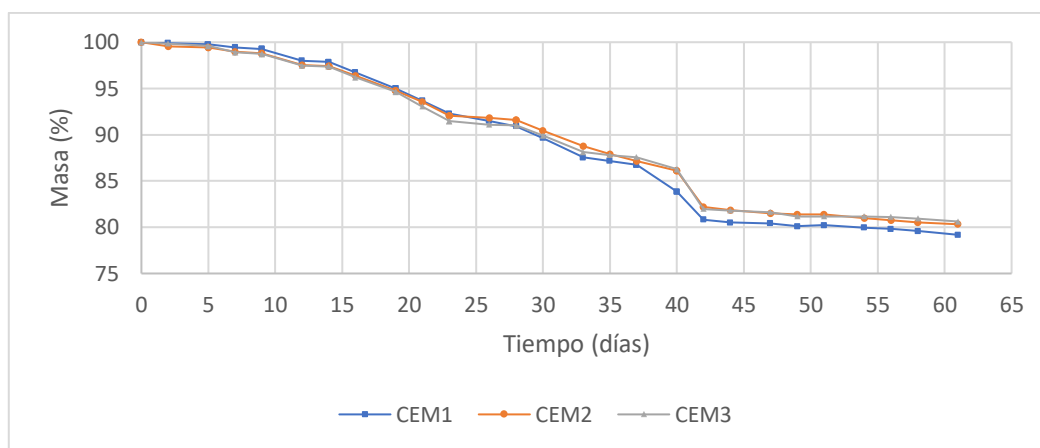


Ilustración 55. Masa residual de probetas de CP atacadas en un entorno agresivo extremo versus tiempo.

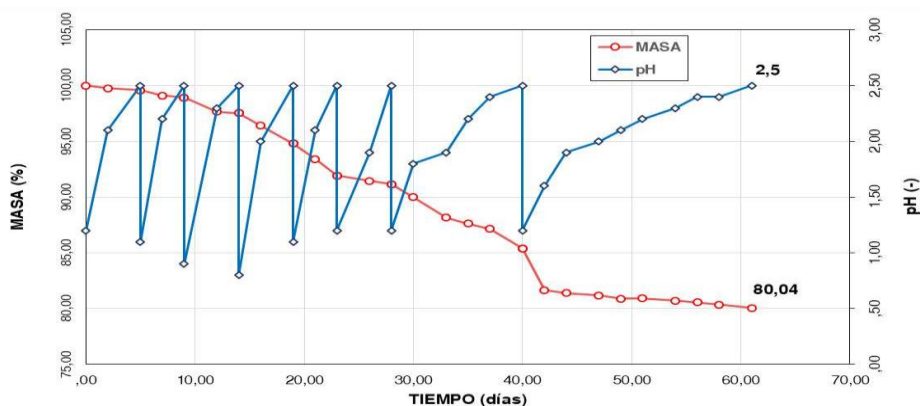


Ilustración 56. Masa residual promedio y variación de pH en probetas de CP atacadas en un entorno agresivo extremo frente al tiempo.

En la Ilustración 55 se observa una tendencia general de degradación progresiva en las tres probetas, con una disminución inicial moderada de la masa y una aceleración del proceso alrededor del día 15. Posteriormente, las curvas tienden a estabilizarse, indicando que la lixiviación o disolución de los componentes más solubles se redujo. Estos resultados coinciden con estudios sobre la resistencia de materiales cementicios en medios ácidos (Pérez, 2015; Marcillo et al. (2021)). La degradación del CP en estas condiciones suele estar relacionada con

la disolución del hidróxido de calcio (Ca(OH)_2) y la descomposición de los geles de silicato de calcio hidratado (C-S-H), lo que afecta la integridad estructural del material. La estabilización de la pérdida de masa en las fases finales podría atribuirse a la formación de productos secundarios más resistentes, como sílice amorfa o compuestos de aluminosilicatos según (Martín 2018).

La Ilustración 56 muestra la correlación entre la masa y el pH. Cada vez que se realizó un cambio de ácido nítrico, las muestras sufrían daños medibles, reflejados en la gráfica mediante una mayor disminución de la masa residual cuando el pH se reiniciaba. Además, se observó una desviación en la medición del pH tras cada renovación del ácido, atribuida a la preparación fraccionada de la solución en volúmenes individuales en lugar de una preparación homogénea. En los últimos 21 días, sin renovación del ácido, la pérdida de masa siguió una pendiente constante, lo que indica una estabilización del proceso de degradación. Finalmente, tras 61 días, se alcanzó una pérdida de masa promedio del 19.96%.

A continuación, se muestra la pérdida de masa porcentual de las probetas de GPP+SF comparada con el volumen de ácido que se añadió a lo largo de 61 días, mientras que en la Ilustración 57 se observa la masa residual promedio y variación de pH en el tiempo. La tabla de datos se encuentra en el Anexo 5.

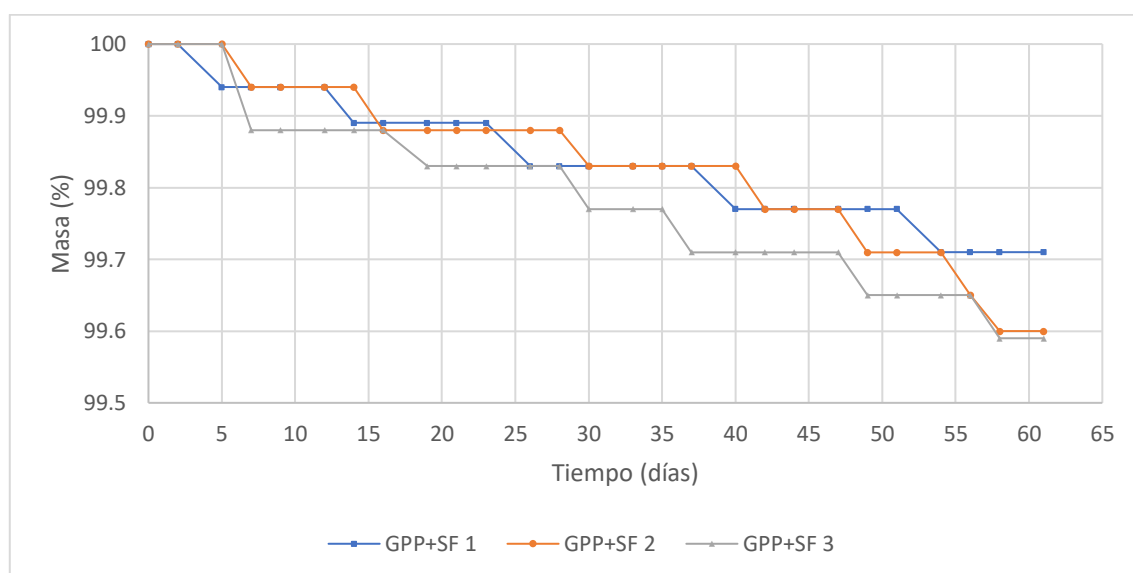


Ilustración 57. Masa residual de probetas de GPP+SF en un entorno agresivo extremo versus tiempo

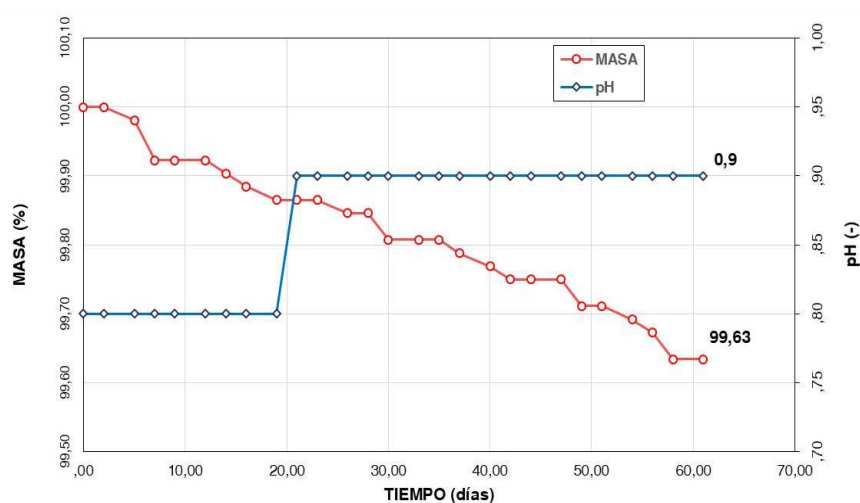


Ilustración 58. Masa residual promedio y variación de pH en probetas de GPP+SF atacadas en un entorno agresivo extremo frente al tiempo.

En la Ilustración 58 se observa una disminución gradual de la masa en las tres muestras debido a la degradación del material (Marcillo et al., 2021; Martín Rodríguez, 2018). Se observa claramente que el sistema GPP+SF es muy estable y hay una pérdida de masa final de menos de 0.5%. Con ello se corrobora la gran estabilidad de los geles cementantes generados en este geopolímero.

En la Ilustración 58 se ve la estabilidad del pH de la disolución de ácido nítrico, que se mantuvo entre 0.8 y 0.9, evitó la necesidad de renovaciones durante el experimento, ya que no se alcanzó el umbral de 2.5 unidades. A pesar de la alta acidez, la matriz geopolimérica mostró una notable resistencia, con una pérdida de masa promedio de solo el 0.37%. Este comportamiento sugiere que la matriz geopolimérica tiene una alta estabilidad química en ambientes ácidos, posiblemente debido a la formación de una estructura densa y resistente de sílice-aluminato mencionado en los estudios de (Z. Safari et al., 2020b; Weil et al., 2009; Wong, 2022; Zhang et al., 2014). La baja tasa de disolución indica que la velocidad de reacción entre el ácido y la matriz es muy lenta, lo que podría atribuirse a la baja porosidad del material o a la formación de una capa protectora de sílice en la superficie aseverando la investigación de (Rodríguez, 2018).

Con el objetivo de comprender las diferencias en los resultados entre las probetas de los dos tipos de muestra, en la Ilustración 59 se muestra el promedio de la masa residual de ambas en función del tiempo durante el ensayo de pérdida de masa, ya que la comparación de las masas residuales a lo largo del tiempo proporciona información sobre la durabilidad e índice de degradación de cada tipo de muestra.

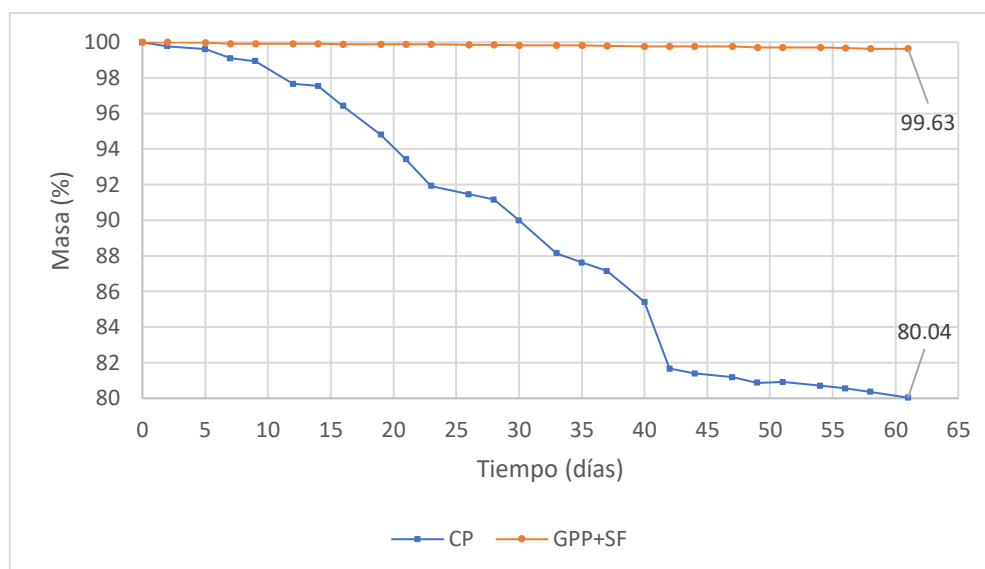


Ilustración 59. Masa residual promedio frente al tiempo para muestras cúbicas monolíticas de CP y geopolímero de piedra pómez GPP+SF

En la Ilustración 59 se evidencia que tanto las probetas de cemento como las de GPP+SF lograron completar el ensayo sin que su masa residual descendiera por debajo del 50%, lo que indica una resistencia significativa frente al ataque ácido coincidiendo en lo mencionado por (Pérez, 2015). Sin embargo, los geopolímeros demostraron una mayor estabilidad química en comparación con el CP, con una diferencia de 19,6% en la masa residual tras 61 días de exposición. Específicamente, las probetas geopoliméricas presentaron una reducción de masa de apenas 1,83% del total perdido por las probetas de cemento. Estos resultados coinciden con estudios previos, donde se ha demostrado que los geopolímeros poseen una mayor resistencia en medios agresivos debido a su estructura amorfa altamente reticulada y a la baja solubilidad de los enlaces Si-O-Al, en contraste con la susceptibilidad del cemento a la lixiviación de sus productos de hidratación, como portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) y C-S-H, en condiciones ácidas.

Registro fotográfico de probetas cúbicas atacadas en un entorno agresivo extremo.

Mezcla	1 día	10 días	40 días	Aspecto final
CEM				

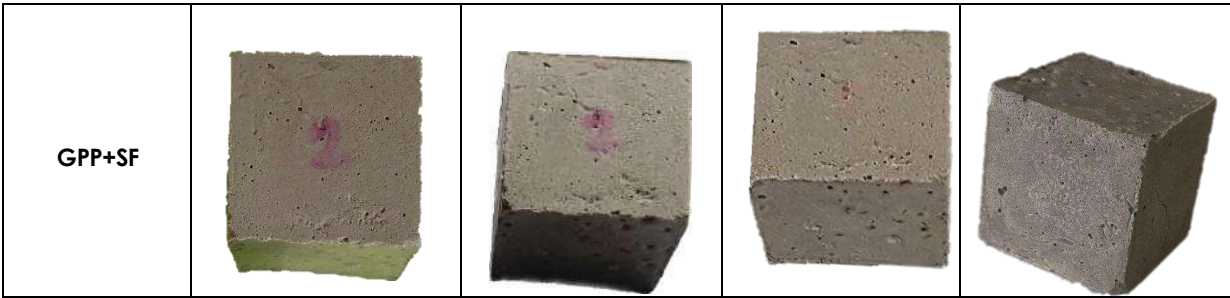
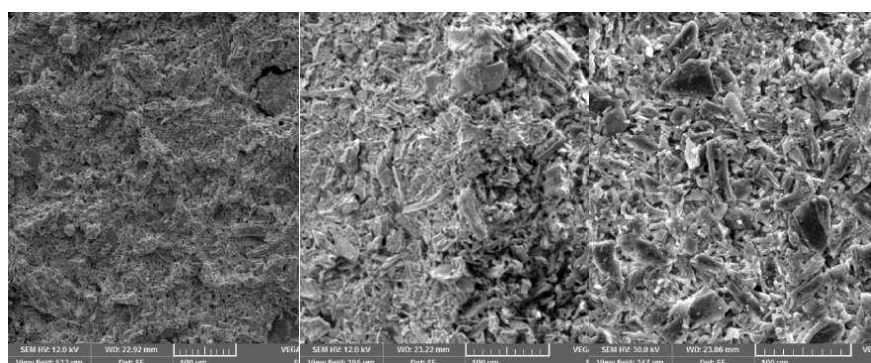


Ilustración 60. Registro fotográfico de la evolución de las probetas sometidas a un ataque ácido extremo.

En la Ilustración 60 se observa que, durante el ensayo, las probetas de cemento exhibieron un desgaste significativamente mayor en comparación con las de geopolímero de piedra pómez, evidenciando una mayor susceptibilidad al ataque ácido. Desde el primer día, las muestras de cemento experimentaron un cambio de tonalidad, pasando de gris a rojizo, mientras que al décimo día se observaron ampollas y pequeños huecos superficiales. Para el día 40, el descascaramiento de la superficie era evidente, con desprendimientos durante la manipulación de las probetas, intensificándose además el color café-rojizo. Al final del ensayo, la probeta de cemento presentaba escamas desprendidas, dejando expuesta una capa interna igualmente corroída y con huecos profundos de distintos tamaños. Mientras que las probetas de GPP+SF no mostraron cambios físicos evidentes, salvo un leve incremento en el tamaño de los poros externos, lo que resultó en una textura ligeramente más rugosa.

Microscopia electrónica de barrido (SEM) al GPP+SF en un entorno ataque ácido controlado

Se analizaron tres probetas prismáticas de GPP + SF en diferentes condiciones para evaluar su respuesta a la agresión con ácido nítrico a lo largo del tiempo. La primera muestra no fue sometida al ataque ácido al momento del análisis. La segunda probeta había sido sometida previamente a un ensayo de pérdida de masa durante 24 horas en un ambiente de agresividad controlada. Finalmente, la tercera muestra fue estudiada tras completar el ensayo. El objetivo de esta investigación fue identificar los cambios en la distribución elemental, la topografía y la morfología de las probetas como resultado de la exposición prolongada al medio ácido.

Morfología y topografía antes y después del ataque ácido controlado

Sin Atacar (260x)

Atacada 24h (350x)

Atacada 120h (400x)

Ilustración 61. Morfología y topografía antes y después del ataque ácido controlado

La **Ilustración 61** evidencia que la muestra geopolimérica de piedra pómez sin exposición al agente agresivo exhibió una microestructura densa con una unión compacta entre partículas, caracterizada por un empaquetamiento uniforme y una baja porosidad. Además, se identificaron partículas de masa que no lograron activarse completamente, lo que concuerda con estudios previos sobre la influencia del proceso de curado en la compactación de geopolímeros (Duxson, Fernández-Jiménez, Provis, Lukey, Palomo, & Van Deventer, 2007; J. Provis & van Deventer, 2014).

Tras 24 horas de exposición al ácido nítrico, se observó un incremento en la porosidad debido a la aparición de aberturas en la estructura del material, aunque aún se distinguieron zonas compactas. Sin embargo, en la muestra sometida a 120 horas de ataque ácido, la degradación fue más evidente, con partículas menos cohesionadas y una mayor presencia de vacíos, lo que favorece la penetración de soluciones agresivas y acelera el proceso de lixiviación de ciertos componentes del geopolímero (Marcillo et al., 2021; Martín Rodríguez, 2018).

A pesar de estos cambios estructurales, se destaca que, en todos los casos, la forma de las partículas del conglomerante no sufrió desprendimientos ni fracturas significativas. Este comportamiento indica que, si bien la porosidad más externa aumentó con el tiempo de exposición, la matriz geopolimérica mantuvo su estabilidad estructural, lo que confirma su potencial como material resistente a ambientes ácidos en comparación con cementos tradicionales (Weil et al., 2009; Zhang et al., 2014)

Composición elemental obtenida de antes y después del ataque ácido controlado del GPP+SF

En la Ilustración 62, Ilustración 63 e Ilustración 64 se muestra la composición elemental en probetas prismáticas de GPP+SF sin atacar con el ácido, atacadas por 24 horas y atacadas por 120 horas.

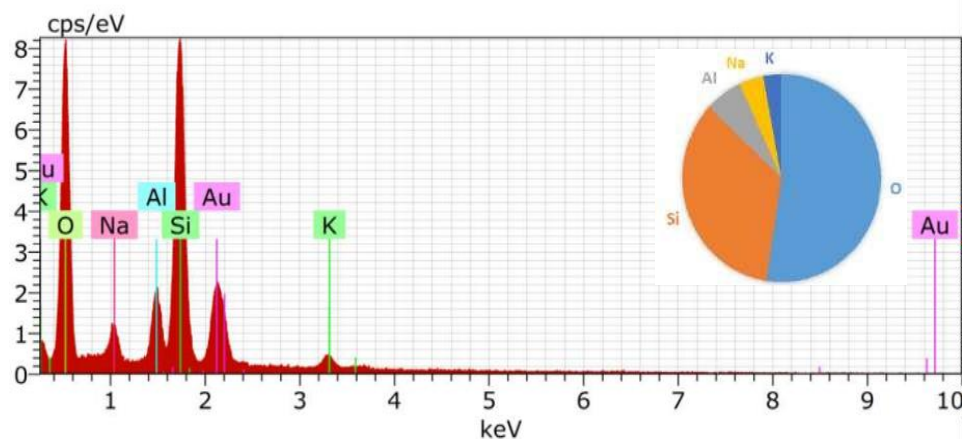


Ilustración 62. Composición elemental en probetas prismáticas de GPP+SF sin recibir ataque ácido.

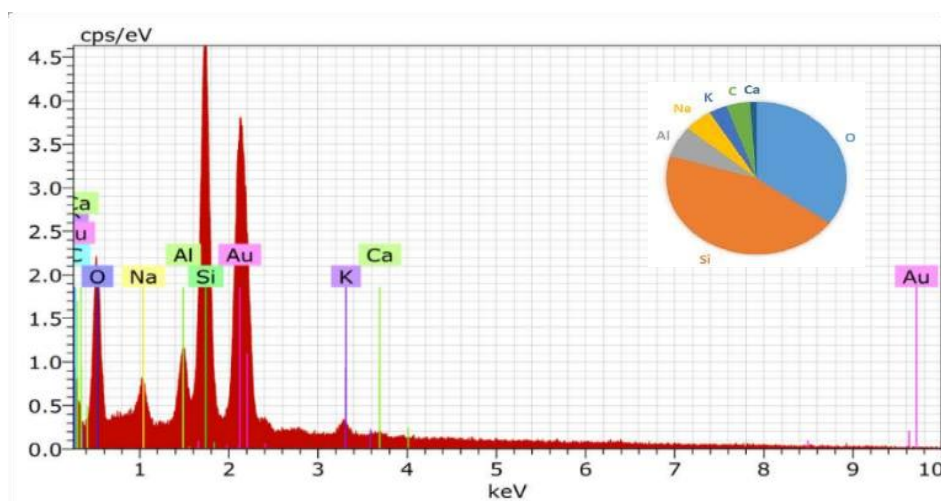


Ilustración 63. Gráfica de la composición elemental en probetas prismáticas de GPP+SF atacadas con ácido por 24 horas.

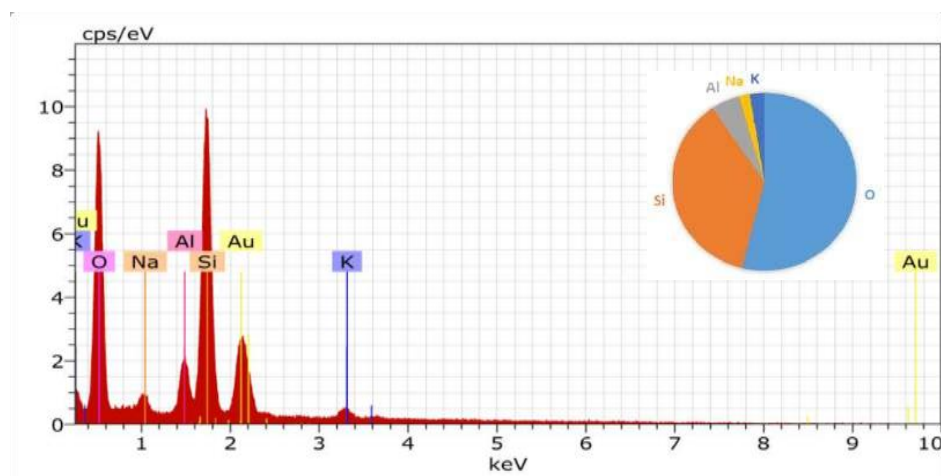


Ilustración 64. Gráfica de la composición elemental en probetas prismáticas de GPP+SF atacadas con ácido por 120 horas.

Con estos resultados se procedió a normalizar los datos de la microscopía para garantizar una comparación consistente entre las muestras. En la Tabla 49 se muestra cómo se excluyó el

oxígeno (O) y el oro (Au), debido a su falta de relevancia en la composición original de la muestra. El oxígeno pudo haber estado presente en la formación de geles o formar parte de la matriz, mientras que el oro se empleó como recubrimiento para mejorar la conductividad en microscopía electrónica de barrido (SEM), sin ser un componente intrínseco de la muestra (Goldstein et al., 2018)

En la Tabla 50 se observa en un inicio la presencia de calcio pero que posteriormente desaparece por su naturaleza lixivable, razón por la cual se seleccionó el silicio (Si), aluminio (Al), sodio (Na) y potasio (K) para dar relevancia en el análisis requerido, ya que proporcionaron información sobre la evolución mineralógica o química de las muestras al interactuar con el ácido nítrico. Esto es particularmente significativo en estudios donde Si y Al son componentes esenciales de minerales (L. Pérez et al., 2022). La normalización y selección de elementos permitieron un análisis más relevante, que se enfocó en los componentes esenciales de la muestra. En la Tabla 51 se muestra los resultados crudos a las muestras, y en la Tabla 51 muestra los resultados ya normalizados.

Tabla 50. Resultados crudos de la composición elemental en probetas prismáticas.

Muestra sin atacar				Muestra atacada 24 horas				Atacadas a 120 Horas			
Elemento	Número atómico	Composición Normal	Error	Elemento	Número atómico	Composición Normal	Error	Elemento	Número atómico	Composición Normal	Error
Au	79,00	51,01%	1,78	O	8,00	41,88%	5,12	O	8,00	42,09%	4,16
Si	14,00	21,86%	0,86	Si	14,00	27,51%	1,20	Si	14,00	28,61%	1,01
O	8,00	17,15%	2,06	Au	79,00	20,22%	0,83	Au	79,00	21,88%	0,72
Al	13,00	3,25%	0,17	Al	13,00	4,83%	0,26	Al	13,00	3,95%	0,18
Na	11,00	2,49%	0,17	Na	11,00	3,14%	0,23	K	19,00	1,98%	0,09
C	6,00	2,09%	0,43	K	19,00	2,42%	0,12	Na	11,00	1,49%	0,11
K	19,00	1,59%	0,09								
Ca	20,00	0,56%	0,05								

Tabla 51. Resultados normalizados de la composición elemental en probetas prismáticas.

Muestra sin atacar			Muestra atacada 24 horas			Atacadas a 120 Horas		
Elemento	Número atómico	Composición Normal	Elemento	Número atómico	Composición Normal	Elemento	Número atómico	Composición Normal
Si	14,00	74,89%	Si	14,00	72,59%	Si	14,00	79,41%
Al	13,00	11,13%	Al	13,00	12,74%	Al	13,00	10,96%
Na	11,00	8,53%	Na	11,00	6,39%	Na	11,00	4,14%
K	19,00	5,45%	K	19,00	8,28%	K	19,00	5,50%

Los datos normalizados se muestran gráficamente en la Ilustración 65, donde se observa que el silicio (Si) fue relativamente más resistente al ataque ácido en comparación con los otros elementos. Por otro lado, el aluminio (Al), el sodio (Na) y el potasio

(K) mostraron una disminución en su porcentaje a medida que aumentaba el tiempo de exposición al ácido, lo que indicó su mayor susceptibilidad a la disolución o lixiviación (Duxson, Fernández-Jiménez, Provis, Lukey, Palomo, & Van Deventer, 2007; J. L. Provis & Van Deventer, 2014).

El aluminio presentó un incremento inicial tras 24 horas de ataque ácido, seguido de una ligera reducción a los 28 días, siguiendo un proceso de disolución parcial y posible reprecipitación en fases secundarias, como aluminosilicatos amorfos (Criado et al., 2020; Rees et al., 2007). Por su parte, el sodio exhibió una disminución progresiva, evidenciando su alta susceptibilidad a la lixiviación en medios ácidos, lo que es consistente con la elevada solubilidad de los iones alcalinos en soluciones ácidas (Payá et al., 2022). El potasio tuvo menores variaciones y una tendencia relativamente estable, lo que evidencia una menor participación en las reacciones de disolución.

Estos resultados fueron coherentes con estudios previos sobre la estabilidad química de geopolímeros y materiales aluminosilicatados en medios agresivos, donde el silicio demostró una mayor resistencia química en comparación con los elementos alcalinos y aluminicos, debido a la fortaleza de los enlaces Si-O en la estructura del material ((Joseph Davidovits, 2015; J. Provis & van Deventer, 2014)

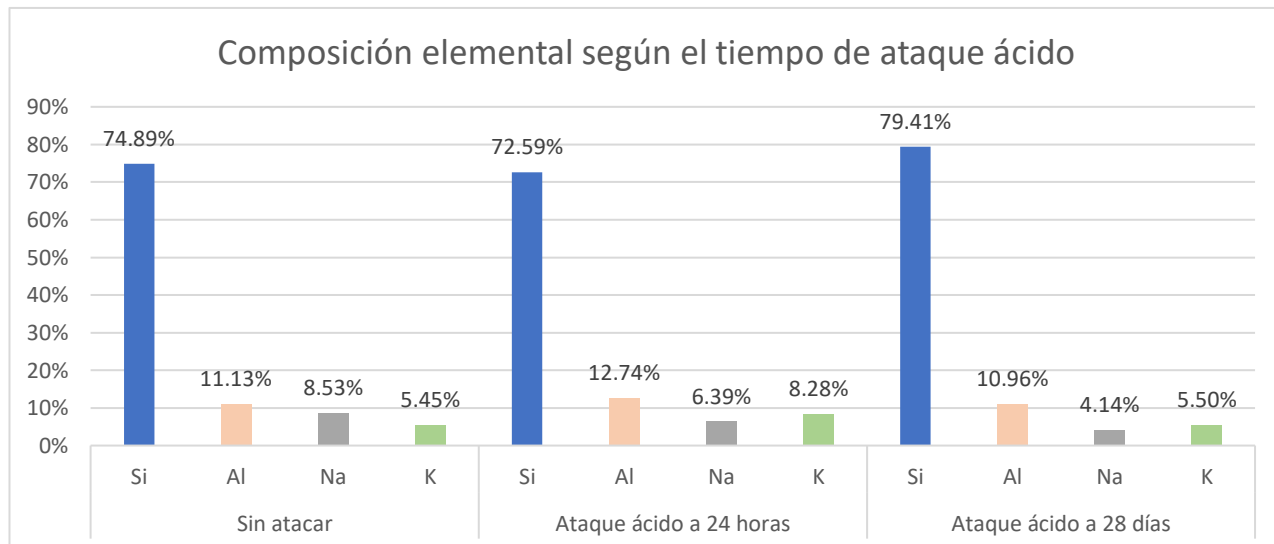


Ilustración 65. Gráfica de la composición elemental según tiempo de ataque ácido.

Microscopía óptica en un entorno controlado y agresivo extremo al CP y GPP+SF

El uso de microscopía óptica reveló alteraciones superficiales e internas, coincidiendo con estudios previos sobre degradación de materiales cementicios (Provis & van Deventer, 2014; Zhang, P., 2021). La aplicación de fenolftaleína permitió visualizar las zonas afectadas por la lixiviación alcalina, corroborando la eficacia de este indicador en la caracterización de la resistencia de CPs y activación alcalina de estos materiales en medios ácidos (Davidovits, 2008)

Probetas prismáticas atacadas en un entorno controlado.

Las probetas expuestas a 120 horas de ensayo de pérdida de masa fueron manipuladas con cuidado para evitar contaminaciones y se fracturaron por impacto, garantizando una superficie de falla uniforme que permitiera un análisis preciso de la degradación interna. Las Ilustración 66 con diferentes niveles de aumento de visualización del microscopio facilitaron la evaluación de la sección transversal y la superficie de las muestras. Para mantener la coherencia en el análisis, se tomó como referencia una esquina de cada probeta, lo que permitió observar de manera uniforme los efectos del ataque ácido.

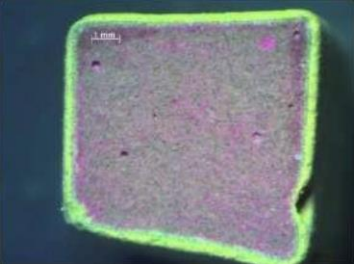
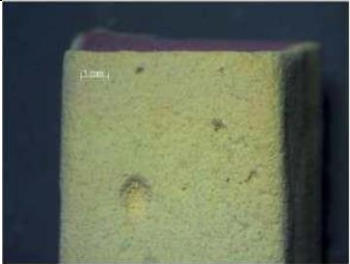
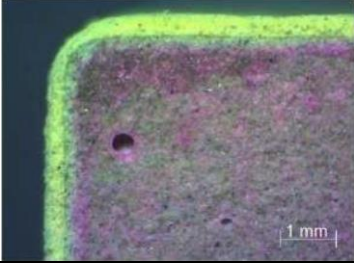
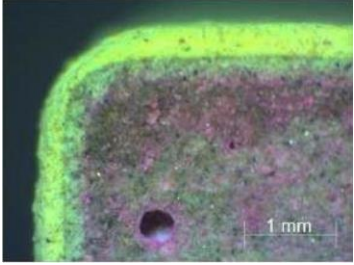
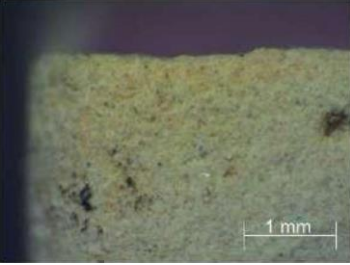
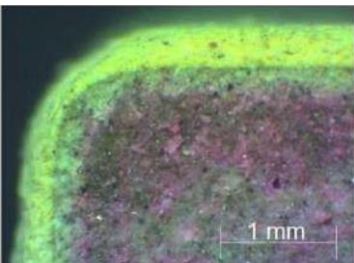
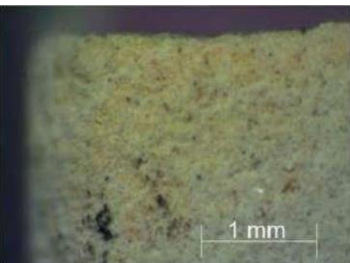
Muestra	o Aument	Sección transversal		Superficie	
CP	10x				
	20x				
	30x				
	40x				

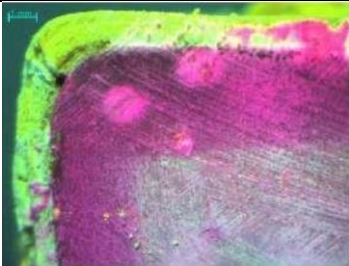
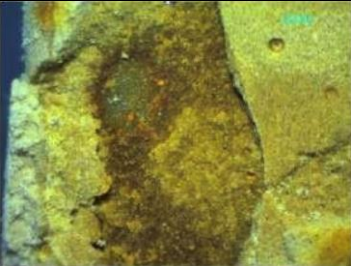
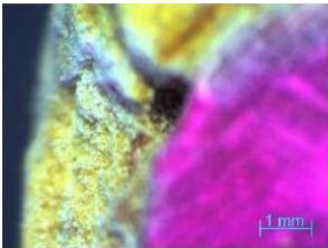
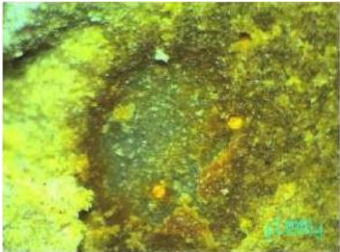
Ilustración 66. Registro fotográfico de la sección transversal y superficie de probetas sumergidas con ácido durante 120 horas, obtenidas por microscopía óptica a aumentos de x10, x20, x30, x40

El análisis microscópico reveló que las probetas de CP desarrollaron una capa de corrosión homogénea en todas sus caras exteriores tras el ensayo, mientras que las muestras de GPP+SF presentaron únicamente daños superficiales menores y alteraciones en su interior. La

diferencia observada se debe a la resistencia química del CP por neutralización de ácido, que limitó la penetración del ácido y concentró el deterioro en la superficie. En contraste, aunque los geopolímeros son más porosos, la ausencia de cambio de color en la fenolftaleína sugiere que el ácido no logró penetrar en su estructura. del revelado con fenolftaleína confirmó que las probetas de CP sufrieron una mayor extensión de ataque ácido, lo que coincide con la disminución de masa registrada durante el ensayo coincidiendo con (Shi et al., (2011). A pesar de la corrosión observada, en ninguna de las muestras se evidenció la formación de grietas estructurales, lo que indica que la capa deteriorada del CP se comportó como un depósito suelto, similar al yeso, sin experimentar contracciones volumétricas significativas que generaran fisuras (Fernández-Jiménez et al., 2005). Estos resultados refuerzan la línea base de la literatura de que los geopolímeros presentan una mejor estabilidad química en medios ácidos en comparación con el CP.

Probetas cúbicas atacadas en un entorno agresivo extremo.

Las probetas expuestas a 61 días fueron seccionadas a la mitad con el propósito de analizar los cambios internos ocurridos. En la Ilustración 67 se presentan imágenes ampliadas en el microscopio, tanto la sección transversal como la superficie de las muestras. Para garantizar un análisis coherente, se seleccionó un punto de referencia común, en este caso las esquinas de las probetas, permitiendo evaluar de manera uniforme los efectos del ataque ácido.

Muestra	Aumento	Sección transversal	Superficie
CP	10x		
	20x		

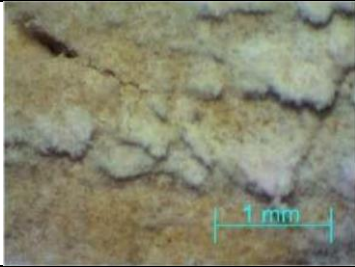
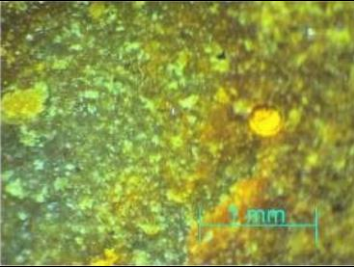
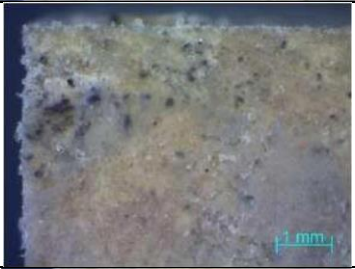
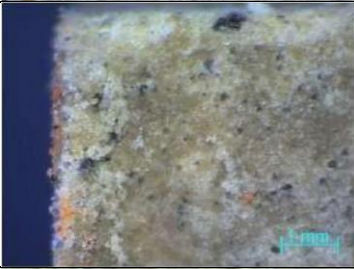
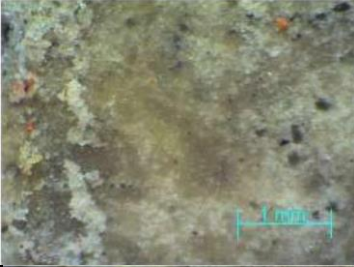
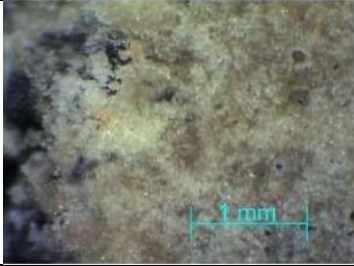
	30x		
	40x		
Muestra	Aumento	Sección transversal	Superficie
GPP +SF	10x		
	20x		
	30x		
	40x		

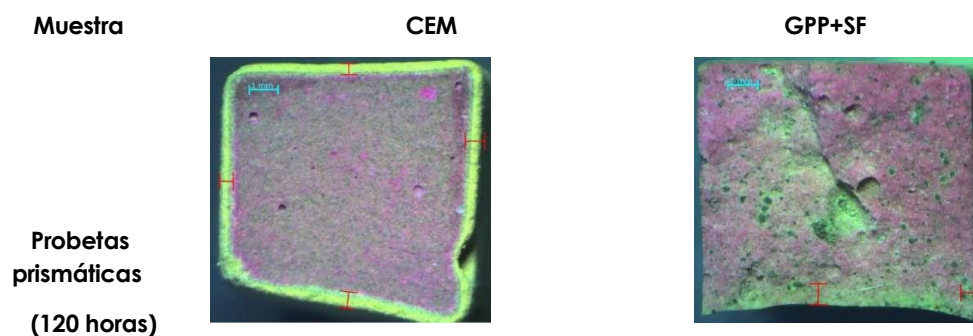
Ilustración 67. Registro fotográfico de la sección transversal y superficie de probetas sumergidas con ácido durante 61 días, obtenidas por microscopía óptica a aumentos de x10, x20, x30, x40.

La Ilustración 67 muestra que al igual que las probetas prismáticas, las muestras de GPP+SF no desarrollaron una capa de corrosión tras el contacto con el ácido. Mientras que las probetas de CP presentaron una corrosión evidente, tanto en la superficie como en niveles internos, lo que refleja un daño progresivo. La diferencia en la degradación observada entre las muestras CP y GPP+SF tras el ataque ácido se atribuye a las distintas interacciones del ácido con sus matrices. En el caso del CP, el ácido nítrico (HNO_3) induce la lixiviación del calcio, incrementando la porosidad y facilitando la penetración ácida a medida que avanza la reacción. Este fenómeno se evidencia con el revelado de la fenolftaleína en las capas iniciales de la muestra CP, donde la persistencia del color rojo interno sugiere una penetración ácida limitada inicialmente, seguida de una degradación progresiva. Este comportamiento se alinea con estudios que demuestran la capacidad del HNO_3 para disolver compuestos de calcio, alterando la microestructura de materiales cementosos (Taylor, 1997). En contraste, la muestra GPP+SF, con una porosidad inherente, exhibe una menor degradación. Esto se debe a la presencia de aluminosilicatos, que forman geles N-A-S-H resistentes al ácido, limitando la lixiviación y la apertura de la estructura. La formación de estos geles, conocidos por su estabilidad en ambientes ácidos, actúa como barrera protectora, reduciendo la penetración del ácido y la degradación del material (Lothenbach et al., 2007).

Profundidad de corrosión en probetas prismáticas y cúbicas

La profundidad de corrosión se refiere al espesor de las capas deterioradas por el ataque ácido, identificado mediante el cambio de color observado con fenolftaleína. Para determinar estas medidas, se utilizó el software AutoCAD, trazando líneas perpendiculares desde la superficie de la muestra hacia su interior.

En las probetas de CP, la corrosión fue evaluada en las cuatro caras de la muestra, mientras que en las probetas de GPP+SF solo se midieron las áreas afectadas debido a la ausencia de una capa visible de desgaste. Para mejorar la visualización, las imágenes de las probetas prismáticas fueron ampliadas a un aumento de 10x, mientras que las probetas cúbicas se midieron en su tamaño original.



**Probetas
cúbicas
(61 días)**

Ilustración 68. Registro fotográfico de la profundidad de corrosión en probetas prismáticas sumergidas con ácido durante 120 horas y probetas cúbicas atacadas agresivamente por 61 días.

En la Ilustración 68 se observa que, en las probetas prismáticas y cúbicas de CP, las mediciones de profundidad se realizaron en las zonas con mayor espesor de la capa corroída. Esto se debe a que las secciones más delgadas perdieron parte de su material deteriorado durante la manipulación de las muestras. Mientras que las probetas geopoliméricas, tanto prismáticas como cúbicas, presentaron menor daño superficial, lo que permitió obtener solo dos mediciones de profundidad en cada tipo de muestra. En las probetas cúbicas de GPP+SF, la aplicación de fenolftaleína no generó una coloración visible. Este comportamiento concuerda con estudios previos sobre la durabilidad de geopolímeros en medios ácidos, que han reportado que, a diferencia del CP, los geopolímeros tienden a sufrir una degradación más homogénea sin la formación de una capa externa de corrosión (Provis & Van Deventer, 2009; Zhang et al., 2014).

En la Tabla 52 se muestra la profundidad de corrosión presentado en cada sección de la probeta y de igual manera en la Ilustración 69 la representación de sus medias.

Tabla 52. Valores de la profundidad de corrosión en probetas prismáticas sumergidas con ácido durante 120 horas y probetas cúbicas atacadas agresivamente por 61 días

Probeta	Profundidad de corrosión (mm)				
	Superior	Inferior	Derecho	Izquierdo	Promedio
Prismáticas CEM	0,385	0,582	0,68	0,463	0,528
Prismáticas GPP+SF	0	0,708	0,544	0	0,313
Cúbicas CEM	2,537	3,073	2,312	2,792	2,68
Cúbicas GPP+SF	1,235	0	0	1,523	0,69

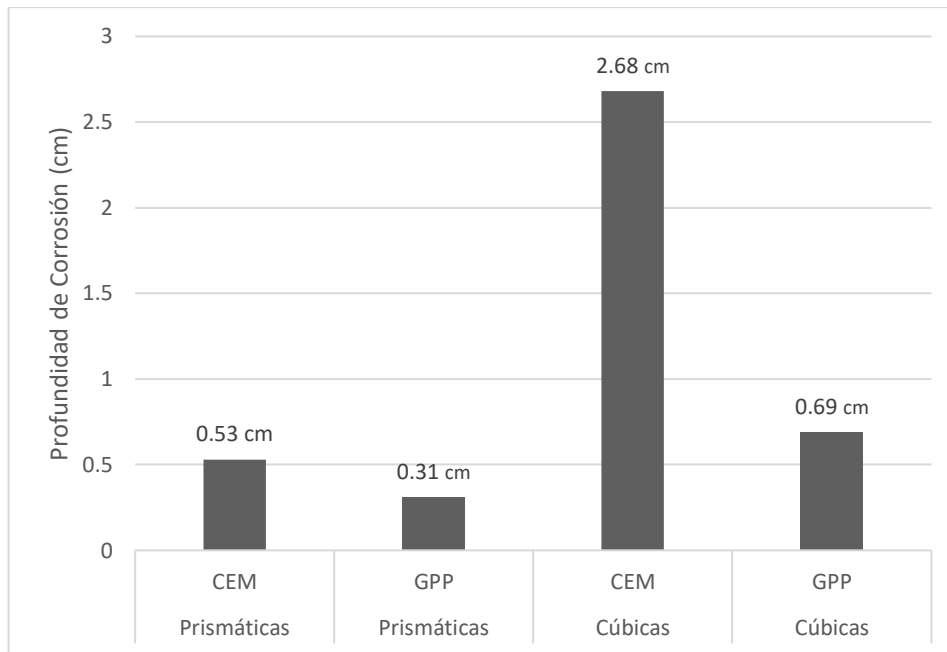


Ilustración 69. Profundidad de corrosión promedio de las probetas prismáticas y cúbicas expresados gráficamente

3.5. Discusión capítulo 3

Antes de iniciar los ensayos de durabilidad, se incorporó SF a la matriz geopolimérica, sustituyendo parcialmente el material precursor de la activación alcalina para mejorar sus propiedades mecánicas. Se determinó que la mejor dosificación correspondía a una concentración molar de 12M y un 10% de SF, lo que permitió alcanzar resistencias óptimas a compresión y flexión, adecuadas para la fabricación posterior de mampuestos (Andrade et al., 2024). Estos hallazgos concuerdan con estudios previos, como los de Das et al., (2020); Huey Li et al., (2021); Min et al., (2022); Payá et al., (2022), quienes evidenciaron que la adición de SF mejora significativamente las propiedades mecánicas de los geopolímeros, incrementando su resistencia y durabilidad.

Siguiendo la dosificación de Andrade et al (2024), y asegurando un curado constante de las probetas de GPP+SF, se evaluaron las propiedades mecánicas de las probetas, utilizando probetas de CP como testigos para compararlo. Se las evaluó a compresión y flexión para verificar la activación alcalina y dosificación adecuada, además de evaluar su viabilidad como material ecológico para la construcción. Los resultados mostraron que las probetas de CP superaron significativamente en resistencia a las de GPP+SF, tanto a los 7 como a los 28 días, con valores más del doble y triple, respectivamente. Esto contrasta con estudios previos, como el de Tran & Ghosh, (2020), quienes encontraron mayores resistencias en geopolímeros de puzolana de piedra pómez volcánica, y Bella et al., (2020), quienes reportaron que los morteros activados con hidróxido de sodio y silicato de sodio pueden alcanzar a compresión entre 27 y 40 MPa y a flexión de 8 y 10 MPa, mientras que en este estudio la mayor resistencia del GPP+SF

a la compresión fue de solo 17.74 MPa y a la flexión de 6,03 MPa. Las menores resistencias del GPP+SF en compresión y flexión, en comparación con los valores reportados en la literatura, pueden atribuirse a variaciones en la composición y dosificación de los materiales utilizados. Factores como la reactividad y granulometría del precursor, la relación de la solución alcalina y fuente de aluminosilicatos y las condiciones de curado influyen significativamente en el desarrollo de la resistencia mecánica (Das et al., 2020; Huey Li et al., 2021).

En el ensayo de ANC con pH combinado de 7, 4 y 2, las muestras de GPP+SF neutralizaron un total de 1.43 mmolH⁺/g en 70 minutos, mientras que las de CP alcanzaron 14.08 mmolH⁺/g en 299 minutos. Esta diferencia se debe a la estabilidad del gel de hidrato de aluminosilicato de sodio (N-A-S-H) en los geopolímeros, el cual es menos reactivo frente a medios ácidos en comparación con el gel de hidrato de silicato de calcio (C-S-H) y la portlandita del CP. Este comportamiento coincide con lo reportado por Sambucci, M., Ferrari, L., & Catauro, (2011); Zannerni, M., Ranjbar, N., & Zhang, (2020)), quienes destacan la resistencia química del gel rico en sodio en estructuras geopoliméricas. Por otro lado, la mayor reactividad de las matrices cementicias se explica por la presencia de sales cálcicas como la portlandita, las cuales incrementan su vulnerabilidad a la degradación ácida, tal como lo señala (Pérez, 2015)

La pérdida de masa en un ambiente ácido controlado durante 120 horas mostró que las probetas prismáticas de GPP+SF conservaron el 98,0% de su masa residual, con un consumo de 10,3 ml de ácido nítrico. Mientras que las probetas de CP retuvieron solo el 89,2% de su masa, requiriendo 29,7 ml del ácido. En las pruebas de pérdida de masa en condiciones extremas realizadas durante 61 días en probetas cúbicas expuestas a un entorno agresivo, los cubos de CP mantuvieron el 80,0% de su masa residual, mientras que los GPP+SF conservaron el 99,6%, esto confirma la superior resistencia de las matrices de GPP+SF frente a la degradación ácida, en comparación con el CP según ya lo estudiado por (Duxson, Fernández-Jiménez, Provis, Lukey, Palomo, & Van Deventer, 2007; A. Safari et al., 2020; Weil et al., 2009; Leong Sing Wong, 2022; Zannerni, M., Ranjbar, N., & Zhang, 2020).

La variación en la degradación de ambas matrices se atribuye a la interacción diferencial del ácido con sus estructuras. En las probetas de GPP+SF, la despolimerización de la red de aluminosilicatos y la liberación de ácido silícico ocurrieron de manera más gradual, lo que les proporcionó una mayor resistencia en comparación con el CP. Por otro lado, la matriz de cemento experimentó una lixiviación acelerada de sus partículas y estructuras de cementación, como el silicato y el aluminato de calcio hidratado. Aunque el GPP+SF demostró una mayor estabilidad debido a su elevado contenido de silicio y aluminio, aún presentó afectaciones mínimas coincidiendo con (Leong Sing Wong, 2022). Además, las probetas de cemento requirieron un mayor volumen de ácido nítrico para mantener el pH del ensayo, debido a su alto contenido de calcio, un elemento que promueve la estabilización y alcalinización del medio previamente estudiado por (M. Pérez, 2015)). La pérdida de masa en

GPP+SF fue inferior al de CP tras exposición a ácidos fuertes, concuerdan con investigaciones previas (Ralli & Pantazopoulou, 2021). Esta diferencia se atribuye a los distintos mecanismos de degradación: en geopolímeros, el ataque ácido provoca la expulsión de aluminio de la estructura de aluminosilicatos, mientras que, en el cemento, la alta concentración de calcio favorece una mayor reacción con el ácido nítrico, resultando en una desintegración más extensa (Ajay et al., 2020).

El análisis elemental obtenido mediante SEM confirmó que silicio y aluminio permanecieron en la estructura del material tras la exposición al ataque ácido. En contraste, el sodio, aunque en menor proporción, fue el elemento más degradado, representando solo el 1,49% de la composición después de 120 horas. Estos hallazgos respaldan la teoría de Bakharev, 2005; quien señaló que la naturaleza del gel de aluminosilicato en matrices geopoliméricas permite un mejor control frente a agentes agresivos, evitando una degradación prematura. Asimismo, concuerdan con los resultados de Mehta y Siddique (2016), quienes, tras someter un geopolímero a ácido sulfúrico por 365 días, evidenciaron mediante micrografía que la resistencia química se debe a los enlaces Si-O-Si(Al) del conglomerante geopolimérico. Además, se observó que el calcio fueron los primeros elementos en desaparecer a las 24 horas, lo que se atribuye a la vulnerabilidad de los productos de hidratación con calcio frente al ataque ácido.

Los resultados de la microscopía óptica en las probetas sometidas a ensayos de pérdida de masa mostraron que las matrices de cemento desarrollaron una capa de material corroído de color rojizo, con una profundidad de corrosión promedio de 2,68 mm. Mientras que las matrices de GPP+SF no formaron una capa corroída en su superficie, debido a que el ácido no ha penetrado debido a la presencia de geles NASH, con una profundidad de corrosión promedio de solo 0,69 mm. Esto indica una mayor resistencia del geopolímero frente a la corrosión en comparación con el cemento mostrando resultados similares a los de (Marcillo et al., 2021; L. Pérez et al., 2022)

3.6. Conclusiones

Este capítulo evaluó la durabilidad de una matriz geopolimérica de piedra pómez, a la que se le añadió SF y se activó con una mezcla de hidróxido y silicato de sodio, frente al ataque del ácido nítrico (1 mol/L), simulando así la exposición a agentes químicos ambientales. Para establecer comparaciones, también se analizaron matrices de CP ordinario. Se llevaron a cabo ensayos de ANC con pH combinado en muestras molidas y pruebas de pérdida de masa en probetas sometidas a condiciones de ataque ácido controlado y extremo. Además, se realizaron observaciones mediante microscopía electrónica de barrido y microscopía óptica.

Los ensayos mecánicos de compresión y flexión mostraron que el GPP+SF presenta resistencias inferiores en comparación con el CP. Sin embargo, estos valores cumplen con los requisitos necesarios para la fabricación de mampuestos prefabricados según la norma ecuatoriana de construcción NEC-SE-VIVIENDA. Además, una ventaja significativa de los geopolímeros es su alta resistencia temprana a la compresión, que permite alcanzar hasta el 90% de su resistencia final en solo 7 días.

En pruebas de neutralización ácida, los geopolímeros superaron significativamente al CP en todos los niveles de acidez debido a que neutralizaron el ácido nítrico de forma más rápida. Esta ventaja se debe a la mayor estabilidad del gel de hidrato de aluminosilicato de sodio en la matriz geopolimérica, en comparación con el gel de hidrato de silicato de calcio del CP.

Las probetas de GPP+SF presentaron una pérdida de masa muy pequeña debido a la despolimerización de su red de aluminosilicatos, lo que evidencia su resistencia a la corrosión ácida, mientras que las muestras de CP que mostraron un deterioro significativo, atribuido a la lixiviación de sus partículas cementicias. El ensayo microestructural SEM ejecutado en muestras geopoliméricas de piedra pómez atacadas, dio como resultado que el aluminio en conjunto con el silicio, elemento mayoritario en la composición, imposibilitaron un ataque severo del ácido prolongando esta acción por mucho más tiempo.

En general, la matriz de activación geopolimérica demostró una mayor durabilidad en comparación con la de CP, destacándose por su resistencia superior al ataque de ácido nítrico en todos los ensayos realizados. Además, sus valores de resistencia a compresión y flexión la hacen viable para la fabricación de mampuestos prefabricados. Sin embargo, es necesario reducir aún más la concentración molar de hidróxido de sodio debido a su limitada disponibilidad en Ecuador. Asimismo, se recomienda la incorporación de adiciones naturales en la matriz conglomerante para optimizar sus propiedades.

CAPÍTULO 4. COMPARACIÓN ENTRE EL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE MAMPUESTOS PREFABRICADOS UTILIZANDO GEOPOLÍMERO Y CEMENTO COMO CONGLOMERANTES

4.1. Introducción

En la industria de la construcción, el uso constante de materiales exige buscar alternativas más sostenibles (Angamarca & Rubén, 2015), las cuales además deben mantener o mejorar las propiedades estructurales de los materiales convencionales (Habert et al., 2011; Vargas-López et al., 2022). Los mampuestos más empleados tradicionalmente son los bloques de alivianamiento, valorados por su bajo peso. Estos bloques, que habitualmente no cuentan con tapa, están conformados por dos celdas huecas y tienen un peso aproximado de 9,5 kg, y se producen mediante una mezcla de piedra pómez, cemento y agua, aprovechando los recursos locales disponibles en Ecuador (Bedoya, 2018).

Predomina de igual manera el uso los ladrillos prefabricados, debido a su resistencia mecánica y durabilidad (Ruiz & Celi, 2018). Son fabricados de una mezcla de arcilla y agua mismos que se cuecen en hornos a altas temperaturas generando grandes emisiones de CO₂ (Zhang, P., 2021), lo que impulsa la búsqueda alternativas que disminuyan su contaminación (Bonilla Coca et al., 2022; Ibarra, 2024; Solorzano, 2024).

En vías urbanas se usa ampliamente el adoquín prefabricado, valorado por su alta resistencia a la compresión y su capacidad para soportar cargas pesadas (Neville, 2011; Pérez et al., 2022). Se componen de cemento o piedra natural, debido a esto su fabricación al requerir cemento como conglomerante presenta un impacto ambiental negativo (Scrivener L. et al., 2018). Investigaciones han señalado que la sustitución parcial del cemento con adiciones de subproductos industriales, como cenizas volantes o escorias, ha demostrado una reducción en el uso de cemento y una mejora en la sostenibilidad de estos productos sin comprometer su rendimiento mejorando ciertas propiedades, como la durabilidad y la resistencia a la abrasión (Duxson, Fernández-Jiménez, Provis, Lukey, Palomo, & Van Deventer, 2007; Juenger et al., 2011).

Este capítulo explora el uso de un geopolímero como material conglomerante en la fabricación de mampuestos prefabricados, empleando un geopolímero a base de piedra pómez (GPP). Para reducir la concentración de hidróxido de sodio en el conglomerante, se incorpora polvo de ladrillo artesanal (arcilla cocida) a la matriz geopolimérica debido a su alto contenido de aluminio (Cajamarca et al. 2023). El objetivo es igualar o mejorar las propiedades mecánicas de los mampuestos tradicionales, garantizando un desempeño estructural

adecuado en los mampuestos, cumpliendo con las normativas ecuatorianas para ladrillos (NTE INEN 294, NTE INEN 295, NTE INEN 296) y bloques (NTE INEN 3066).

Finalmente se realiza un modelo computacional en el software ETABS, que evaluará su desempeño como elemento constructivo dentro de un sistema de mampostería confinada. Esta evaluación se realizará conforme a los requisitos fundamentales establecidos por el MIDUVI (2015) para viviendas de mampostería confinada, y en concordancia con las disposiciones de la Norma Ecuatoriana de la Construcción – NEC-SE-M, utilizando las propiedades mecánicas de mampuestos fabricados con geopolímero. Los resultados se contrastarán con los de un modelo análogo construido con mampostería convencional, evaluando así las diferencias en desempeño estructural entre ambos sistemas (Hernández & Torres, 2022; CSI, 2023), siguiendo con los parámetros requeridos en la normativa ecuatoriana (NEC-SE-DS, 2015).

4.2. Materiales y métodos

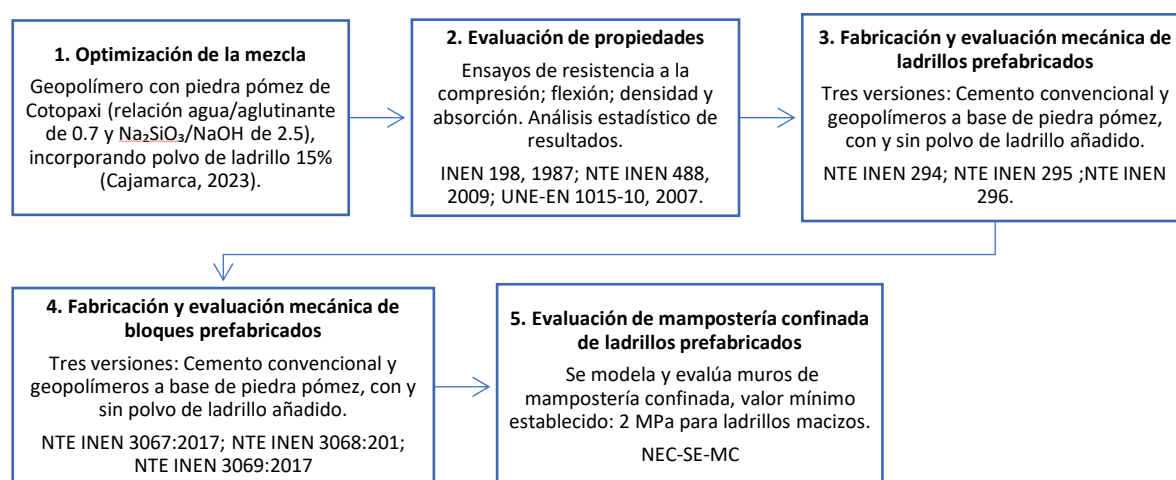


Ilustración 70. Metodología a seguir capítulo 4

Se emplearon los materiales descritos en el Capítulo 3 para la elaboración de probetas de geopolímero de piedra pómez, pero en este capítulo se incorporó polvo de ladrillo para mejorar sus propiedades y reducir la concentración molar del hidróxido de sodio siguiendo según las recomendaciones de (Cajamarca & Paullán, 2023). Con el objetivo de comparar el comportamiento de los mampuestos prefabricados utilizando geopolímero y cemento como conglomerantes, además del equipamiento básico del laboratorio de control de calidad de materiales de la UNACH, se requirieron los siguientes materiales adicionales para el análisis:

4.2.1. Polvo de ladrillo como adición a la mezcla geopolimérica (PL)

En Ecuador, el ladrillo artesanal es uno de los materiales de construcción más utilizados, especialmente en viviendas. Su fabricación ha perdurado como una práctica tradicional,

particularmente en la región andina, donde el conocimiento y las técnicas de producción se han transmitido de generación en generación (Ruiz & Celi, 2018).

En esta investigación, dicho ladrillo elaborado a partir de arcilla calcinada será pulverizado para obtener un polvo de ladrillo, el cual se empleará como sustituto parcial de la piedra pómez en la mezcla geopolimérica, con el objetivo de elaborar morteros para mampuestos prefabricados.

De una investigación previa (Cajamarca, 2023), se tiene que la densidad del PL es de 1661.16 kg/m³ y su absorción de 21,07%. El 99.60% de las partículas tienen un diámetro menor a 0.6mm y el 3.60% es menor a 0.075mm, es decir pasa el tamiz N°200 con un módulo de finura de 1,67.

El análisis químico que obtuvieron los autores se muestra en el cuantitativo por DFX en la Tabla 53 de la fracción cristalina y en la Tabla 54 el análisis cuantitativo por FRX, el cual evidencia una alta presencia de alúmina (Al₂O₃). Este resultado es relevante, ya que podría contribuir significativamente al incremento del contenido de aluminio en la matriz cementicia. Tal como se analizó en el Capítulo 2, la piedra pómez por sí sola presenta un contenido aproximado del 13% de aluminio en forma de óxido, lo que limita su capacidad de formar geles aluminosilicatos. La incorporación de un material con mayor concentración de este compuesto, como el reportado en este análisis, favorecería la formación de geles tipo N-A-S-H, esenciales para el desarrollo de un sistema geopolimérico eficiente.

Tabla 53. Análisis cualitativo del PL

Mineral	Formula química	Contenido (%)
Grupo plagioclasas	(Na, Ca)Al(Si, Al)Si ₂ O ₈	78 %
Hematita	Fe ₂ O ₃	12 %
Cuarzo	SiO ₂	5 %
Cordierita	Mg ₂ Al ₄ Si ₅ O ₁₈	5 %

Tomado de (Cajamarca, 2023)

Tabla 54. Resultados de la fluorescencia del PL.

Nombre	Elemento y/o Compuesto	Porcentaje en peso (%)
Silicio	SiO ₂	41.96 %
Aluminio	Al ₂ O ₃	28.31 %
Hierro	Fe ₂ O ₃	25.10 %
Titania	TiO ₂	2.33 %
Magnesio	MgO	1.01 %
Manganeso	MnO	0.38 %
Calcio	CaO	0.24 %
Potasio	K ₂ O	0.14 %
Azufre	SO ₃	0.10 %
Fósforo	P ₂ O ₅	0.07 %
Bario	Ba	0.07 %
Sodio	Na ₂ O	0.06 %
Cromo	Cr	0.05 %
Cobalto	Co	0.04 %
Cerio	Ce	0.03 %
Vanadio	V	0.02 %
Arsénico	As	0.02 %
Níquel	Ni	0.02 %
Cobre	Cu	0.02 %
Zirconio	Zr	0.02 %
Zinc	Zn	0.01 %
Escandio	Sc	76 ppm*
Cloro	Cl	68 ppm*

Tomado de (Cajamarca, 2023)

4.2.2. Geopolímero con polvo de ladrillo (GPP+PL)

Al geopolímero estudiado en el capítulo 3 se le añadirá PL, con el fin de evaluar su impacto en las propiedades mecánicas y la eficiencia del material resultante. El polvo de ladrillo artesanal, elaborado con arcilla cruda, agua y materiales naturales, presenta una estructura amorfa, que lo hace idóneo para ser incorporados en geopolímeros con piedra pómez por la presencia de aluminosilicatos y a la vez reduce la concentración molar requerida de hidróxido de sodio para su activación alcalina, siendo una adición positiva a la mezcla (Cajamarca, 2023).

En la Tabla 55 y Tabla 56 se detalla la dosificación requerida para elaborar 4,5 kg de material precursor. Estudios previos han demostrado que una matriz conglomerante con PL, al contener sílice y alúmina en su composición, favorece la reacción alcalina en la formación de estructuras cementantes, lo que puede mejorar la cohesión y reducir la porosidad del material. Para garantizar la activación alcalina efectiva, se emplea una solución de hidróxido de sodio con una molaridad de 10 M, valor que demostró en ensayos preliminares ser el más adecuado para lograr la disolución y reactividad óptima de los precursores (Zhao et al., 2017).

Tabla 55. Dosificación del activador.

Concentración de NaOH	Na ₂ SiO ₃ /NaOH	Hojuelas de NaOH (gr)	Agua destilada (litros)	Solución NaOH (kg)	Na ₂ SiO ₃ (kg)	NaOH+Na ₂ SiO (kg)
10M	2,5	400	1	0,90	2,25	3,15

En la Tabla 55 se presenta la dosificación empleada en el geopolímero, indicando el porcentaje de reemplazo, expresado en kilogramos.

Tabla 56. Dosificación del precursor y activador.

Precursor		Activador (kg)
Arcilla (kg)	Piedra pómez (kg)	(kg)
0,68	3,82	3,15

4.2.3. Mampuestos y mampostería confinada

Los mampuestos son elementos prefabricados como ladrillos y bloques, vinculados a través de mortero para formar estructuras de mampostería. De acuerdo con su diseño y fortalecimiento estructural, se divide en tres categorías principales: mampostería confinada, reforzada y no reforzada (Mosquera & Torres, 2021; INEN 3066, 2017).

La mampostería confinada es una técnica constructiva ampliamente utilizada en Latinoamérica, especialmente en viviendas de baja y mediana altura, debido a su rentabilidad, facilidad de ejecución y adecuación a normativas sísmicas (Meli et al., 2011). En Ecuador, este sistema junto con los pórticos de hormigón armado rellenos de mampostería es utilizado en el sector residencial, representando más del 60% de las edificaciones urbanas (MIDUVI, 2017; NEC-SE-DS, 2015). Su popularidad se atribuye a la disponibilidad de materiales locales y la mano de obra especializada en su implementación.

Los ladrillos son los elementos más usados en muros de mampostería, mientras que los bloques suelen emplearse para losas de alivianamiento y los adoquines para pavimentos y vías.

4.2.4. Geopolímero como alternativa para la producción de mampostería

Abuowda et al., (2024), analizaron el desempeño de morteros geopoliméricos fabricados con una combinación de cenizas volantes y escoria como precursores para el aglomerante geopolimérico en mampuestos. La Ilustración 71 presenta la evolución de la resistencia a la compresión de diferentes mezclas de mortero para mampostería, clasificadas en dos tipos: N-Type y S-Type. Se evalúa la resistencia a 1, 7 y 28 días para cada mezcla, cuya designación indica tanto el tipo de matriz (C-N para matriz de cemento tradicional y G-N para matriz de geopolímero) como el porcentaje de reemplazo de áridos naturales por áridos reciclados (RFA) al 0, 25, 50, 75 y 100%. Los resultados a los 28 días de curado mostraron que las resistencias a la compresión oscilaron entre 8.8 MPa y 14.3 MPa para morteros tipo N (de resistencia media (6.2–14.5 MPa) siendo las más óptimas como se observa en la Ilustración 71, utilizados en

aplicaciones no estructurales o en proyectos donde se requieren resistencias moderadas, como en las paredes exteriores de viviendas.) y entre 14.5 MPa y 20.7 MPa para morteros tipo S (Morteros de alta resistencia (14.5–20 MPa), recomendados para aplicaciones estructurales que requieren mayor capacidad de carga y durabilidad, como en muros portantes o donde se expone a condiciones más severas.). Las mezclas que incorporaron mayores proporciones de escoria y utilizaron relaciones alcalinas optimizadas (relación SS/SH de 1.5) lograron mejores resultados debido a la formación de geles de calcio-aluminio-silicato que fortalecen la matriz geopolimérica. Sin embargo, las resistencias disminuyeron a medida que aumentaba el porcentaje de agregados reciclados, alcanzando mínimos de 8.8 MPa en mezclas tipo N con 100% de agregados finos reciclados, debido a su mayor porosidad y menor cohesión en la interfaz matriz-agregado.

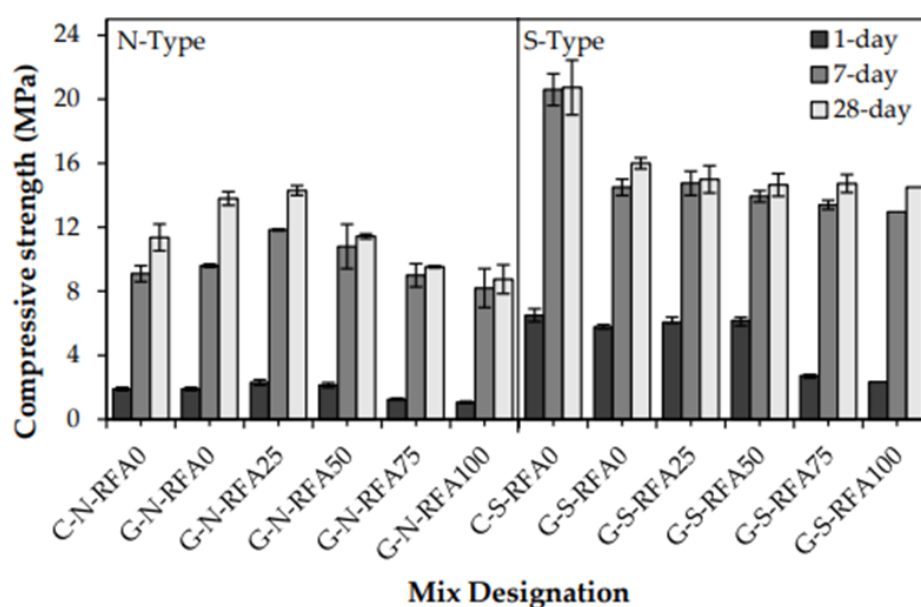


Ilustración 71. Resistencia a la compresión de mezclas de mortero de mampostería

Fuente: (Abuowda et al., 2024)

- C-N-RFA0: Mezcla con cemento Portland, agregado tipo N, 0% de agregado reciclado (solo arena natural).
- G-N-RFA50: Geopolímero, agregado tipo N, con 50% de reemplazo de arena natural por agregado reciclado.
- C-S-RFA0: Cemento Portland, agregado tipo S, sin agregado reciclado (control).
- G-S-RFA100: Geopolímero, agregado tipo S, con 100% de agregado reciclado.

4.2.5. Ensayos utilizados para comparar el comportamiento mecánico de mampuestos prefabricados utilizando geopolímero y cemento como conglomerantes

Para poder comparar las propiedades mecánicas de los mampuestos vinculados a través del uso de pastas cemento vs geopolímero se requirió los siguientes ensayos:

- Ensayo de fluidez en pastas y morteros.
- Microscopia electrónica de barrido SEM (se encuentra descrito en el capítulo 3 según las normativas internacionales (ASTM E1508-12; ASTM E766-15))
- Ensayo a la compresión de pastas elaborados con el GPP+PL (se encuentra descrito en el capítulo 2 según las normativas ecuatorianas para morteros NTE INEN 488 (2009) y NTE INEN 198 (1987))
- Ensayo a la flexión de pastas elaborados con el GPP+PL (se encuentra descrito en el capítulo 2 según las normativas ecuatorianas para morteros NTE INEN 198 (1987))
- Ensayo de densidad y absorción aparente de pastas (se encuentra descrito en el capítulo 3 según la normativa española (UNE-EN 1015-10, 2007))
- Ensayos de compresión y flexión de bloques y ladrillos prefabricados.

Ensayo de fluidez en pastas y morteros de CP, GPP y GPP+PL

Para evaluar la fluidez de las pastas, como así de las pastas con incorporación de árido fino, se siguieron los lineamientos establecidos en la norma ecuatoriana NTE INEN 2502 (2009). En este ensayo, tanto en el mortero tradicional como en el material geopolimérico, se emplearon los siguientes instrumentos: mesa y molde de flujo, calibrador, compactador, espátula con una lámina de acero de entre 100 mm y 150 mm de longitud con bordes rectos, y un enrasador de acero con un mínimo de 200 mm de largo y un grosor comprendido entre 1.5 mm y 3.5 mm.

Antes de iniciar la prueba, es fundamental asegurarse de que la mesa de flujo esté limpia y completamente seca. A continuación, se posiciona el molde en el centro del área de ensayo y se procede a llenarlo con capas de mortero de aproximadamente 25 mm de espesor. Cada capa debe compactarse aplicando 20 golpes con el compactador hasta llenar el molde en su totalidad. Luego, se nivela la superficie del mortero utilizando el enrasador y la espátula.

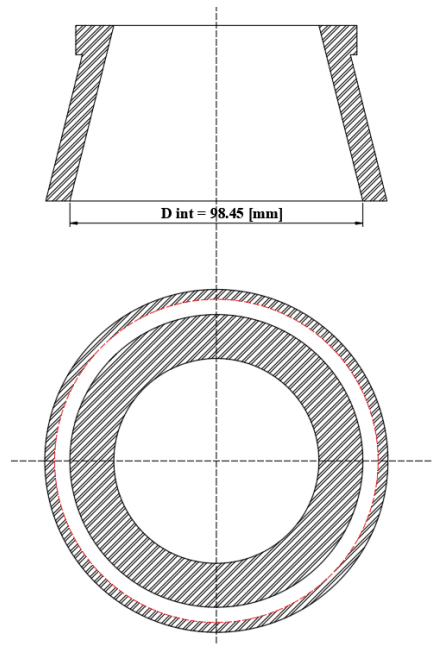


Ilustración 72. Diámetro interior incrementados

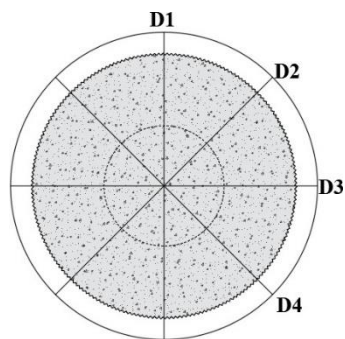


Ilustración 73. Lecturas de diámetros

Después de un minuto, se retira el molde y se activa la mesa de flujo, la cual debe realizar 25 movimientos de caída en un periodo de 15 segundos. Finalmente, se miden los diámetros del mortero en cuatro direcciones sobre la superficie de la mesa, como se muestra en la Ilustración 68 e Ilustración 69 se calcula la fluidez aplicando la Ecuación 14:

$$F = \frac{A}{D} * 100$$

Ecuación 14

Donde:

F = fluidez

A = promedio de los diámetros medidos (mm)

D = diámetro original de la base en milímetros (mm)

El cálculo del volumen de material que se coloca en el interior del molde flujo, tomando en cuenta que su forma es de un cono truncado está dado por la Ecuación 15:

$$V = \frac{h * \pi}{3} (R^2 + r^2 + R * r) \quad \text{Ecuación 15}$$

Donde:

V = volumen del molde flujo

h = altura del molde de flujo

R = radio inferior del molde de flujo

r = radio superior del molde de flujo

Preparación de probetas con pastas y morteros de CP, GPP y GPP+PL

La preparación de pastas de geopolímero y morteros con geopolímeros como conglomerante está basada en la normativa ecuatoriana para morteros NTE INEN 488 (2009) y NTE INEN 198 (1987), las mismas que se adaptaron de acuerdo con las necesidades al momento de elaborar el geopolímero. Las dimensiones de las probetas que fueron utilizadas en ensayos a compresión fueron cubos de 50 x 50 x 50 mm y para el ensayo a flexión vigas de 40 x 40 x 16 mm.

Para la elaboración de la pasta de CP, se utilizó una relación agua/cemento de 0.7, mezclando los componentes durante 10 minutos hasta llegar a una mezcla homogénea y vertiendo la pasta líquida en encofrados sin vibración excesiva. Tras 24 horas de curado a temperatura ambiente, las probetas se desmoldaron y se sumergieron en agua con cal hasta los ensayos para evitar la carbonatación.

Para la elaboración de GPP, la piedra pómez seca se mezcló con el activador (utilizando una relación agua/material cementante de 0.7) durante 10 minutos. La mezcla se colocó en encofrados con agente desencofrante, compactándose con golpes suaves, y se curó inicialmente envuelta en plástico filme por 24 horas a temperatura ambiente, seguido de un curado en horno a 60°C, las probetas geopoliméricas se desmoldaron y se envolvieron en plástico filme hasta su ensayo.

Para la elaboración de GPP+PL se utilizó la dosificación recomendada por estudio de (Cajamarca, 2023) incorporando un 15 % de PL y el cual consistió en dejar curar al ambiente durante 24h el geopolímero, para proceder a colocar las muestras en el horno a 60°C por 14 días, debido a que a los 7 días las probetas no estaban secas en su totalidad, mostrando una consistencia blanda y esponjosa, por lo que se dificultó el desencofrado, quebrándose al momento de sacarlas. Por último, se desencofraron las probetas y se las envolvió en plástico filme para dejarlas a temperatura ambiente hasta ser ensayadas.

Álvarez et al., (2021) analizó el efecto del tiempo de curado sobre la resistencia de diversos materiales geopoliméricos. Los autores encontraron que las probetas curadas a 65 °C durante 24 horas (G-AL y G-AL-65) presentaron un incremento significativo en su resistencia a edades tempranas, debido a la aceleración de la reacción de geopolimerización, en comparación con aquellas curadas a temperatura ambiente (G-ANL y G-ANL-65). Sin embargo, las diferencias entre ambos tipos de curado fueron reduciéndose con el tiempo. A los 80 días, las mezclas alcanzaron entre el 66 % y el 75 % de la resistencia de los morteros de cemento Portland (CPO-ANL y CPO-AL), como se observa en Ilustración 74. Este hallazgo resalta la importancia del tiempo y las condiciones de curado en el desarrollo de las propiedades mecánicas finales de los materiales. La dosificación de estos morteros se estableció con una relación de 1:3 (conglomerante : árido), es decir, una parte de geopolímero por cada tres partes de árido (arena). Esta relación, si bien se desvía de las proporciones típicas del mortero de cemento Portland, fue ajustada en laboratorio a través de diversas pruebas para optimizar las propiedades del mortero geopolimérico. La composición específica de la solución activadora alcalina y su relación con el precursor aluminosilicatado. Con una relación de solución alcalina a aluminosilicatos de 0.65 y una proporción silicato de sodio/hidróxido de sodio de 2.5, que fue determinante para alcanzar la trabajabilidad deseada de la mezcla.

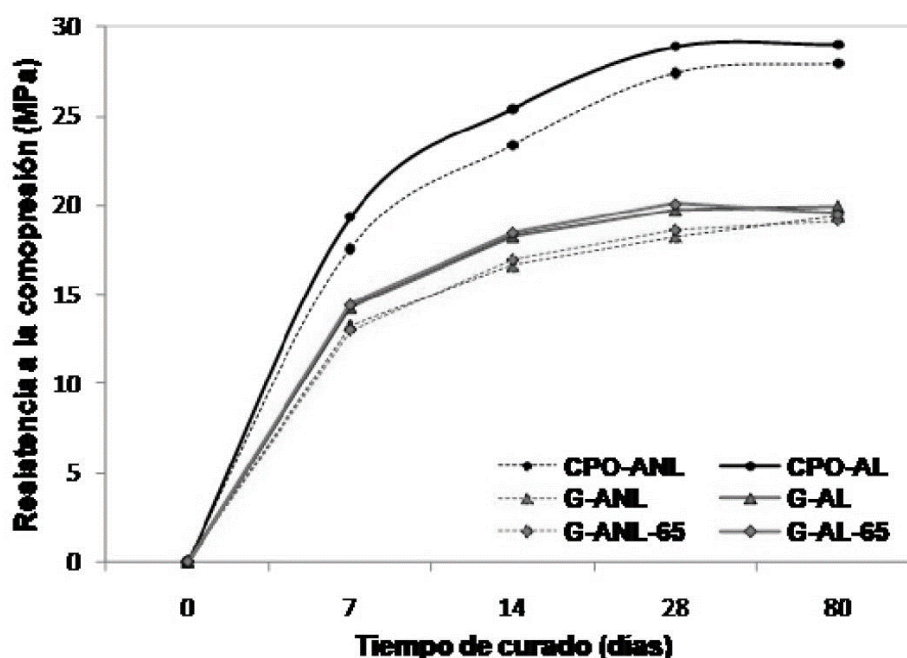


Ilustración 74. Resistencia a la compresión de morteros en función del tiempo de curado.

Tomado de (Álvarez et al., 2021)

- CPO-ANL: Mezcla con cemento Portland y agregado natural liviano.
- CPO-AL: Mezcla con cemento Portland y agregado liviano (posiblemente con tratamiento).
- G-ANL: Geopolímero con agregado natural liviano.

- G-AL: Geopolímero con agregado liviano.
- G-ANL-65: Geopolímero con agregado natural liviano curado a 65 °C.
- G-AL-65: Geopolímero con agregado liviano curado a 65 °C.

Preparación de probetas de mampuestos utilizando CP, GPP y GPP+PL

A partir de la dosificación de pastas descrita en el apartado anterior y conforme a los lineamientos establecidos en las normativas que se detallan posteriormente, se elaboraron probetas en forma de elementos prefabricados con las siguientes dimensiones: ladrillos de 33 × 15 × 9 cm, bloques de 40 × 15 × 20 cm. Para su fabricación, las mezclas se vertieron en moldes previamente humedecidos y fueron compactadas, con el fin de asegurar una adecuada consolidación de la masa. Posteriormente, las probetas fueron desmoldadas tras 24 horas y sometidas a un proceso de curado en condiciones controladas de temperatura y humedad durante 28 días.

Compresión, flexión y absorción de ladrillos prefabricados

Para la compresión siguió la normativa ecuatoriana NTE INEN 294, la cual indica el procedimiento para la determinación de la resistencia a la compresión de ladrillos cerámicos utilizados en la construcción, con el objetivo de garantizar su calidad y seguridad estructural. Esta norma técnica ecuatoriana especifica los requisitos, condiciones de preparación, acondicionamiento y ensayo de los especímenes, así como la forma de cálculo e interpretación de los resultados en concordancia con lo estipulado por otras normativas nacionales e internacionales como la ASTM C67 y la UNE-EN 772-1.

Para la flexión se siguió la norma ecuatoriana NTE INEN 295, la cual describe el método para determinar la resistencia a la flexión de ladrillos cerámicos, evaluando su capacidad para soportar cargas transversales. El ensayo consiste en aplicar una carga en tres puntos sobre la cara más larga de un ladrillo apoyado horizontalmente, midiendo la carga máxima hasta la rotura. La resistencia a la flexión se calcula mediante una fórmula que considera la carga máxima, la distancia entre apoyos y las dimensiones del ladrillo. La norma especifica la preparación de las muestras (secado, número mínimo de 10), el acondicionamiento ambiental y el reporte de resultados (promedio, mínimo y desviación estándar), permitiendo clasificar los ladrillos según su comportamiento a flexión.

Para la absorción se siguió la norma ecuatoriana NTE INEN 296, la cual establece el método para determinar la absorción de humedad de ladrillos cerámicos. El procedimiento implica secar probetas hasta masa constante y luego sumergirlas en agua durante un periodo específico (generalmente 24 horas). La absorción se calcula como el porcentaje de aumento de masa entre el ladrillo húmedo y el seco. La norma requiere un mínimo de cinco especímenes y el promedio de los resultados, donde un alto porcentaje de absorción sugiere una mayor porosidad y potencial menor durabilidad ante la exposición a la humedad y otros agentes.

Compresión, flexión y absorción de bloques prefabricados CP, GPP y GPP+PL

Para determinar la resistencia a la compresión se utilizó para la investigación los lineamientos de la normativa ecuatoriana NTE INEN 3067:2017, requiriendo el ensayo de un mínimo de cinco especímenes por lote. El método implicó aplicar una carga axial creciente hasta la rotura del bloque, dividiendo la carga máxima por el área bruta para calcular la resistencia, cumpliendo los requisitos para el equipo, la preparación de las muestras, la velocidad de carga y el cálculo de los resultados.

Se siguió lo establecido en la normativa ecuatoriana NTE INEN 3068:2017 para determinar la resistencia a la flexión (módulo de rotura) de bloques, requiriendo el ensayo de un mínimo de cinco especímenes por lote. El procedimiento implica apoyar el bloque en dos puntos y aplicar una carga en el centro hasta la fractura, midiendo la carga máxima para calcular su módulo de rotura.

Para determinar el porcentaje de absorción se siguió la normativa ecuatoriana NTE INEN 3069:2017, la cual requiere para el ensayo el ensayo de un mínimo de tres especímenes por lote. El procedimiento consiste en secar los bloques hasta masa constante, sumergirlos en agua durante 24 horas y calcular el porcentaje de aumento de masa respecto a la masa seca inicial.

4.2.6. Mampostería confinada de ladrillos prefabricados con GPP+PL para el diseño de edificaciones siguiendo la normativa ecuatoriana NEC-SE-DS, 2015

Según lo establecido en la Norma Ecuatoriana de la Construcción – Parte 6 (NEC-SE-MC), las unidades utilizadas en la construcción de muros de mampostería confinada deben cumplir con valores mínimos de resistencia a la compresión para garantizar un comportamiento estructural seguro. Esta resistencia se define como la fuerza máxima de rotura aplicada axialmente dividida entre el área bruta de la unidad, independientemente de su geometría o nivel de perforación. Los valores mínimos establecidos son: 2 MPa para ladrillos macizos, y 3 MPa tanto para bloques de arcilla de perforación horizontal como para bloques de perforación vertical de hormigón o arcilla (MIDUVI, 2015).

La normativa ecuatoriana de construcción establece que los muros no deben exceder una longitud de 25 veces su espesor, con un espacio máximo de confinamiento entre columnas de 4 metros. Asimismo, el espesor mínimo de los muros debe ser de 10 cm, como se muestra en la Ilustración 71, y las columnas de confinamiento deben contar con una sección transversal mínima de 200 cm². Adicionalmente, se especifica que la sección de las vigas no puede ser menor que el espesor del muro.

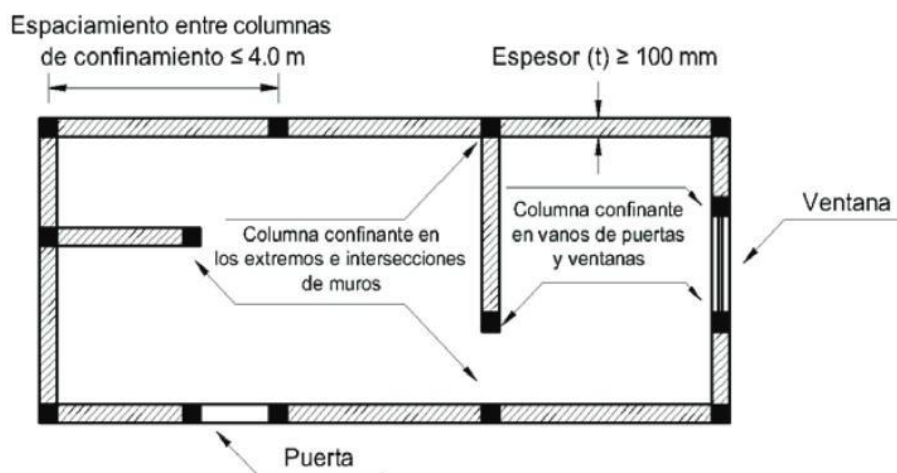


Ilustración 75. Requisitos fundamentales en viviendas de mampostería confinada

Tomado de (MIDUVI, 2015)

Estas exigencias normativas coinciden con estándares internacionales como los del ACI 530/ASCE 5/TMS 402, los cuales también fijan límites mínimos para asegurar la integridad estructural de la mampostería ante cargas gravitacionales y sísmicas. Tal como indican Drysdale et al. (1999), una resistencia a la compresión adecuada no solo influye en la capacidad de carga vertical, sino que también mejora la adherencia con el mortero, el desempeño frente a cargas laterales y la ductilidad global del sistema. Adicionalmente, la resistencia mínima especificada actúa como criterio de aceptación para el control de calidad de unidades prefabricadas, garantizando uniformidad en la respuesta mecánica de los muros, especialmente en zonas de alta sismicidad como el Ecuador (Meli & Brzev, 2014).

El diseño estructural desarrollado se enfocó en el uso de mampostería confinada, priorizando los muros de confinamiento como elemento clave del sistema. Este enfoque se debió a que la normativa vigente no contempla especificaciones para el diseño de vigas, columnas o losas construidas con materiales a base de geopolímeros, ya que estas regulaciones están diseñadas exclusivamente para elementos de hormigón armado.

En este contexto, la mampostería confinada se presentó como la opción más viable para el diseño estructural, ya que durante el desarrollo de la investigación se centraron los estudios y ensayos en mampuestos elaborados con geopolímero. Este material, utilizado en los muros, demostró un comportamiento mecánico adecuado y cumplió con los requisitos mínimos de resistencia establecidos por la normativa para sistemas de mampostería.

El enfoque en los muros de confinamiento permitió aprovechar las propiedades del geopolímero y garantizar un diseño seguro y funcional dentro de las limitaciones normativas actuales.

Para este diseño estructural de mampostería confinada se consideró un pórtico de dos pisos con una altura de entre piso de 2.50m, dos luces en el sentido XX y dos luces en el sentido YY de 4m cada una de ellas ya que es lo mínimo que indica la norma.

Posteriormente, se incorporó un muro de mampostería confinada con características tradicionales, comprobando que la estructura se comporta de manera adecuada.

Para introducir el mampuesto de geopolímero en el modelo estructural, se definió una nueva propiedad mecánica basada en la resistencia a la compresión de la mampostería de geo polímeros. Se adoptó un valor de resistencia característica a compresión de $f'_c=4.76$ MPa, en concordancia con la normativa ecuatoriana NEC-SE-MP y con base en resultados experimentales preliminares. Adicionalmente, se consideró un módulo de Poisson de 0.25, según lo reportado en estudios previos (Villariquán et al., 2013) y (Juenger et al., 2011)

En este diseño, se incluyeron las propiedades de la mampostería de geopolímero, destacando el módulo de elasticidad, que fue calculado a partir de la sección transversal de los ladrillos y una fuerza aplicada conocida. Además, según Davidovits, (2018), los geopolímeros al igual que los cementos tradicionales, presentan un rango de deformación unitaria máxima antes de la fractura de aproximadamente 0.0020 bajo condiciones normales de carga, lo que resulta crucial para garantizar un diseño seguro y eficiente con valor de módulo de elasticidad de $E=2.38$ MPa.

4.3. Resultados y discusión

4.3.1. Fluidez en pastas y morteros

Se tomó como dosificación para un mortero tradicional la relación 1:3 con una relación agua/conglomerante de 0,7. El conglomerante utilizado fue el CP, el GPP descrito en el capítulo 2 y el GPP+PL siguiendo las recomendaciones de Cajamarca et al. 2023. Adicionalmente en el laboratorio se midió el diámetro interior inferior inicial con un valor de 98.45 mm.

Tabla 57. Fluidez de morteros

Lecturas	Mortero con CP (mm)	Mortero con GPP (mm)	Mortero con GPP+PL (mm)
D1	209	210	209
D2	210	210	210
D3	218	209	215
D4	214	202	208
Dint	98,45	98,45	98,45
A	114	109	112
Fluidez	116,10	111,02	113,81

La fluidez del mortero es un factor necesario en su trabajabilidad y aplicación en diversas construcciones. Como se observa en la Tabla 57, el mortero tradicional con una fluidez de 116,10 mm, el GPP con 111,02 mm y el GPP+PL con 113,81 mm se encuentran dentro del rango

de 100 a 120 mm, lo que indica una consistencia media o plástica, según las clasificaciones establecidas en normativas como la NTE INEN 2502 (2009) y la ASTM C1437-20. Esta consistencia es favorable para su manipulación manual con herramientas como palas y palustres (Neville & Brooks, 2021). Estudios previos han demostrado que una fluidez en este rango mejora la adhesión y compactación del mortero, optimizando su desempeño en aplicaciones estructurales y decorativas (Mehta & Monteiro, 2019). Motivo por el cual se evaluó y comparó a la compresión morteros con pastas de CP, GPP y GPP+PL para conocer cual presenta mejor alternativa en el diseño de mampuestos.

4.3.2. Preparación de pastas y morteros con CP, GPP y GPP+PL

La Tabla 58 presenta el diseño experimental que se llevó a cabo en este capítulo, permitió evaluar las diversas propiedades físicas y mecánicas de pastas, morteros, ladrillos y bloques fabricados con tres tipos de matrices cementicias: CP, GPP y GPP+PL. Para cada ensayo (compresión, flexión, absorción y densidad), se especifica la forma (prismática), las dimensiones de los especímenes en milímetros, y el número de matrices (o repeticiones) realizadas para cada material conglomerante, permitiendo así determinar el número total de probetas ensayadas por propiedad según lo especificado en las normativas descritas anteriormente. Cabe señalar que en el caso de los morteros geopoliméricos, no se realizaron ensayos de densidad ni absorción, ya que, como se detalla más adelante en los resultados de resistencia a compresión, estos morteros presentaron valores significativamente inferiores en comparación con las pastas geopoliméricas. Debido a este bajo desempeño mecánico, se optó por no continuar con la caracterización completa de los morteros, enfocando el estudio únicamente en las pastas, las cuales demostraron un comportamiento estructural más prometedor. Esta decisión metodológica permitió centrar los recursos y esfuerzos experimentales en el material con mayor viabilidad para su uso en la elaboración de mampuestos.

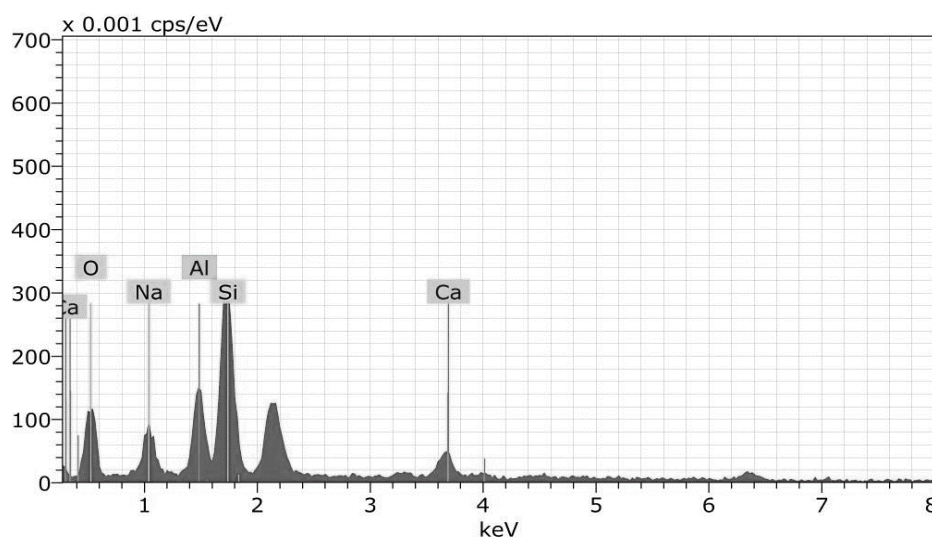
El diseño experimental permitió comparar el comportamiento de los diferentes materiales conglomerantes en las distintas formas de mampuestos y pastas, utilizando un número definido de réplicas para cada condición con el fin de obtener resultados estadísticamente significativos.

Tabla 58. Actividades realizadas en el proyecto de investigación

Ensayo	Forma	Dimensiones (mm)	No. matrices de CP	No. matrices GPP	No. matrices GPP+PL	Total
Compresión pastas	Prisma	40x40x160	6	6	6	18
Compresión morteros	Prisma	40x40x160	6	6	6	18
Flexión pastas	Prisma	40x40x160	6	6	6	18
Absorción en pastas	Prisma	40x40x160	3	3	3	9
Densidad en pastas	Prisma	40x40x160	3	3	3	9
Compresión en ladrillos	Prisma	330x150x90	10	10	10	30
Flexión en ladrillos	Prisma	330x150x90	10	10	10	30
Flexión en bloques	Prisma	400x150x200	10	10	10	30
Microscopia óptica pastas	Prisma	10x10x60	1	1	1	3

4.3.3. Composición elemental de las pastas con CP, GPP y GPP+PL

En la Ilustración 76 se presenta el resultado del análisis por energías dispersivas de rayos X por medio del microscopio electrónico de barrido (SEM) realizada al CP hidratado.

**Ilustración 76.** Composición elemental de pasta de CP a los 28 días.

La presencia dominante de silicio (Si), oxígeno (O), aluminio (Al) y calcio (Ca) es altamente indicativa de la composición elemental del CP hidratado. Estos elementos son los constituyentes principales de los silicatos de calcio hidratados (C-S-H), el hidróxido de calcio (Ca(OH)_2) o portlandita, los aluminatos de calcio hidratados y los sulfoaluminatos de calcio hidratados (etringita), que son los principales productos de hidratación responsables de las propiedades aglomerantes del CP (Taylor, 1997). La presencia de sodio (Na) podría deberse a impurezas en las materias primas utilizadas en la fabricación de la pasta.

La microestructura y la composición elemental de las pastas, incluyendo la proporción relativa de estos elementos, afectan directamente las propiedades mecánicas (resistencia a la compresión, flexión), la durabilidad (resistencia a la penetración de iones cloruro, sulfatos), la permeabilidad y la estabilidad volumétrica del hormigón y el mortero elaborados con CP

(Powers, 1968). Por lo tanto, el control de la composición elemental es necesario para garantizar las propiedades deseadas en las aplicaciones de construcción.

En la Ilustración 77 se presenta la microscopio electrónico de barrido (SEM) realizada al GPP.

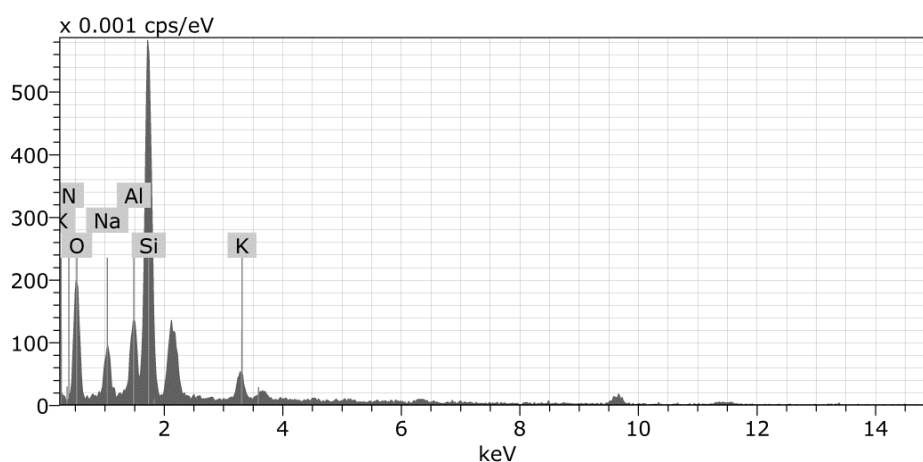


Ilustración 77. Composición elemental de pasta de GPP a los 28 días.

El análisis elemental de GPP de piedra pómez muestra una composición rica en silicio (Si), oxígeno (O) y aluminio (Al), elementos fundamentales en la formación de la red geopolimérica inorgánica tras la activación alcalina (Davidovits, 1991). La presencia de sodio (Na) y potasio (K) es atribuible a los activadores alcalinos y precursor empleados, un efecto positivo en la disolución inicial de los aluminosilicatos (Provis, 2018).

En la Ilustración 78 se presenta la microscopio electrónico de barrido (SEM) realizada al al GPP+PL.

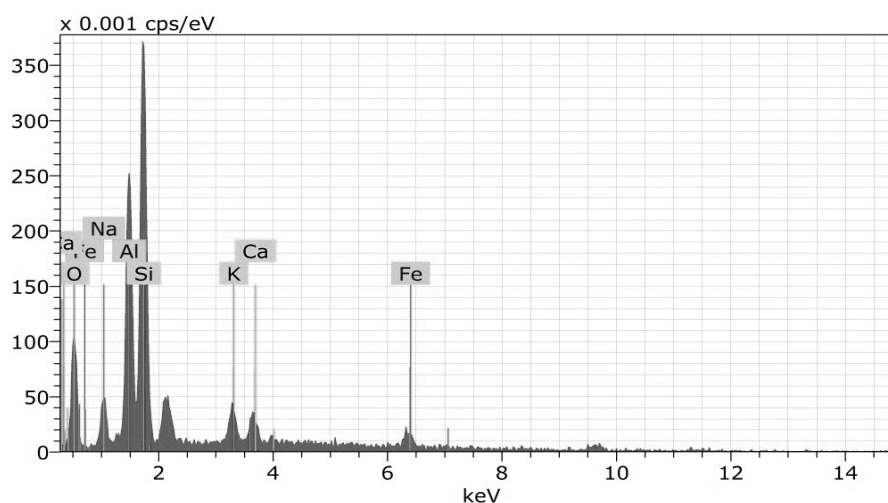


Ilustración 78. Composición elemental de pasta de GPP+PL a los 28 días.

La composición elemental del GPP+PL se caracteriza, al igual que el GPP, por un alto contenido de silicio (Si) y aluminio (Al) junto con oxígeno (O). Sin embargo, al comparar el

GPP+PL con el GPP, se observa un incremento en la proporción de aluminio y la aparición de hierro en su composición. Esta variación se debe a la incorporación del polvo de ladrillo (arcilla cocida), el cual contiene óxidos de aluminio, silicio y hierro que pueden participar en las reacciones geopoliméricas, modificando las propiedades del material resultante (Temuujin et al., 2009). Estudios han demostrado que la incorporación de residuos de arcilla cocida en geopolímeros puede mejorar la resistencia a la compresión y reducir la absorción de agua en ciertos rangos de dosificación.

En el contexto de la construcción, la utilización de geopolímeros basados en piedra pómez y polvo de ladrillo como material conglomerante para mampuestos ofrece una alternativa más sostenible al CP. La presencia de sílice y alúmina proveniente de ambos precursores contribuye a la formación de la matriz geopolimérica, mientras que la incorporación de polvo de ladrillo puede influir en la trabajabilidad, la resistencia mecánica y la durabilidad del mampuesto.

En la Ilustración 79 se presenta micrografías obtenidas mediante SEM. La primera Ilustración 79 a) (CP) corresponde a la matriz de CP hidratado con agua, mostró una textura relativamente densa con la presencia de productos de hidratación como los silicatos de calcio hidratados (C-S-H) que forman una estructura interconectada, aunque también se observan microfisuras y poros dispersos, característicos de la hidratación del cemento (Taylor, 1997). La Ilustración 79 b) (GPP) presenta la microestructura del geopolímero de piedra pómez activado con hidróxido de sodio y silicato de sodio. Se aprecia una morfología más porosa y menos homogénea en comparación con el CP, con partículas de piedra pómez parcialmente reaccionadas inmersas en una matriz geopolimérica. Se observa una estructura menos densa y con una mayor presencia de huecos, lo que podría influir en sus propiedades mecánicas y de transporte (Provis, 2018).

La Ilustración 79 c) (GPP+PL) muestra la microestructura del geopolímero de piedra pómez con polvo de ladrillo, activado con la misma solución alcalina, se observa una textura más densa y compacta en comparación con el GPP, con una aparente reducción en la porosidad. La incorporación del polvo de ladrillo (arcilla cocida finamente molida) actuó como un relleno, disminuyendo los huecos y contribuyendo a una microestructura más refinada al participar en las reacciones geopoliméricas (Temuujin et al., 2009).

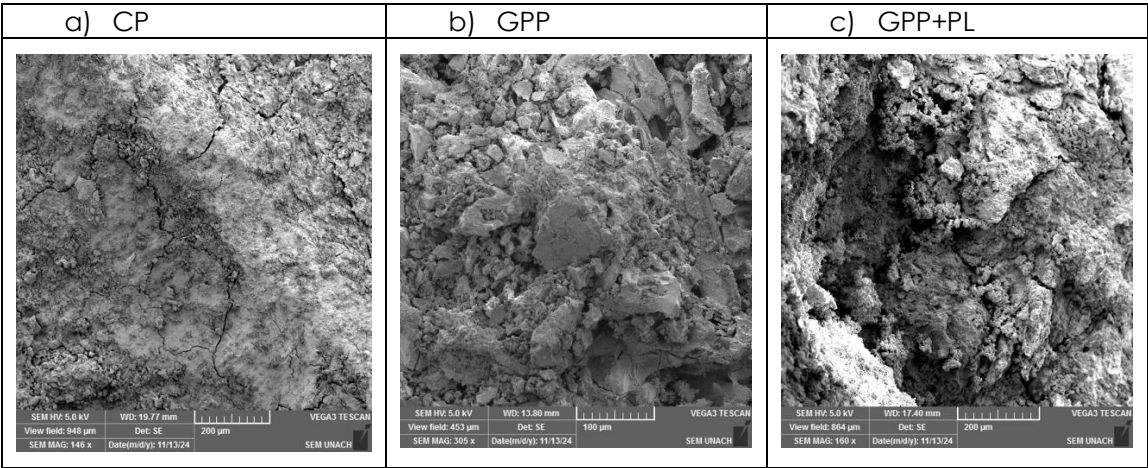


Ilustración 79. Micrografías SEM de CP, GPP y GPP+PL

Los resultados mostrados podrían explicar las diferencias en las propiedades macroscópicas reportadas en estudios previos, como la mayor resistencia a la compresión y menor absorción de agua encontradas en materiales geopoliméricos con adiciones de arcilla cocida (Wang et al., 2016). El CP, con su matriz hidratada más densa, generalmente exhibe buenas propiedades mecánicas y durabilidad, aunque su producción está asociada a una mayor huella de carbono en comparación con los geopolímeros. Por otro lado, la porosidad observada en el GPP podría ser un factor limitante para su resistencia y durabilidad en ciertas aplicaciones. Mientras que microestructura densa del GPP+PL podría dificultar la penetración de agua y otros agentes, mejorando su durabilidad.

4.3.4. Propiedades mecánicas de pastas y morteros con CP, GPP y GPP+PL

Compresión de pastas y morteros con CP, GPP y GPP+PL

Se realizó ensayos de compresión a los 14 y 28 días, a continuación, en la Ilustración 80 se representa el valor de sus valores medios.

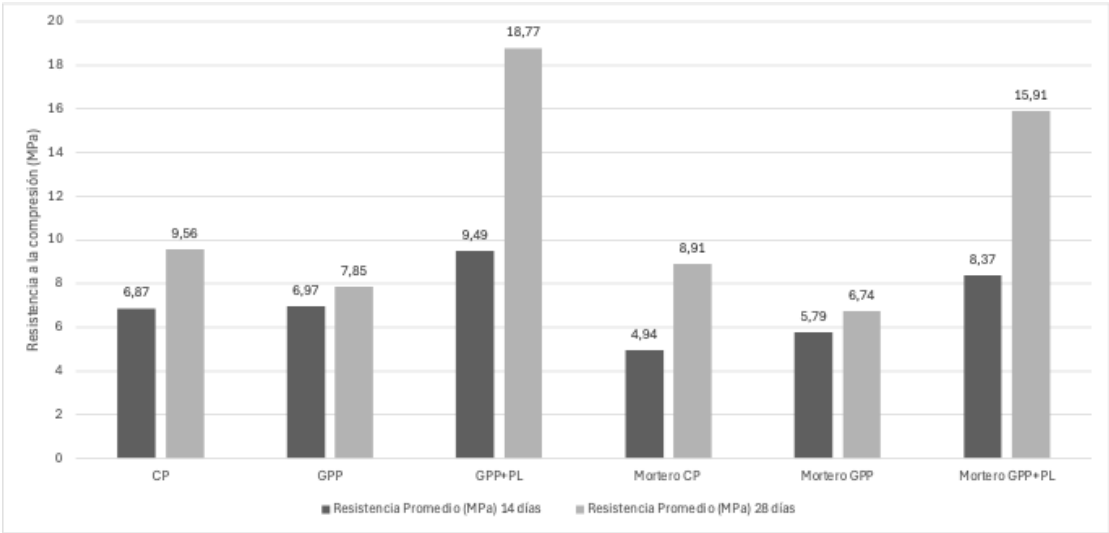


Ilustración 80. Resistencia a compresión a la edad de 14 y 28 días en pastas y morteros.

En la ilustración anterior se puede observar un aumento en la resistencia promedio desde los 14 hasta los 28 días en todas las muestras, lo cual se da por el proceso de hidratación de la matriz y el desarrollo de la microestructura (Mehta & Monteiro, 2014). A los 14 días, las resistencias de las mezclas con GPP son similares o incluso ligeramente superiores a las de CP debido a que se utilizó la misma relación a/mc con la que se activó el PL. Sin embargo, a los 28 días, las mezclas que incorporan GPP+PL exhiben resistencias significativamente mayores (18.77 MPa y 15.91 MPa) en comparación con sus contrapartes sin PL (7.85 MPa y 6.74 MPa para GPP y Mortero GPP, respectivamente) y las mezclas de CP (9.56 MPa y 8.91 MPa para CP y Mortero CP, respectivamente). Esto indica que la adición de PP en combinación con el PL, tiene un efecto sinérgico muy positivo en el desarrollo de la resistencia a largo plazo (Malhotra & Mehta, 2005). Dado este comportamiento positivo de las pastas frente a los morteros, se consideró pertinente continuar con la evaluación de las propiedades mecánicas y microestructurales de las pastas de CP, GPP y GPP+PL, con el fin de determinar su viabilidad para aplicaciones de mampostería confinada con ladrillos prefabricados.

Flexión de pastas de CP, GPP y GPP+PL

Se realizó ensayos de flexión a los 14 y 28 días, a continuación, en Ilustración 81 se representa el valor de sus valores medios. Cabe precisar que no se llevaron a cabo pruebas de flexión en morteros, dado que al evaluar su comportamiento final se determinó que las pastas presentaban un desempeño más favorable y representativo en la resistencia a la compresión, por lo que para este caso solo se analizaron las pastas.

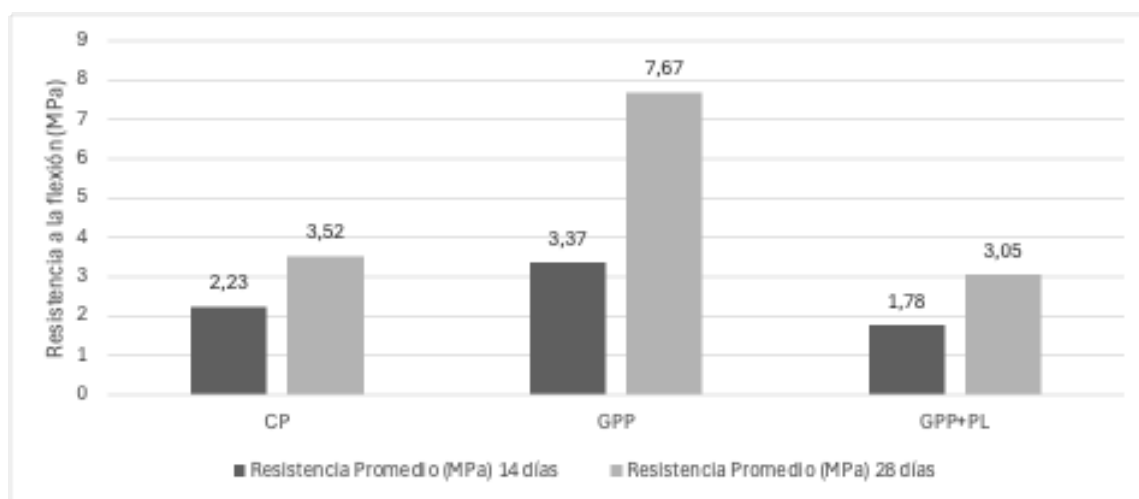


Ilustración 81. Resistencia a flexión a la edad de 14 y 28 días en pastas.

En la Ilustración 81 se observa un aumento en la resistencia a la flexión entre los 14 y los 28 días para las tres pastas, lo cual es un comportamiento esperado en estos materiales. A los 14 días, la mezcla CP presenta una resistencia de 2.23 MPa, la GPP alcanza 3.37 MPa, y la GPP+PL muestra el valor más bajo con 1.78 MPa. Sin embargo, a los 28 días, la mezcla GPP exhibe la resistencia más alta con 7.67 MPa, seguida por CP con 3.52 MPa, mientras que GPP+PL muestra

una mejora, pero se mantiene en 3.05 MPa. Estos resultados indican que el GPP tiene un desarrollo de resistencia a largo plazo significativamente mayor en comparación con el CP convencional. La adición de PL en la mezcla parece muestra un efecto negativo en la resistencia a los 14 días y, aunque mejora a los 28 días, no alcanza los valores de la mezcla GPP sola.

Densidad y absorción de pastas CP, GPP y GPP+PL

La Ilustración 82 presenta los valores de densidad aparente obtenidos tras 28 días de curado para los tres tipos de probetas evaluadas. Se muestran los valores medios calculados a partir de las mediciones individuales de las nueve muestras analizadas correspondientes a cada mezcla.

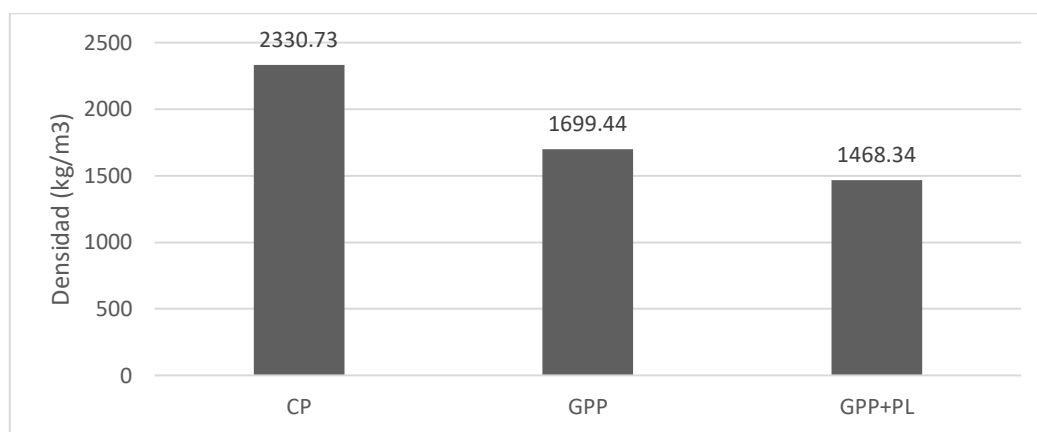


Ilustración 82. Densidad de pastas a los 28 días.

El CP presentó la mayor densidad con un valor de 2330,73 kg/m³, mientras que el geopolímero elaborado con piedra pómez (GPP) alcanzó 1699,44 kg/m³. Por su parte, el geopolímero modificado con polvo de ladrillo (GPP+PL) mostro la densidad más baja, de 1468,34 kg/m³. Esta disminución progresiva de la densidad evidencia la naturaleza más ligera y porosa de los GPP en comparación con los conglomerantes hidráulicos tradicionales como el CP, debido principalmente a la composición de las materias primas, su menor contenido de fases cristalinas densas y la microestructura típicamente más abierta del producto de reacción alcalina (Provis & van Deventer, 2014).

En particular, la adición de polvo de ladrillo puede intensificar este efecto, ya que se trata de un material cerámico altamente poroso y de baja densidad, que no solo reduce el peso específico del sistema, sino que también puede influir en la distribución y tamaño de los poros en la matriz endurecida (Adesanya et al., 2019). Esto favorece la formación de una estructura más abierta, con mayor volumen de vacíos interconectados, lo que contribuye a la reducción de la densidad total del material. Sin embargo, esta modificación estructural puede comprometer ciertas propiedades mecánicas, por lo que debe evaluarse en función del uso previsto del geopolímero. (Davidovits, 2011; Palomo, Grutzeck & Blanco-Varela, 1999).

En la Ilustración 83 que se muestra a continuación, se presentan los resultados del ensayo de absorción obtenidos para los tres tipos de probetas evaluadas. Se muestran los valores medios calculados a partir de las mediciones individuales de las nueve muestras analizadas correspondientes a cada mezcla.

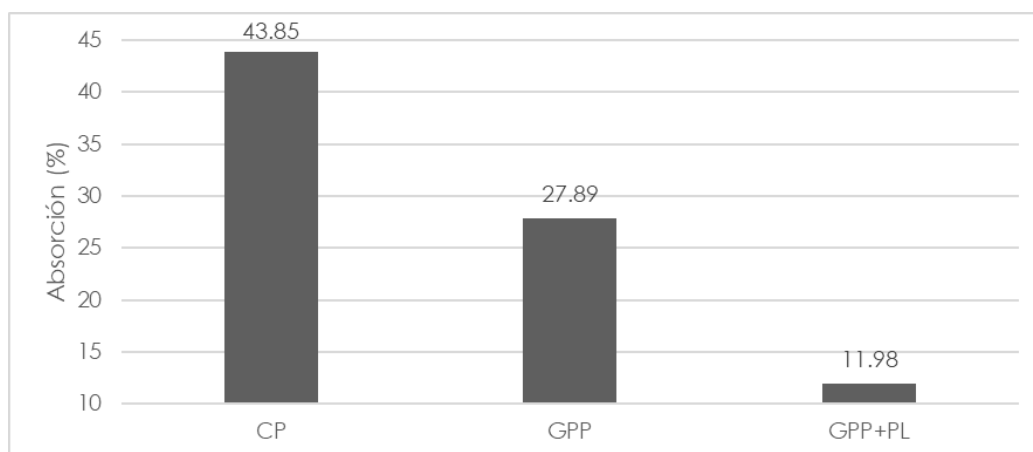


Ilustración 83. Absorción de pastas a los 28 días.

Se observó que el CP presentó el porcentaje de absorción más alto, alcanzando un 43,85%. Seguido del GPP con un porcentaje de absorción menor, situándose en 27,89%. El material con el porcentaje de absorción más bajo fue GPP+PL, con un valor de 11,98%. Estos resultados muestran que la incorporación de PP y, especialmente, la adición de PL a la matriz geopolimérica redujeron considerablemente la capacidad de absorción de agua en comparación con el CP. La adición de residuos cerámicos como el polvo de ladrillo en matrices geopoliméricas ha demostrado influir significativamente en las propiedades físicas del material, incluyendo la densidad y la absorción de agua. Según investigaciones recientes, estos residuos pueden modificar la microestructura, favoreciendo la formación de una red porosa más heterogénea que impacta directamente en la capacidad de absorción del material (García-Lodeiro et al., 2024). La menor absorción de agua es generalmente deseable en materiales de construcción, ya que se asocia con una mayor durabilidad y resistencia a los ciclos de hielo-deshielo y a la penetración de sustancias dañinas.

4.3.5. Resistencia a la compresión y flexión de mampuestos prefabricados elaborados con CP, GPP y GPP+PL

Compresión de mampuestos con CP, GPP y GPP+PL

La Ilustración 84 representa los valores de resistencia a la compresión (MPa) de elementos de mampostería (ladrillos y bloques) curados a 14 y 28 días, fabricados con tres tipos de mezclas: CP, GPP y GPP + PL. Se observa que los mayores valores de resistencia corresponden a los elementos con CP, alcanzando 6 MPa tanto en ladrillos y 3MPa en bloques después de 28

días. Mientras que los materiales con GPP y GPP + PL presentan una reducción considerable en la resistencia, especialmente a 14 días, donde los bloques con GPP + PL apenas alcanzan 1,31 MPa. Sin embargo, tras 28 días, los valores aumentan significativamente, especialmente en los ladrillos con GPP + PL, que alcanzan 4,76 MPa, lo cual sugiere un desarrollo progresivo de la resistencia en materiales alternativos.

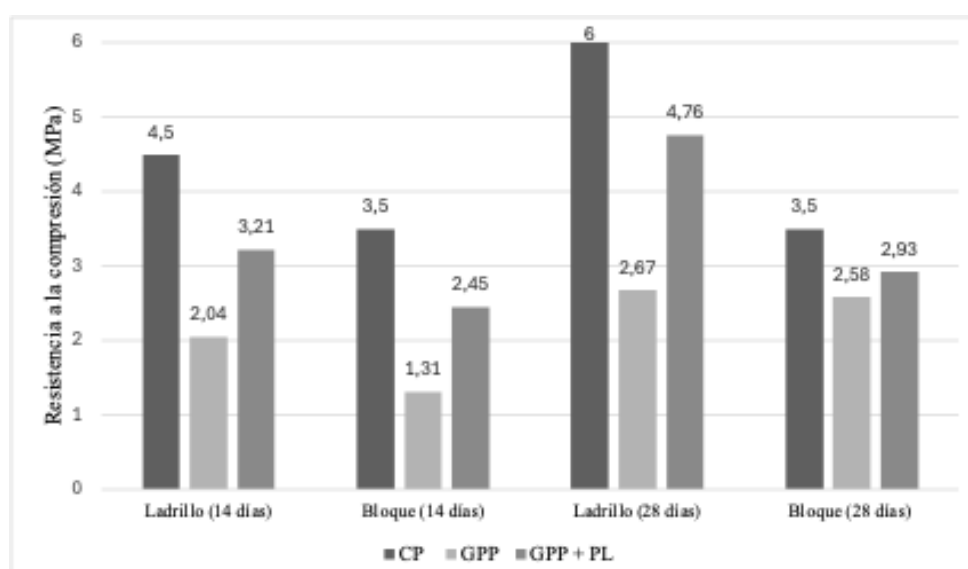


Ilustración 84. Resistencia a la compresión de mampuestos.

Estos resultados indican que igual que en las pastas, la adición de polvo de PL al GPP tiene un efecto positivo en el desarrollo de la resistencia a la compresión en el tiempo, coincidiendo con lo reportado por Davidovits (1991), quien señala que los geopolímeros requieren tiempos de curado más prolongados para alcanzar propiedades mecánicas óptimas. Este incremento podría atribuirse a una mayor reactividad de la mezcla o a una microestructura más densa generada por la incorporación del polvo de ladrillo (Duxson et al., 2007).

Por otro lado, el CP muestra un buen desempeño en resistencia a la compresión en las dos tipologías de mampuestos, lo cual es consistente con su amplio uso y conocimiento en la industria de la construcción (Mehta & Monteiro, 2014). La menor resistencia observada en los mampuestos elaborados únicamente con GPP podría deberse a una cinética de reacción más lenta o a una menor densidad de la matriz geopolimérica en las condiciones de curado empleadas (Davidovits, 1991). Por tanto, si bien los geopolímeros modificados no igualan al CP en resistencia inicial, pueden considerarse viables en aplicaciones constructivas que no requieran altas resistencias, favoreciendo una construcción más sostenible.

Flexión de mampuestos CP, GPP y GPP+PL

La Ilustración 85 muestra los resultados de resistencia a la flexión (MPa) en ladrillos y bloques fabricados con tres tipos de aglomerantes: CP, GPP y GPP + PL, evaluados a los 28 días de curado. Los resultados indican un comportamiento diferenciado según el tipo de elemento: en ladrillos, el uso de GPP + PL alcanza el mayor valor de resistencia (1,18 MPa), superando significativamente al CP (0,51 MPa) y al GPP (0,8 MPa), lo que indica una mejora en la ductilidad y capacidad de absorción de esfuerzos flexionantes debido a la incorporación del PL; en bloques, aunque el GPP + PL también presenta el mayor valor (0,52 MPa), las diferencias respecto al CP (0,45 MPa) y GPP (0,41 MPa) son mínimas, lo que podría atribuirse a la geometría, densidad o compactación del bloque, considerando que al tener mayor masa y una mayor proporción de agregado en su composición, la mezcla tiende a ser menos compacta y, por tanto, menos favorable para alcanzar resistencias a flexión tan destacadas como en el caso de los ladrillos.

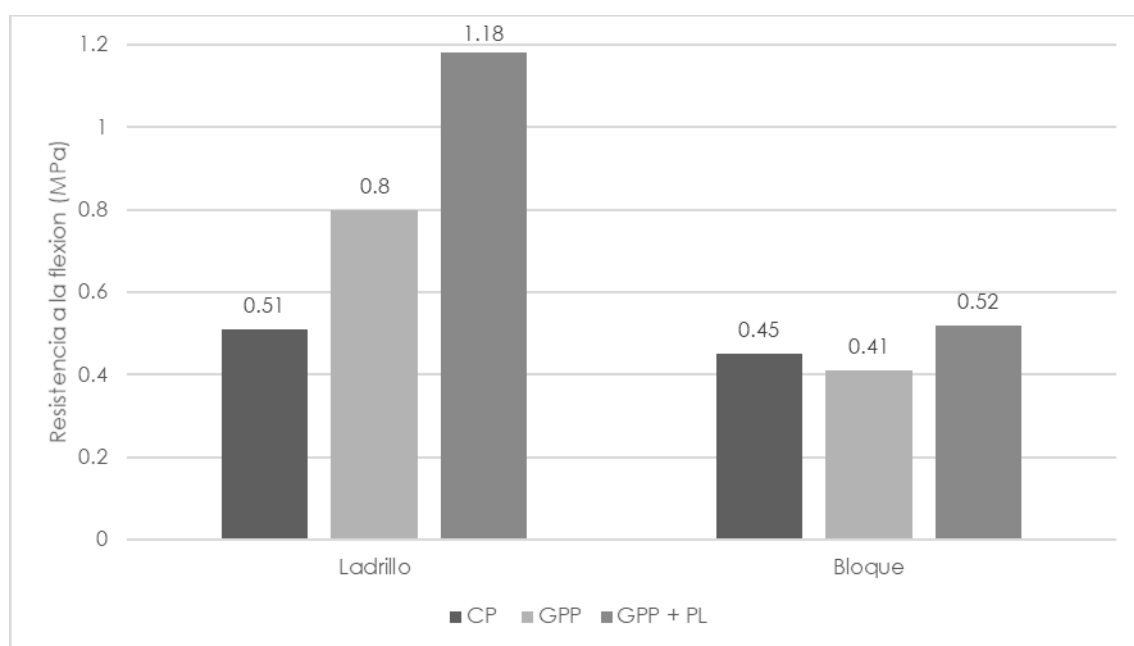


Ilustración 85. Resistencia a la flexión de mampuestos.

Los resultados mostrados coinciden con estudios como los de Zhang et al. (2020) y Asokan et al. (2010), quienes argumentan que la adición de materiales ricos en sílice y aluminio puede actuar como refuerzo interno, mejorando el comportamiento mecánico frente a la flexión, gracias a su capacidad de redistribuir tensiones y aumentar la energía absorbida antes de la fractura. Esta mejora es particularmente efectiva en elementos más pequeños o con mayor relación superficie-volumen, como los ladrillos por su área.

4.4. Análisis de mampostería confinada de ladrillos prefabricados con GPP+PL para el diseño de edificaciones siguiendo la normativa ecuatoriana NEC-SE-DS, 2015

En la Ilustración 86 se presenta el modelado de un diseño estructural de mampostería confinada con características de ladrillos convencionales (pastas de GPP+PL) utilizadas en la misma. Los muros de confinamiento tienen un ancho de 10 cm, cumpliendo con el mínimo establecido por la norma. Para este modelo, se consideró una resistencia de 5.2 MPa obtenida en el laboratorio, correspondiente a un ladrillo macizo convencional (NEC-SE-MP, 2014).

Las vigas de confinamiento cuentan con secciones de 10 cm x 10 cm, satisfaciendo el requisito de que su dimensión mínima sea igual al espesor del muro. Por su parte, las columnas de confinamiento también tienen una sección de 15 cm x 15 cm, garantizando un área de sección transversal de al menos 200 cm², tal como lo exige la normativa.

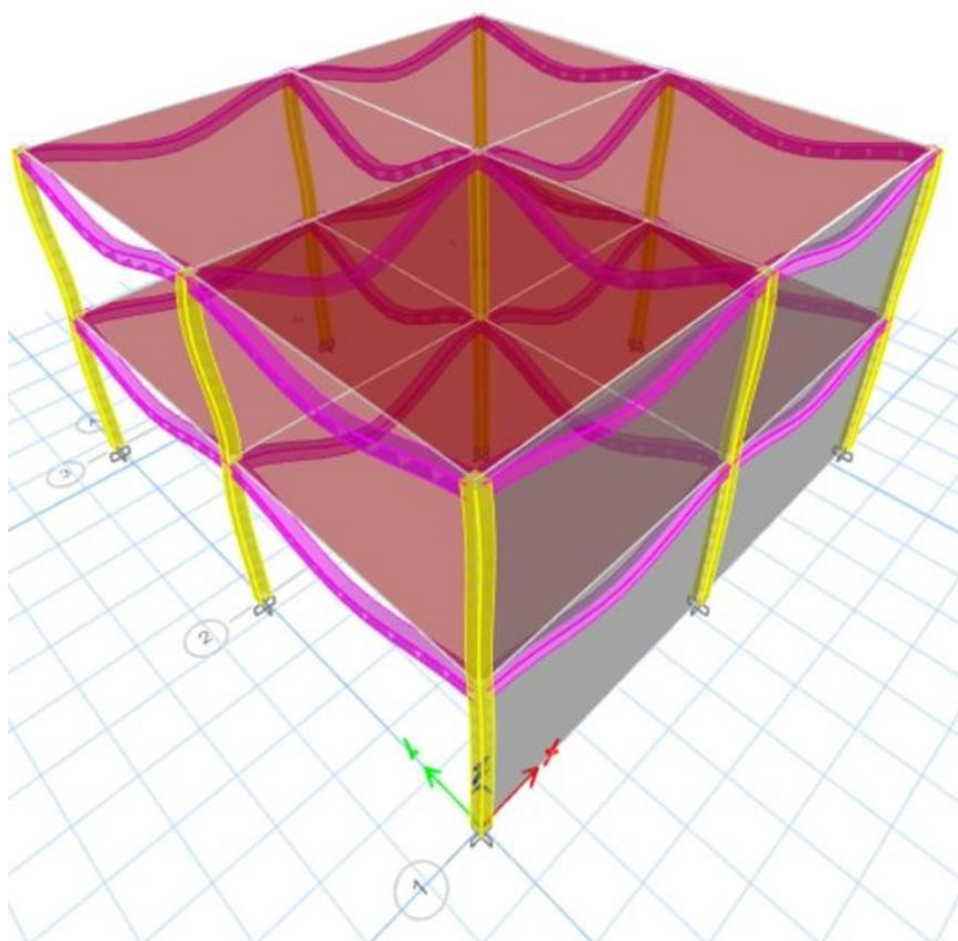


Ilustración 86. Modelado en ETABS de diseño estructural de mampostería confinada tradicional

En la Ilustración 87 se presenta un diseño estructural de mampostería confinada similar al de la figura 20, pero se observan los desplazamientos del muro. Los muros de confinamiento tienen el mismo ancho de 10 cm, cumpliendo con el mínimo establecido por la norma. En este

caso, la resistencia del material se consideró de 4.76 MPa, basada en las propiedades del geopolímero ensayado previamente.

Las vigas de confinamiento mantienen secciones de 10 cm x 10 cm, asegurando que su dimensión mínima coincida con el espesor del muro. Las columnas de confinamiento también conservan secciones de 15 cm x 15 cm, cumpliendo con el requisito de un área de sección transversal de al menos 200 cm², según lo normado.

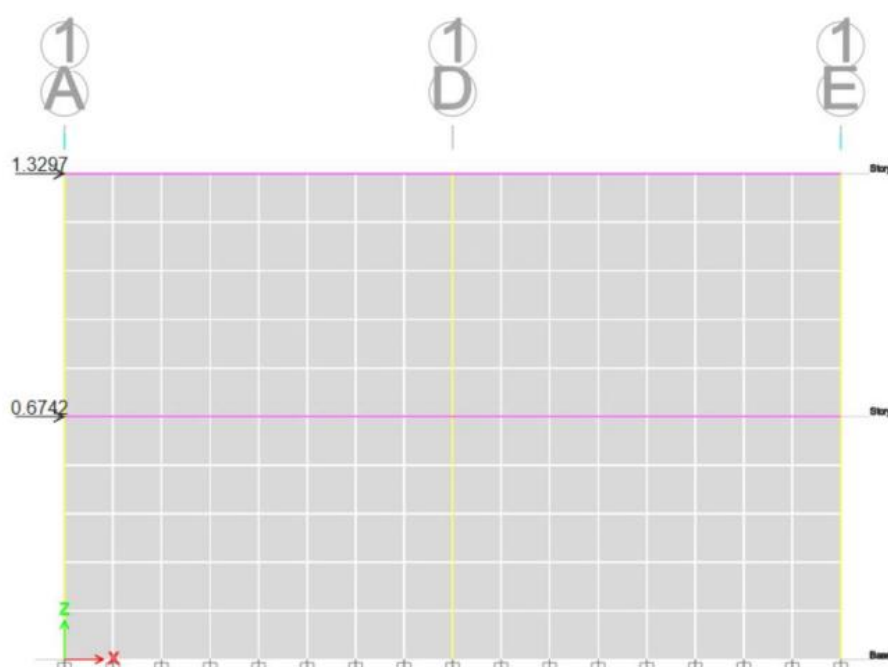


Ilustración 87. Modelado en ETABS de diseño estructural de mampostería confinada con geopolímero de PP.

El geopolímero elaborado a base de piedra pómez presentó un desempeño estructural comparable al de la mampostería confinada de ladrillo tradicional, sin evidenciar alteraciones significativas en el comportamiento global del sistema. Esto se refleja en la Ilustración 86, donde se comparan los desplazamientos máximos obtenidos: 0.000210 para el muro de mampostería tradicional como se observa en la Ilustración 88 y 0.000236 para el muro construido con geopolímero como se observa en la Ilustración 89. Estos valores permitieron calcular las derivas respectivas como lo muestra la Tabla 59, las cuales se contrastaron con los límites establecidos por la Norma Ecuatoriana de la Construcción – Diseño Sismo Resistente (NEC-SE-DS, 2015). Los resultados indican que ambos sistemas se mantienen dentro de los parámetros normativos aceptables, lo que valida la viabilidad del uso del geopolímero como material alternativo en sistemas de mampostería confinada.

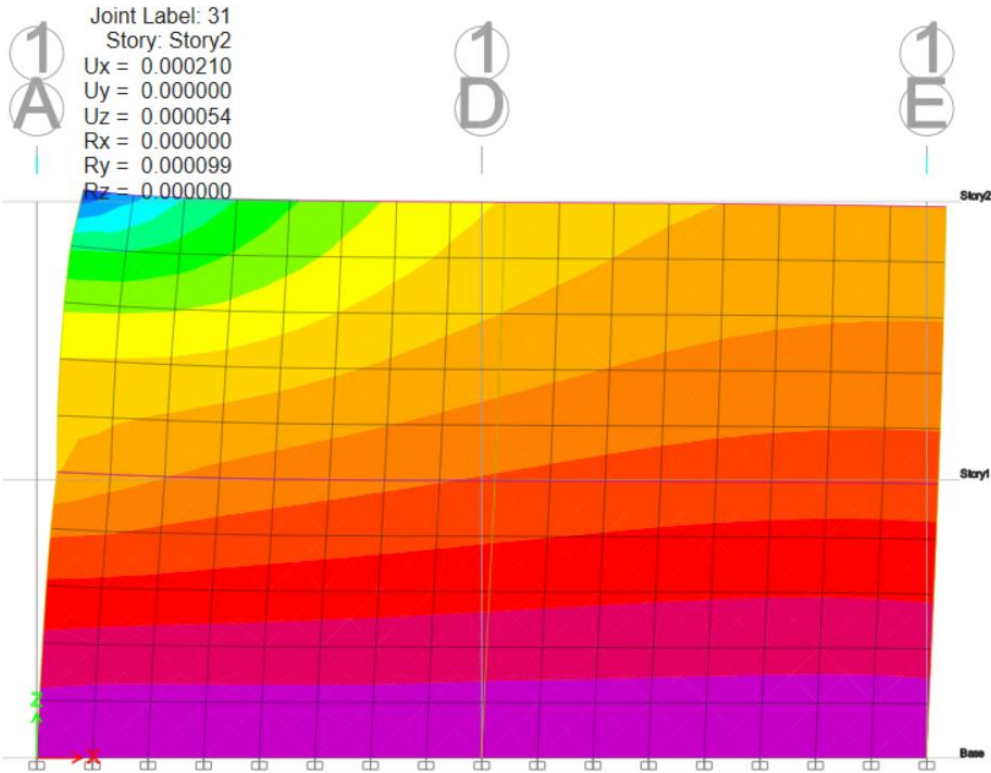


Ilustración 88. Desplazamiento del muro con mampostería confinada con propiedades convencionales.

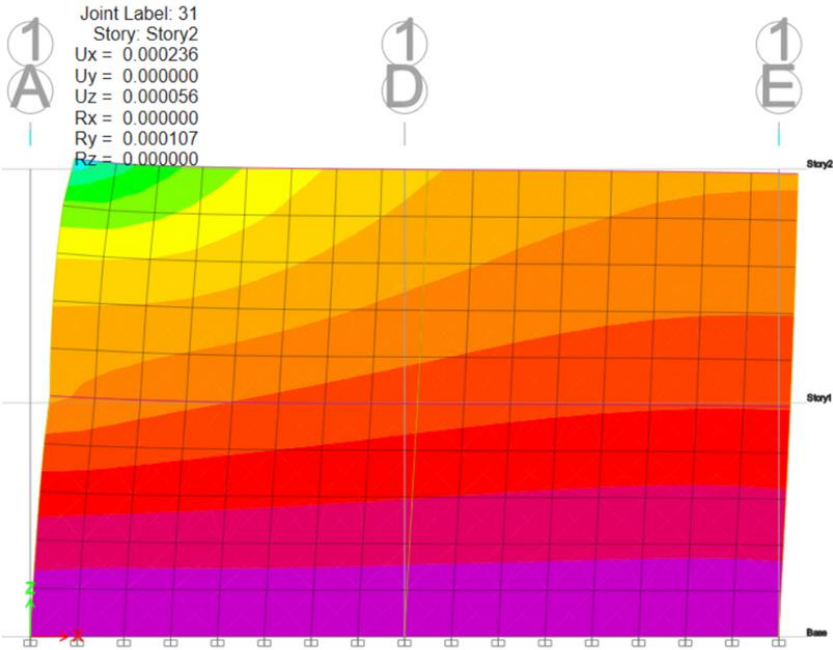


Ilustración 89. Desplazamiento del muro con mampostería confinada con propiedades del GPP + PL

Tabla 59. Derivas máximas calculadas según la (NEC- SE- DS, 2015)

DERIVAS EN MAMPOSTERÍA CONVENCIONAL				
PISO		Elevación (m)	Deriva de piso	Deriva máxima
Story2	SISMO X	5	0.00021	0.047%
Story1	SISMO X	2.5	0.00009	0.020%
DERIVAS EN MAMPOSTERÍA CON GPP + PL				
PISO		Elevación (m)	Deriva de piso	Deriva máxima
Story2	SISMO X	5	0.000236	0.053%
Story1	SISMO X	2.5	0.000104	0.023%

Las derivas máximas obtenidas tanto para la mampostería convencional como para la mampostería con GPP + PL como se observan en la Tabla 59 se encuentran muy por debajo del límite permisible del 0.4% establecido por la NEC-SE-DS (2015), lo que indica que ambas tipologías cumplen con los requisitos normativos en cuanto a deformaciones laterales bajo sollicitaciones sísmicas. Si bien las derivas en el sistema con GPP + PL son ligeramente superiores a las de la mampostería convencional, este incremento es marginal y no compromete el comportamiento estructural del sistema. Por el contrario, evidencia un comportamiento ligeramente más flexible que puede ser favorable en ciertas condiciones sísmicas. En este sentido, la mampostería con GPP + PL se presenta como una alternativa técnicamente viable, segura y potencialmente más sostenible, sin sacrificar el desempeño estructural exigido por la normativa ecuatoriana debido a su relación.

4.5. Discusión capítulo 4

El análisis de la composición elemental del geopolímero formulado GPP+PL revela una matriz predominantemente constituida por silicio (Si), aluminio (Al) y oxígeno (O), elementos esenciales para la formación de la red geopolimérica (Davidovits, 2018). La incorporación del polvo de ladrillo induce una variación composicional significativa con un aumento en el contenido de Al y la aparición de hierro (Fe), atribuible a los óxidos férricos y aluminicos presentes en la arcilla cocida (Temuujin, J., 2009). Estos compuestos adicionalmente pueden actuar como facilitadores en la formación de fases secundarias tipo N-A-S-H y C-A-S-H, que refuerzan la estructura del geopolímero y contribuyen a su estabilidad química y mecánica, adicionalmente se debe considerar que la relación a/mc utilizada es de 0.7 buscando que las comparaciones no sean muy exageradas y considerando que el GPP+PL se activó con ese valor (Provis et al., 2019).

Desde el punto de vista mecánico, se observó un incremento sostenido en la resistencia a la compresión entre los 7 y 28 días de curado, lo cual se asocia con el progreso en la condensación de la red aluminosilicatada y el desarrollo de una microestructura densa y homogénea (P. Mehta & Monteiro, 2014). A los 14 días, las mezclas con GPP ya alcanzan resistencias similares o superiores a las del CP. Sin embargo, a los 28 días, las formulaciones con GPP+PL superan notablemente tanto a las mezclas de GPP como a las de CP, registrando

valores de resistencia de hasta 18.77 MPa en pastas y 15.91 MPa en morteros, frente a 7.85 MPa y 6.74 MPa en GPP y 9.56 MPa y 8.91 MPa en CP, respectivamente. Este comportamiento muestra un efecto sinérgico entre los componentes del geopolímero, que optimiza la reactividad del sistema y mejora la capacidad de carga del conglomerante (Malhotra & Ramezaniapour, 1994; Davidovits, 2018).

Adicionalmente, la combinación de piedra pómez y polvo de ladrillo no solo potencia la resistencia mecánica, sino que también mejora propiedades como la trabajabilidad, la cohesión y la durabilidad del sistema, debido a la distribución granulométrica y a la mayor densidad de enlace en la matriz endurecida (Cajamarca et al. 2023; Huamán, 2023). Este comportamiento se alinea con lo señalado por Safari et al. (2020), quienes demostraron que una concentración de activador alcalino de 10M, junto con un adecuado tamaño de partícula, puede aumentar significativamente la resistencia a la compresión de los geopolímeros a base de piedra pómez.

En el ensayo de resistencia a la flexión, los mampuestos elaborados con PP y modificados con PL mostraron el mejor comportamiento mecánico a los 28 días de curado. Esta mejora puede atribuirse al aumento en la reactividad del sistema, debido a la presencia de aluminatos adicionales que contribuyen a una mayor densidad de enlaces Si–O–Al en la matriz endurecida (Temuujin et al., 2009). Resultados similares fueron observados en las probetas preliminares, que mostraron valores comparables a los reportados por Cajamarca et al. 2023, quienes señalaron un incremento en la resistencia a la flexión con la incorporación de arcilla calcinada y una concentración de activador de 10M, que también fue utilizada en este estudio.

Desde el punto de vista considerando el mampuesto para diseño estructural, se observó que la mampostería geopolimérica presenta una resistencia ligeramente inferior (4.76 MPa) respecto a la mampostería tradicional a base de CP (5.2 MPa). No obstante, ambas configuraciones cumplen con los requisitos establecidos en normativa ecuatoriana de construcción MIDUVI, 2017 para dimensiones mínimas y capacidad de confinamiento, lo que respalda la viabilidad técnica del uso de geopolímeros en sistemas constructivos convencionales (NTC 4017, 2011; ASTM C34, 2015). Esto refuerza el potencial del geopolímero como una alternativa sostenible y funcional en aplicaciones estructurales, particularmente en mampostería portante.

4.6. Conclusiones

- La piedra pómez se consolida como un material precursor clave en la elaboración de geopolímeros, y la adición de polvo de ladrillo como adición precursora mejora significativamente sus propiedades reactivas. Esta mejora se atribuye a la presencia de aluminio en la mezcla, que incrementa la adherencia entre

partículas del geopolímero, optimizando su cohesión interna y desempeño mecánico.

- Durante el desarrollo de los mampuestos, las pruebas preliminares realizadas permitieron evaluar la efectividad de las dosificaciones empleadas. Los resultados mostraron que el uso de mezcla de PP y PL, junto con un mayor tiempo de curado, contribuyó a alcanzar propiedades mecánicas cercanas a las requeridas para aplicaciones estructurales. Aunque las resistencias no igualaron completamente a las de los mampuestos convencionales de GPP + PL, estuvieron muy próximas, demostrando el potencial del material desarrollado.
- El uso combinado de piedra pómez y polvo de ladrillo como componentes de los geopolímeros representa una alternativa viable y sostenible para la elaboración de mampuestos. Este enfoque no solo mejora las propiedades mecánicas mediante una mayor cohesión interna, sino que también reduce el impacto ambiental en comparación con materiales tradicionales como el CP. Así, se establece como una solución innovadora y eficiente para la industria de la construcción, alineándose con los objetivos globales de sostenibilidad y reducción de emisiones de CO₂.
- En términos prácticos, los resultados respaldan la utilización de piedra pómez como un precursor confiable para producir bloques y ladrillos geopoliméricos. Sin embargo, se identificaron limitaciones relacionadas con la disponibilidad de insumos clave, como el hidróxido de sodio, lo que restringió la elaboración de más muestras y el ajuste de formulaciones para mejorar aún más el desempeño mecánico. Por ello, se recomienda continuar esta línea de investigación, enfocándose en optimizar las condiciones de curado y las dosificaciones, con el objetivo de alcanzar propiedades equivalentes o superiores a las de los materiales tradicionales.
- Finalmente, se siguieron y cumplieron los requisitos establecidos para el diseño de elementos estructurales de mampostería confinada, modelándolos en el software ETABS para evaluar su comportamiento. Al aplicar las propiedades mecánicas de los mampuestos de geopolímero, se verificó que cumplen con la resistencia mínima exigida para unidades de mampostería según la normativa vigente. Los resultados del análisis estructural mostraron que la estructura diseñada con esta propuesta funcionó adecuadamente, lo que demuestra la viabilidad de utilizar mampostería de geopolímero como una alternativa efectiva y sostenible en aplicaciones estructurales.

- Estos hallazgos son fundamentales para seguir avanzando en la aplicación de geopolímeros en la construcción y fortalecer su integración como una solución sostenible y eficiente en el sector.

CAPÍTULO 5. EMISIÓN DE CO₂ ASOCIADA A LOS ACTIVADORES Y PASTAS CONGLOMERANTES

5.1. Introducción

La producción de cemento es una fuente significativa de emisiones de CO₂, estimándose en alrededor de 1 kg de CO₂ por cada kg de cemento producido según Årskog et al., (2004), la International Energy Agency (IEA, 2023), indica que la industria cementera es responsable de cerca del 7% de las emisiones globales de CO₂, siendo una de las fuentes industriales más importantes de gases de efecto invernadero. Por tal razón, una estrategia clave para mitigar esta huella de carbono reside en la incorporación de puzolanas y otros materiales cementantes suplementarios (SCMs) en la formulación del cemento. Al sustituir una porción del clínker, cuya producción es intensiva en emisiones debido a la descarbonatación y el uso de combustibles fósiles, las adiciones minerales pueden reducir la cantidad de CO₂ asociada a cada kilogramo de cemento producido (Scrivener et al., 2018; Juenger et al., 2022). Esta práctica, permitida en cementos como el tipo GU bajo normativas como la ASTM C1157 e INEN 2380 (2019), no solo optimiza la durabilidad del material, sino que también representa una vía importante hacia la reducción del impacto ambiental de la industria cementera.

El CP tipo GU, según normas como la ASTM C1157 y su equivalente ecuatoriana INEN 2380 (2019), es un cemento de uso general que puede contener adiciones minerales como puzolanas, escorias o filler calizo, siempre que cumpla con los requisitos de desempeño establecidos (resistencia, durabilidad, fraguado, etc.). A diferencia de cementos como el tipo IP (puzolánico) o IL (con caliza), el tipo GU no tiene una cantidad fija de puzolana con presencia de silicio, aluminio y hierro según la norma ASTM C618 (2022).

En la práctica, la cantidad de puzolana en un cemento tipo GU suele estar entre el 10% y el 20% en peso, cuando se utiliza como adición para mejorar durabilidad, reducir la reacción álcali-agregado o disminuir la huella de carbono. Habert et al., (2011); Juenger et al., (2011); Scrivener & Snellings, (2018); Scrivener et al., (2018) mencionan que la producción de 1 tonelada de CP tipo GU genera aproximadamente entre 850 y 950 kg de CO₂. Según diversas fuentes científicas y técnicas este valor puede variar dependiendo del contenido de clínker y el uso de adiciones minerales (como puzolanas o escorias), ya que el clínker es el componente que más contribuye a las emisiones.

Esta variabilidad depende de factores como la disponibilidad local de puzolanas naturales o artificiales (como cenizas volcánicas o ceniza volante), la composición del clínker, y el tipo de desempeño requerido por la norma.

5.2. Metodología

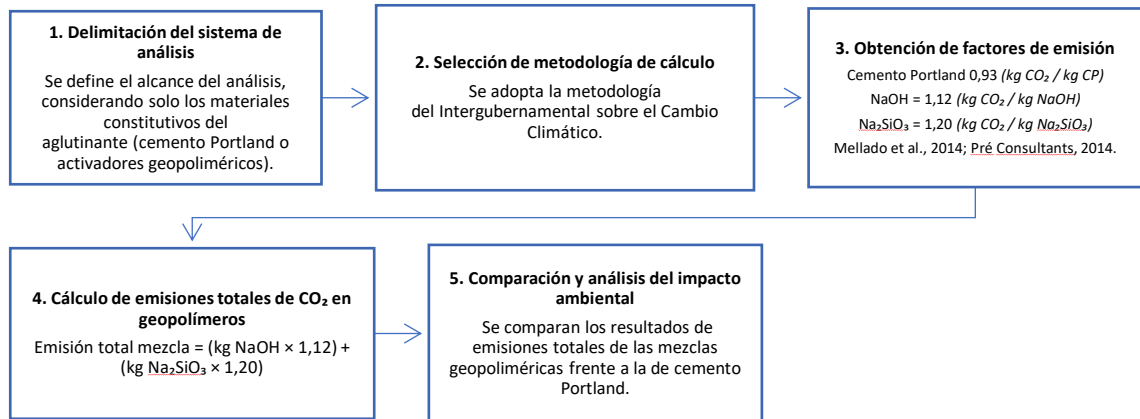


Ilustración 90. Metodología a seguir capítulo 5

Para calcular las emisiones de CO₂ para la preparación de pastas de cemento y geopolímeros, se siguieron las directrices del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 1977) para los Inventarios Nacionales de Gases de Efecto Invernadero. La metodología general empleada para estimar las emisiones asociadas a un proceso en particular implica el producto de los datos de nivel de actividad, por ejemplo, la cantidad de material procesado o la cantidad de energía consumida, y un factor de emisión asociado por unidad de consumo/producción según:

$$E_i = A_i \times EF$$

Ecuación 16

Donde:

E_i = la emisión de CO₂ del proceso (kg) de cada ingrediente u operación 'i';

A_i = la cantidad de actividad o material procesado 'i'; y

EF_i = el factor de emisión asociado con la emisión de CO₂ por unidad de actividad o material de proceso 'i'

Se evaluó tres tipos de mezclas conglomerantes con el objetivo de estimar sus emisiones de CO₂: (1) pasta de CP (CP), (2) pasta de geopolímero a base de piedra pómez (GPP) y (3) pasta de geopolímero de piedra pómez con adición de polvo de ladrillo (GPP+PL). El cálculo de emisiones se realizó mediante una metodología simplificada que considera únicamente las emisiones asociadas a los materiales constitutivos del aglutinante, excluyendo los procesos de mezclado, curado y transporte de la materia prima desde su punto de origen hasta el laboratorio siguiendo lo establecido (Mellado, 2014). Esta aproximación se alinea con prácticas comunes en análisis de ciclo de vida simplificados para cementos y materiales alternativos

(Habert et al., 2011; Scrivener et al., 2018), donde se prioriza el impacto del clínker o de los precursores activados como principal fuente de emisiones.

En la preparación de la pasta de cemento, se utilizó el cemento Chimborazo tipo GU. Su composición elemental se muestra en la Tabla 60.

Tabla 60. Cemento tipo GU: composición química

Cementos tipo GU	
Componente	Porcentaje
CaO	45,10%
SiO ₂	20,10%
MgO	8,13%
Al ₂ O ₃	7,01%
Fe ₂ O ₃	1,69%
S	1,50%
P ₂ O ₅	1,15%
Co ₃ O ₄	0,42%
K ₂ O	0,40%
TiO ₂	0,22%
MnO	0,05%

Adaptado de (Velásquez, 2023)

Para la preparación del GPP y GPP+PL se utilizó NaOH sólido y una solución de silicato sódico. La composición elemental se muestra en la Tabla 14 y Tabla 15.

El CP, según Årskog et al., (2004), genera aproximadamente 1 kg de CO₂ por cada kilogramo producido. Habert et al., (2011) y Scrivener et al., (2018) también reportan que la producción de una tonelada de cemento tipo GU emite entre 0,85 y 0,95 kg de CO₂ por kilogramo, dependiendo de factores como el contenido de clínker y la eficiencia energética del proceso. En el marco de esta investigación, se ha adoptado un valor promedio de 0,93 kg de CO₂ por kilogramo de cemento GU como referencia para el cálculo de emisiones, considerando tanto la literatura técnica como el contexto industrial típico.

Utilizando la Ecuación 10 se calculó la emisión asociada al uso de 1 kg de cemento para obtener la emisión de CO₂ por unidad de masa de precursor (kg de CO₂ por kg de precursor de CP).

El GPP y el GPP+PL tienen una solución que consiste en una mezcla de NaOH y Na₂SiO₃. dado que la pasta se obtiene de mezclar el conglomerante con la PP, SF y el PL (material de origen mineral de Ecuador) para el cálculo de las emisiones de CO₂ se consideró la fabricación de NaOH y Na₂SiO₃ (sin emisiones asociadas al suministro de agua). Ambos factores de emisión, correspondientes al NaOH y al Na₂SiO₃, conforme a la investigación de Mellado et al., (2014) obtenidos de la base de datos del programa SimaPro 7.1 (Pré Consultants, 2014). Los factores de emisión son de 1,12 kg de CO₂ por kg de NaOH y 1,2 kg de CO₂ por kg de solución de Na₂SiO₃. Se calculó la emisión asociada al uso de 1kg de conglomerante para obtener la

emisión de CO₂ por unidad de masa de precursor de GGP y GPP+PL (kg de CO₂ por kg de pasta de GGP y kg de CO₂ por kg de precursor de GPP+PL).

Adicionalmente, se estimaron las emisiones de CO₂ asociadas a la preparación de 1 litro de las distintas concentraciones molares utilizadas a lo largo del desarrollo de la tesis doctoral, considerando un peso molar del hidróxido de sodio (NaOH) de 39,997 g/mol y una relación NaOH/Na₂SiO₃ de 2,5. Para este cálculo, se emplearon factores de emisión reportados en la literatura: 1,12 kg de CO₂ por cada kg de NaOH y 1,20 kg de CO₂ por cada kg de solución de silicato de sodio (Na₂SiO₃). Esta información permitió cuantificar el impacto ambiental de los activadores alcalinos empleados en las mezclas geopoliméricas.

Es importante señalar que, en esta investigación, siguiendo el enfoque metodológico propuesto por Mellado et al., (2014), y no se han considerado los consumos energéticos asociados al transporte, molienda y mezclado de la piedra pómez (PP) y el polvo de ladrillo (PL), ya que estas actividades se realizaron manualmente a escala de laboratorio. De igual forma, no se ha incluido el consumo energético del proceso de curado. Sin embargo, estudios como el de Martínez (2017) en Colombia han estimado estos consumos considerando variables clave como la distancia de transporte, el tipo de vehículo empleado y la cantidad de material movilizado. En dicho estudio, se asume que la molienda y el mezclado se realizan mediante procesos manuales y mecánicos, utilizando equipos como molinos y amasadoras, mientras que el curado se lleva a cabo a temperatura ambiente, lo que representa un escenario más cercano a condiciones semiindustriales.

Cabe destacar que, de acuerdo con Martínez (2017), la fabricación del hidróxido de sodio (NaOH) representa el mayor impacto ambiental en términos de emisiones de CO₂, concentrando aproximadamente el 86,8 % del total de emisiones asociadas al sistema geopolimérico. En comparación, el resto de los procesos (extracción, transporte y procesamiento de materias primas) aportan porcentajes mucho menores, entre el 0 y el 7 %. Por esta razón, en esta investigación el análisis ambiental se enfoca exclusivamente en las emisiones de dióxido de carbono derivadas de la producción del activador alcalino, expresadas en kg de CO₂ por kg de NaOH y Na₂SiO₃ utilizado.

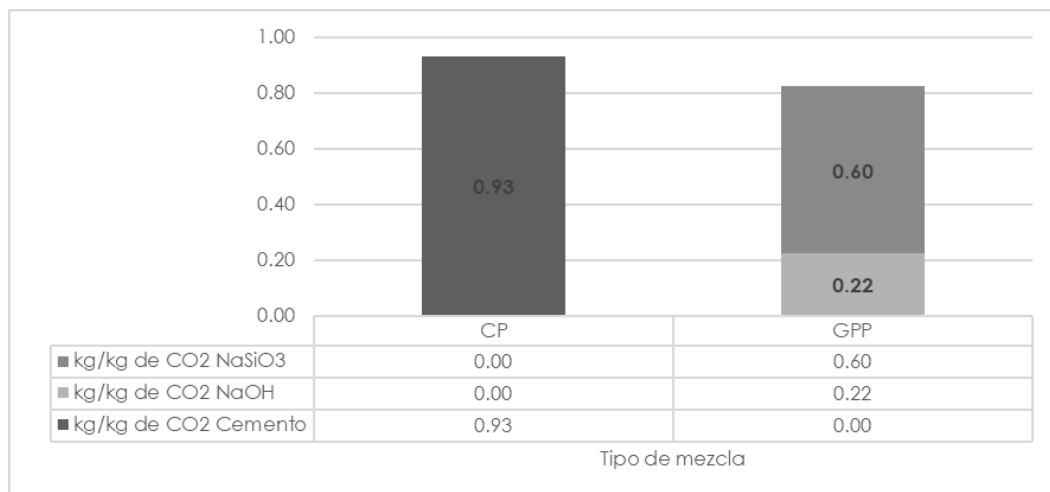
5.3. Resultados y discusión

En la Tabla Tabla 61 se presenta la cantidad de materiales requeridos para la elaboración de pastas a base de CP, GPP, GPP+SF y GPP+PL, normalizadas en función de 1 kg de fuente de precursor. Esta base común permite comparar de manera consistente la cantidad de activadores, agua y otros componentes empleados en cada sistema. La estandarización con respecto al precursor principal facilita el análisis comparativo de impactos ambientales generados.

Tabla 61. Cantidad de material requerida para la elaboración de pastas

Tipo de mezcla	Cantidad de material						
	Cemento (kg)	PP (kg)	SF (kg)	PL (kg)	NaOH (kg)	Na ₂ SiO ₃ (kg)	Agua (kg)
CP	1,00	-	-	-	-	-	0,7
GPP	-	1,00	-	-	0,20	0,50	-
GPP+SF	-	0,88	0,12	-	0,20	0,50	-
GPP+PL	-	0,85	-	0,15	0,20	0,50	-

En la Ilustración 91 se presenta el cálculo de las emisiones de CO₂ asociadas al uso de 1 kg de material precursor en la elaboración de pastas de CP y geopolímero (Martínez García, 2017). El resultado se expresa como kilogramos de CO₂ por kilogramo de precursor, para la pasta de cemento se utiliza el valor de 0,93 kg de emisión de CO₂ por kilogramo producido, para el cálculo de la de pasta de geopolímero producida en cada sistema (kg CO₂/kg de precursor) se aplicó la Ecuación 11, la cual incorpora los factores de emisión específicos de los activadores alcalinos: 1,12 kg de CO₂ por kg de NaOH y 1,20 kg de CO₂ por kg de solución de Na₂SiO₃. Esta metodología permitió comparar el impacto ambiental directo de los diferentes diseños de mezcla en función del tipo de adición empleada.

**Ilustración 91.** Emisiones de CO₂ por kilogramo de precursor

En el caso del CP, las emisiones ascienden a 0,93 kg de CO₂ por kg de precursor, atribuibles exclusivamente al contenido de cemento, cuya fabricación implica un alto consumo energético y emisiones por descarbonatación del crudo de clínker. Mientras que, la mezcla con GPP no contiene CP sino variaciones realizadas entre su fuente de aluminosilicatos, sus emisiones totales son de 0,82 kg de CO₂ por kg de precursor, distribuidas entre 0,60 kg provenientes del uso de Na₂SiO₃ y 0,22 kg del hidróxido de sodio NaOH. A pesar de que los activadores alcalinos también generan emisiones significativas, el GPP logra una reducción neta aproximada del 11,8% en comparación con el cemento tradicional.

Este resultado demuestra que el GPP es ligeramente más amigable con el medio ambiente, al reemplazar parcialmente materiales de alta huella de carbono con recursos naturales disponibles localmente, como la piedra pómez. La aplicación de geopolímeros representa una estrategia viable hacia la descarbonización del sector de la construcción, como lo respaldan estudios de Habert et al., (2011) y Scrivener et al., (2018). Para una evaluación ambiental consciente, es fundamental evaluar las emisiones de CO₂ asociadas a las distintas concentraciones de NaOH empleadas en la activación alcalina de los geopolímeros en el este estudio. Manteniendo una constante relación de NaOH/Na₂SiO₃ en 2,5 para todas las mezclas en la Ilustración 92 se presenta las emisiones específicas generadas en kg de CO₂/kg de precursor requeridos por litro de solución a diferentes concentraciones molares de NaOH, calculadas con un peso molar de 40 g/mol.

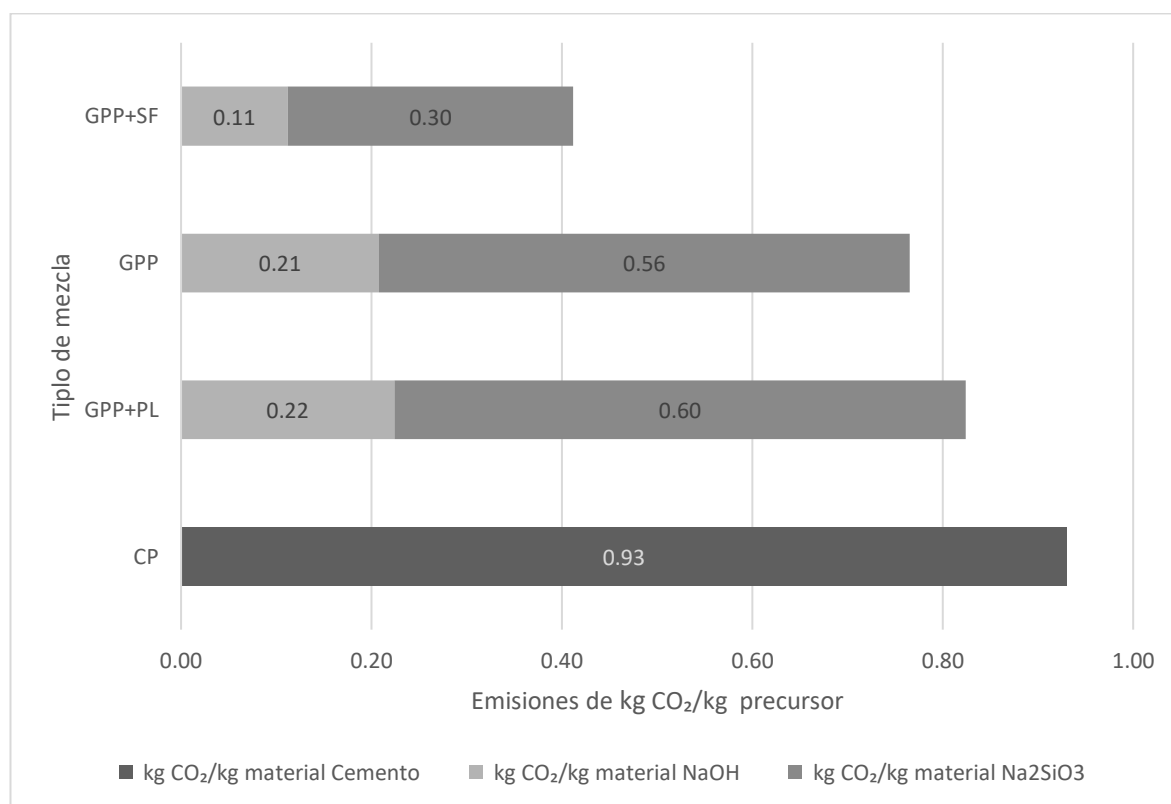


Ilustración 92. Emisiones de CO₂ por kg de material por litro de disolución

Si bien los resultados de la Ilustración 93 indicaron una reducción neta de emisiones para el GPP en comparación con el CP, este análisis muestra el papel crucial de la concentración de los activadores alcalinos ya que un aumento lineal de las emisiones con la concentración molar indica que utilizar concentraciones más bajas de activadores alcalinos son una estrategia para minimizar la huella de carbono de los geopolímeros.

En la Ilustración 93 se muestra una las emisiones de CO₂ para producir 1kg de conglomerante con una concentración molar de NaOH constante, en función de las diferentes relaciones de solución alcalina/conglomerante utilizadas en el estudio.

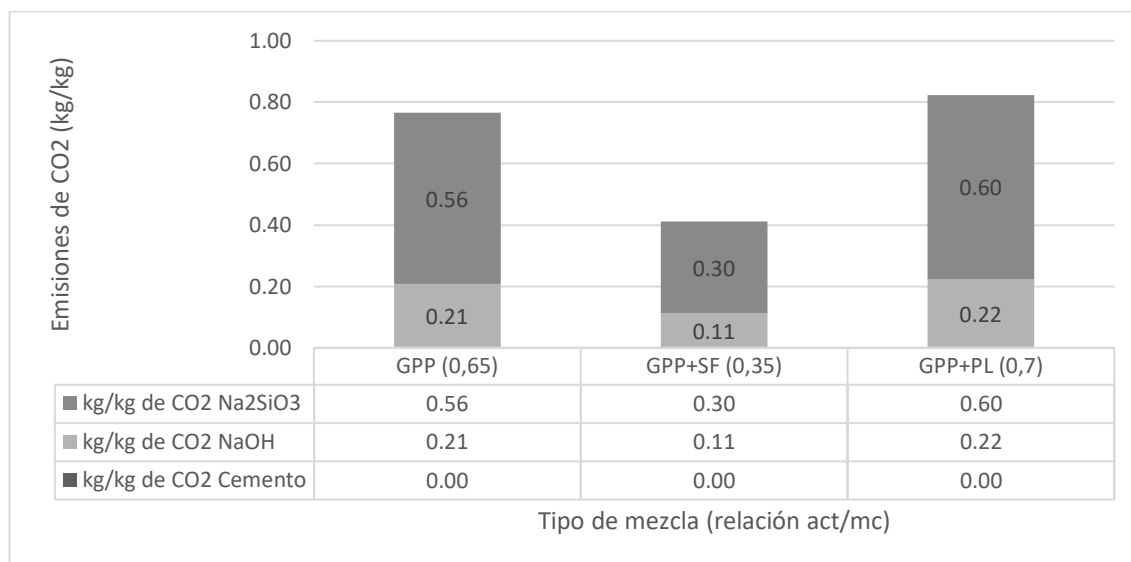


Ilustración 93. Emisiones de CO₂ (kg/kg)

Se puede apreciar como la reducción de activadores o la incorporación de subproductos industriales (como humo de sílice o polvo de ladrillo) son recomendables para mejorar aún más la sostenibilidad de los geopolímeros IEA, (2023) ; Juenger et al., (2011) ya que se genera una reducción de la cantidad de Na₂SiO₃ requerido, principalmente como se aprecia en la mezcla de GPP+SF. Ante las distintas estrategias para reducir la huella de carbono en mezclas geopoliméricas, es esencial asegurar que estas optimizaciones no comprometan las propiedades mecánicas ni la durabilidad necesarias para su aplicación específica en la construcción.

La Tabla 62 muestra las emisiones de CO₂ generadas en función de la concentración molar requerida para activar la solución alcalina. En la resistencia a compresión media de cada una de las pastas, la muestra de GPP (punto de partida de la investigación) se limitó los resultados para esta comparativa a los que requieren una concentración de 16 M y 20 M para su activación alcalina debido a que en el inicio de la investigación se consideró hasta llegar a la geopolymerización otras variables como: proveniencia del material, temperatura de curado y concentración molar.

Tabla 62. Emisiones de CO₂ comparando la concentración y resistencia a la compresión.

Tipo de mezcla	Concentración NaOH	Relación (act/mc)	Resistencia	Emisión de kg de CO ₂ por kg de material			Rendimiento Mpa (kg CO ₂ /kg material)/MPa
			MPa	Solución de NaOH	Solución de Na ₂ SiO ₃	Total	
CP	No aplica	0,70	9,56	-	-	0,93	0,097
GPP	12 M	0,65	14,28	0,21	0,56	0,77	0,054
GPP+SF	12 M	0,35	16,27	0,11	0,30	0,41	0,025
GPP+PL	10 M	0,70	18,77	0,22	0,60	0,82	0,044

La tendencia que se mantiene en el diseño de materiales geopoliméricos es que, a mayor concentración de NaOH, mayor resistencia mecánica, pero también mayores emisiones de CO₂. La mezcla GPP con 20 M de NaOH alcanza una alta resistencia (33,42 MPa), pero con una carga ambiental elevada: 0,96 kg CO₂ por NaOH y 2,40 kg CO₂ por Na₂SiO₃, lo que representa una huella de carbono considerable. Esta alta resistencia se debe por la mayor disponibilidad de iones OH⁻, que intensifican la disolución de aluminosilicatos y favorecen la formación del gel N-A-S-H, responsable del desarrollo mecánico (Duxson et al., 2007; Provis & Van Deventer, 2009). Sin embargo, al disminuir la concentración de NaOH a 16 M, se observa una reducción en resistencia (22,12 MPa) y una caída en las emisiones (0,77 y 1,92 kg CO₂ por NaOH y Na₂SiO₃, respectivamente), lo que indica la relación entre rendimiento mecánico y sostenibilidad ambiental.

Las mezclas con adiciones minerales, como humo de sílice (GPP+SF) y polvo de ladrillo (GPP+PL), permiten reducir la cantidad de activadores necesarios. En GPP+SF con 10 M de NaOH, se logra 16,26 MPa con emisiones significativamente menores (0.58 y 1.44 kg CO₂). Esta mejora en eficiencia se debe a la alta reactividad del humo de sílice, que promueve la geopolimerización con menor requerimiento de álcalis (C. Shi et al., 2011). Por otro lado, la mezcla GPP+PL, aunque con una resistencia de 18.77 MPa, también presenta reducidas emisiones (0.48 y 1.20 kg CO₂), mostrando que materiales residuales como el polvo de ladrillo pueden aportar a la sostenibilidad sin sacrificar en exceso el rendimiento (Z. Zhang et al., 2018).

Estos hallazgos concuerdan con los de Habert et al., (2011) y Scrivener et al., (2018) quienes destacan que el impacto ambiental de los geopolímeros depende fuertemente del tipo y la cantidad de activadores alcalinos, especialmente del Na₂SiO₃, cuya producción es intensiva en energía. Además, la (IEA, 2023b) señala la necesidad urgente de reducir las emisiones del sector cementero, lo que posiciona a los geopolímeros como alternativas prometedoras, siempre que se optimicen sus formulaciones para balancear rendimiento y sostenibilidad.

5.4. Discusión capítulo 5

La pasta de CP genera 0.93 kg CO₂/kg debido a la producción intensiva en energía y la descarbonatación del crudo de clínker, mientras que la mezcla geopolimérica emite 0,82 kg CO₂/kg, resultando en una reducción neta de emisiones de aproximadamente el 11,8% para el GPP, lo que demuestra su potencial como alternativa sostenible en la construcción lo cual se alinea con las estrategias de mitigación climática propuestas por organismos como la IEA (International Energy Agency, 2023) y respaldado en la literatura por autores como Juenger et al. (2022) y Provis (2014).

Se evidenció que a mayor concentración de NaOH en geopolímeros, se obtiene mayor resistencia mecánica, pero también mayores emisiones de CO₂. Sin embargo, el uso de adiciones minerales como humo de sílice o polvo de ladrillo permite reducir activadores y emisiones sin comprometer significativamente el rendimiento, lo que respalda su potencial como alternativa sostenible frente al cemento convencional (Habert et al., 2011; IEA, 2023; Scrivener et al., 2018)

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES

- La presente investigación ha demostrado que la piedra pómez (PP) proveniente de las regiones volcánicas de Tungurahua, Imbabura y Cotopaxi, en Ecuador, constituye una fuente viable de precursores aluminosilicatados para la síntesis de conglomerantes geopoliméricos. El análisis mineralógico confirmó la presencia significativa de fases amorfas ricas en alúmina y, en especial, en sílice, condición esencial para garantizar una adecuada reactividad en medios alcalinos. Este hallazgo valida el potencial del recurso local como sustituto parcial o total del cemento Portland (CP), en línea con las tendencias globales hacia materiales de construcción de menor impacto ambiental.
- Uno de los aportes centrales de este estudio radica en la identificación de diferencias significativas en el comportamiento geopolimérico según el origen geográfico de la piedra pómez. Mientras los geopolímeros basados en pómez de Tungurahua e Imbabura presentaron resistencias mecánicas destacadas, su activación eficiente requirió concentraciones elevadas de hidróxido de sodio, lo cual representa un desafío en términos de sostenibilidad, costo y logística. En contraste, la piedra pómez de Cotopaxi mostró una mayor eficiencia reactiva, alcanzando resistencias elevadas con una menor concentración de NaOH (16 M), lo que evidencia la importancia de la caracterización específica del precursor y sus propiedades fisicoquímicas.
- Se logró una primera optimización de la mezcla inicial mediante la incorporación de humo de sílice (SF), que permitió reducir la concentración alcalina hasta 12 M sin comprometer el desempeño mecánico. Esta mejora no solo redujo el consumo de NaOH, sino que también promovió una densificación microestructural, al actuar el SF como fuente de sílice reactiva y agente llenador de vacíos propios del material, con el consiguiente potencial de incremento en la durabilidad.
- Adicionalmente este sistema optimizado (PP + SF, activado con 12 M de NaOH) mostró un desarrollo acelerado de resistencia, alcanzando aproximadamente el 90% de su capacidad mecánica final a los 7 días. Si bien los valores máximos de resistencia a compresión fueron inferiores a los de un hormigón de CP diseñado para aplicaciones estructurales de alta exigencia, los resultados cumplen con los requisitos normativos establecidos para unidades de mampostería estructural.
- La variabilidad observada en los valores de resistencia a la compresión y flexión indican que es posible optimizar el desempeño de los geopolímeros mediante ajustes específicos en la formulación de la mezcla, incluyendo la relación agua-material cementante, el tipo y la concentración del activador alcalino, y la proporción de aditivos puzolánicos.

-
- Desde la perspectiva de la durabilidad, los ensayos frente a ataque ácido demostraron una superior resistencia del conglomerante geopolimérico en comparación con el CP. Se observó una menor pérdida de masa frente al ataque de ácido nítrico en los especímenes geopoliméricos. El análisis microestructural post-ataque confirmó que esta resiliencia se debe a la estabilidad química del gel de aluminosilicato de sodio (N-A-S-H), cuya red tridimensional de enlaces Si-O-Al ofrece una resistencia intrínseca frente a la degradación ácida, a diferencia de la vulnerabilidad de la portlandita y los geles cálcicos tipo C-S-H del sistema CP frente a ambientes agresivos.
 - Se consiguió una segunda optimización a la mezcla, esta vez incorporando polvo de ladrillo (PL), esta formulación no solo mejora la cohesión interna y las propiedades mecánicas del material, sino que cumple con los estándares normativos vigentes, constituyéndose en una alternativa sostenible frente a materiales tradicionales,
 - Para comparar la eficiencia estructural del geopolímero en mampostería prefabricada se elaboró mampuestos obteniendo sus propiedades mecánicas y modelarlo en el software Etabs. Se demostró que la estructura diseñada con esta propuesta funcionó adecuadamente, lo que demuestra la viabilidad de utilizar mampostería confinada de geopolímero como una alternativa efectiva y sostenible en aplicaciones estructurales
 - Desde la perspectiva ambiental, se constató que la producción de geopolímeros genera aproximadamente un 11,8% menos emisiones de CO₂ en comparación con el CP, incluso considerando el impacto asociado a los agentes alcalinos utilizados en su activación. Sin embargo, se identifica como prioritario continuar la investigación en torno a activadores alternativos, especialmente en la sustitución del Na₂SiO₃, debido a su elevada huella de carbono y su incidencia en la sostenibilidad global del sistema geopolimérico.
 - En conclusión, esta tesis establece una base sólida para la valorización de la piedra pómez ecuatoriana como precursor geopolimérico. Se ha cuantificado la influencia del origen geológico en la reactividad del material y en su demanda de álcali, identificando la pómez de Cotopaxi como la opción más eficiente en términos de sostenibilidad y rendimiento. Además, se ha validado una estrategia de optimización mediante la adición de SF y PL, y se ha demostrado la superioridad del sistema geopolimérico frente al ataque ácido, lo que refuerza su aplicabilidad en entornos agresivos. Estos hallazgos sientan las bases para el desarrollo de tecnologías constructivas más sostenibles, resilientes y adaptadas al contexto local.

CAPÍTULO 7. FUTURAS INVESTIGACIONES

- Profundizar en el estudio de activadores alternativos al silicato de sodio y al hidróxido de sodio, como carbonatos alcalinos, residuos industriales ricos en álcalis (e.g., cenizas de soda) o cenizas de biomasa.
- Desarrollo de mezclas híbridas con cemento Portland, con el objetivo de, sin afectar mucho la huella ambiental del sistema, se puedan mejorar su rendimiento mecánico y de durabilidad.
- Desarrollo de mezclas geopoliméricas añadiendo a la PP materiales de residuos industriales o agrícolas locales (e.g., cenizas de bagazo de caña, cáscara de arroz calcinada, escorias de fundición) para promover una economía circular y maximizar el aprovechamiento de recursos disponibles regionalmente.
- Investigar métodos de curado adaptados la zona de estudio, incluyendo curado a temperatura ambiente prolongado, curado húmedo o el uso de aditivos acelerantes que permitan reducir o eliminar la necesidad de curado térmico sin afectar el rendimiento final del material.
- Desarrollar modelos matemáticos o computacionales que describan la cinética de disolución y geopolimerización en función de la composición mineralógica y fisicoquímica de la piedra pómez, lo cual permitiría predecir el comportamiento del sistema y optimizar dosificaciones de forma más precisa.
- Validar el comportamiento estructural de los mampuestos geopoliméricos a escala real mediante ensayos de compresión prismática, flexión diagonal, y muros confinados bajo cargas laterales, integrando análisis computacionales con herramientas como ETABS o SAP2000.
- Implementar estudios de ACV comparativos entre el sistema geopolimérico optimizado y el CP tradicional, considerando extracción de materias primas, procesamiento, transporte, uso y disposición final. Complementar con análisis costo-beneficio para facilitar su adopción industrial.

CAPÍTULO 8. BIBLIOGRAFÍA

(UNEP). (2021). Emissions Gap Report. *Emissions Gap Report 2021*.

0544, A. (2018). *ACI 544: Report on Fiber-Reinforced Concrete*.

1856:2010, N. I. (2010). *NTE INEN 1856:2010 – Hormigón endurecido. Determinación de la resistencia a la compresión*.

Métodos de ensayos de cemento, (2011).

Guide to Durable Concrete. American Concrete Institute., (2016).

7371, E. N. (2005). Leaching characteristics of granular building and waste material, The determination of the availability of inorganic components for leaching,. *The Maximum Availability Leaching Test*.

means the Ontario Regulation Air Pollution – Local Air Quality., (2005).

771-1, E. (n.d.). *EN 771-1:2022. Especificación para unidades de mampostería - Parte 1: Unidades de mampostería de arcilla**. CEN.

Abdulkareem, O. A., Al-Majidi, M. H., & Al-Rifaie, A. (n.d.). Fire resistance performance of geopolymer concrete: A comprehensive review. *Journal of Building Engineering*, 64, 105636. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105636>

Abuowda, E., El-Hassan, H., & El-Maaddaway, T. (2024). *Characterization of Geopolymer Masonry Mortars Incorporating Recycled Fine Aggregates*.

ACI Committee 213. (2003). *Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete*. American Concrete Institute, Farmington Hills. - References - Scientific Research Publishing. <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=2952744>

Acosta, D. (2011). *Arquitectura y construcción sostenibles: Conceptos, Problemas y Estrategias*.

Adhikari, K., & Poudya, L. (2021). *Future of Construction Industry : COVID-19 and Its Implications on Construction Future of construction industry: COVID-19 and its implications on construction projects and risk management – A review*. April. <https://doi.org/10.20944/preprints202104.0383.v1>

Ajay, A., Ramaswamy, K. P., & Thomas, A. V. (2020). A critical review on the durability of geopolymer composites in acidic environment. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1–11. <https://doi.org/https://doi.org/10.1088/1755-1315/491/1/012044>

Albir, A. (2021). *Análisis De Materiales Sostenibles, Ciclo De Vida Y Su Aplicación En*

 Construcción. Repositorio UTV.

- Albornoz Muñoz, J. F. (2015). *Cálculo de la huella de carbono asociada a la elaboración de hormigones geopoliméricos en Chile*. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Civil.
- Allahverdi, A., & Škvára, F. (2001). Acid attack on alkali-activated geopolymers. . . *Ceramics International*, 423–431.
- Alotaibi, A., Bowan, P. A., Abdel Daiem, M. M., Watts, G., & otros autores. (2022). Identifying the barriers to sustainable management of construction and demolition waste in developed and developing countries. *Sustainability*, 14(13), 1-17. <https://doi.org/10.3390/su14137532>
- Álvarez Mantilla, H., Rios Reyes, C. A., & Castellanos Alarcón, O. M. (2021). Propiedades fisicomecánicas, desempeño y durabilidad de morteros geopoliméricos a base de puzolana natural tipo piedra pómez. *Inge CuC*, 17(1), 216–229. <https://doi.org/10.17981/INGECUC.17.1.2021.17>
- Andrade, A., Castillo, T., Paredes, M., Gimenez, E., & García, V. (2022). Geopolymer Designed with Pumice Stone from Ecuador. In *Civil Engineering and Architecture* (Vol. 10, Issue 5, pp. 1864–1880). <https://doi.org/10.13189/cea.2022.100513>
- Andrade, A., Marcillo, C., Brito, J., & Hidalgo, D. (2024). Estudio exploratorio de piedra pómez como agregado en la producción de concretos ligeros. *Polo Del Conocimiento*, 9(1), 860–871. <https://doi.org/10.23857/pc.v9i1.6410>
- Andrew, R. M. (2018). Global CO2 emissions from cement production, 1928-2017. *Earth System Science Data*, 10(4), 2213–2239. <https://doi.org/10.5194/ESSD-10-2213-2018>
- Angamarca, M., & Rubén, C. (2015). *Análisis comparativo entre hormigón convencional y hormigón de baja densidad para emplearlo en estructuras*.
- Antonio Baño Nieva, & Pozo., A. V.-E. del. (2005). *Guía de construcción sostenible*. www.istas.ccoo.es
- Aragón, P., Robayo-Salazar, R. A., & Gutiérrez, R. M. de. (2020). Alkali-Activated Concrete Based on Natural Volcanic Pozzolan: Chemical Resistance to Sulfate Attack. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 32(5), 04020106. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003161](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003161)
- Argent, P., Hughes, P., Roumeliotis, T., & Hall, C. (2020). *Reproducibility of acid neutralization capacity tests in cementitious systems*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s10853-020-04452-7>
- Årskog, V., Fossdal, S., & Gjærv, O. E. (2004). *Proceedings of the International Workshop on Sustainable Development and Concrete Technology*. 193–200.
- Asayesh, S., Shirzadi Javid, A. A., Ziari, H., & Mehri, B. (2021). Evaluating fresh state, hardened

- State, thermal expansion and bond properties of geopolymers for the repairing of concrete pavements under restrained conditions. *Construction and Building Materials*, 292. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123398>
- ASTM E883-11 Standard Practice for Metallographic Sample Preparation. West Conshohocken, PA: ASTM International., (2011).
- ASTM C150 Standard Specification for Portland Cement., (2022).
- ASTM C1115-00. (2019). *Standard Specification for Dense Elastomeric Silicone Rubber Gaskets and Accessories*. www.astm.org
- ASTM C114. (2019). *Standard Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement*. <https://doi.org/10.1520/C0114-11A>
- Standard Guide for Quantitative Analysis by Energy Dispersive Spectroscopy (EDS)., West Conshohocken, PA: ASTM International. (2012).
- ASTMD934-83. (2017). D934-83. <https://doi.org/10.1520/D0934-08>
- ASTME863. (2004). *Standard Practice for Describing Flame Atomic Absorption Spectroscopy Equipment*. <https://www.astm.org/e0863-98r04e01.html>
- B. Kebbekus, B. (2003). Sample Preparation Techniques in Analytical Chemistry. *Sample Preparation Techniques in Analytical Chemistry*, 162, 227–240. https://www.academia.edu/33947559/Sample_Preparation_Techniques_in_Analytical_Chemistry
- Bakharev, T. (2005). Durability of geopolymer cements in acids. *Cement and Concrete Research*, 1654–1662.
- Barbhuiya, S., Das, B. B., & Adak, D. (2024). A comprehensive review on integrating sustainable practices and circular economy principles in concrete industry. *Journal of Environmental Management*.
- Bedoya, C. (2018). Construcción de vivienda sostenible con bloques de suelo cemento: del residuo al material. *Revista de Arquitectura*, 20(1), 62–70. <https://doi.org/10.14718/revarq.2018.20.1.1193>
- Bedoya Montoya, C. M. (2011). Construcción sostenible para volver al camino. *Biblioteca Jurídica Díké; MARES Consultoría Sostenible*. [https://doi.org/ISBN 978-958-98269-2-8](https://doi.org/ISBN%20978-958-98269-2-8).
- Bella, J., Saout, C. L., & Bennani, A. (2020). Mechanical properties and microstructural analysis of metakaolin-based geopolymer mortars. *Construction and Building Materials*, .
- Bella, N., Gudiel, E., Soriano, L., Font, A., Borrachero, M. V., Paya, J., & Monzó, J. M. (2020). Formulation of alkali-activated slag binder destined for use in developing countries. *Applied Sciences (Switzerland)*, 10(24), 1–16. <https://doi.org/10.3390/app10249088>

- Bernal, S. A., et al. (2016). Sulfate resistance of alkali-activated binders: Mechanisms and design considerations. *Cement and Concrete Research*, 77, 141–152.
- Bernal, S. A., & Provis, J. L. (2014). Durability of alkali-activated materials: Progress and perspectives. *Journal of the American Ceramic Society*, 97(4), 997–1008. <https://doi.org/10.1111/JACE.12831>
- Blowes, D. W., Ptacek, C. J., & Jambor, J. L. (2003). In-situ remediation of Cr(VI)-contaminated groundwater using permeable reactive walls: Laboratory studies. *Environmental Science & Technology*.
- Bonilla Coca, M. C., Andrade Valle, A. I., & Castillo Campoverde, T. O. (2022). Incorporación de mascarillas quirúrgicas recicladas a lamapostería realizada con suelo-cemento. *Avances En Ingeniería 2021, 2022*, ISBN 978-9942-615-05-3, Págs. 419-446, 419–446. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=9737196>
- Brown, P. ., & Skoog, D. . (2005). Fundamentals of analytical chemistry. In Thomson Brooks/Cole.
- C1611, A. (2014). *ASTM C1611: Standard Test Method for Slump Flow of Self-Consolidating Concrete*.
- C39, A. (n.d.). *ASTM C39: Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. 2018.
- Cajamarca, J., & Paullán, E. (2023). *Nuevo conglomerante sostenible mediante la activación de piedra pómez y polvo de ladrillo*.
- Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2018). *Materials science and engineering: An introduction*. John Wiley & Sons.
- Cámara de la Construcción de Guayaquil. (2023). *Informe técnico sobre tendencias constructivas en Ecuador*.
- Castillo, T., Paredes, M., Andrade, A., Gaibor, J., & Merino, K. (2023). Losses in Precast Concrete: A Case Study in Ecuador. *Civil Engineering and Architecture*. <https://doi.org/https://doi.org/10.13189/cea.2023.110501>
- Chatan House Report. (2018). *Making Concrete Change: Innovation in Low-carbon Cement and Concrete*. <https://www.chathamhouse.org/2018/06/making-concrete-change-innovation-low-carbon-cement-and-concrete>
- Chen, W., Zhou, W., & Liu, X. (2019). Acid neutralization capacity and its implications in cementitious materials: A review. *Construction and Building Materials*,.
- Christian, G. D. . (2018). *Analytical chemistry*. 812. https://books.google.com/books/about/Analytical_Chemistry.html?id=sfDvAAAAMAAJ
- Churata, R., Almirón, J., Vargas, M., Tupayachy-Quispe, D., Torres-Almirón, J., Ortiz-Valdivia, Y., &

- Velasco, F. (2022). Study of Geopolymer Composites Based on Volcanic Ash, Fly Ash, Pozzolan, Metakaolin and Mining Tailing. *Buildings*, 12(8). <https://doi.org/10.3390/BUILDINGS12081118>
- Collins, F., & Turner, L. K. (2013). Carbon dioxide equivalent (CO₂-e) emissions: A comparison between geopolymer and OPC cement concrete. *Construction and Building Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.01.023>
- Cornejo, P. (2017). Depósitos minerales no metálicos en Ecuador. https://www.researchgate.net/publication/317613312_DEPOSITOS_MINERALES_NO_METALICOS_DEL_ECUADOR
- Corrales, G. M. (2015). Síntesis de cementantes hidráulicos alternativos mediante la geopolimerización de escorias de fundición de concentrados de Pb-Zn.
- Criado, M., Palomo, A., & Fernández-Jiménez, A. (2020). Alkali activation of different aluminosilicates as a methodology for the design of sustain-able cementitious materials. *Cement and Concrete Composites*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103734>
- Cullity, B. ., & Stock, S. . (2014). Elements of X-Ray Diffraction. *Pearson New International Edition*. www.pearsoned.co.uk
- Das, A., Kumar, R., & Singh, S. (2020). Impacto del humo de sílice en las propiedades mecánicas de geopolímeros: una revisión crítica. *Construction and Building Materials*.
- Das, S. K., Mustakim, S. M., Adesina, A., Mishra, J., Alomayri, T. S., Assaedi, H. S., & Kaze, C. R. (2020). Fresh, strength and microstructure properties of geopolymer concrete incorporating lime and silica fume as replacement of fly ash. *Journal of Building Engineering*, 32(September), 101780. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101780>
- Davidovits, J. (2020). Geopolymer technology, the current state of the art (3rd ed.). *Geopolymer Institute*.
- Davidovits, J. (1991). Geopolymers: Inorganic polymeric composites. *Journal of Thermal Analysis*. [https://doi.org/10.1016/0167-5649\(91\)90033-6](https://doi.org/10.1016/0167-5649(91)90033-6)
- Davidovits, Joseph. (2015). Geopolymer Chemistry and Applications. 5-th edition. J. Davidovits.– Saint-Quentin, France, 5(April), 680.
- Deer, W. A., Howie, R. A., & Zussman, J. (2013). An Introduction to the Rock-Forming Minerals. *An Introduction to the Rock-Forming Minerals*. <https://doi.org/10.1180/DHZ>
- Deventer, J. (2009). *Geopolymers (Structure, processing, properties and industrial applications)*.
- Ducci, L., Rizzo, P., Pinardi, R., Solfrini, A., Maggiali, A., Pizzati, M., & Celico, F. (2023). What Is the Impact of Leaky Sewers on Groundwater Contamination in Urban Semi- Confined Aquifers?

-
- A Test Study Related to Fecal Matter and Personal Care Products (PCPs). *Hydrology*. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/hydrology10010003>
- Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J. L., Lukey, G. C., Palomo, A., & van Deventer, J. S. J. (2007). No Title. *The Current State of the Art. Journal of Materials Science*.
- Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J. L., Lukey, G. C., Palomo, A., & Van Deventer, J. S. J. (2007). Geopolymer technology: The current state of the art. *Journal of Materials Science*, 42(9), 2917–2933. <https://doi.org/10.1007/S10853-006-0637-Z>
- Reglamento para el control de sustancias químicas peligrosas., (2023).
- Espinoza, L., Vázquez, M., & García, J. (2020). Prácticas locales de dosificación de hormigón en Ecuador: Análisis comparativo. *Revista de Ingeniería Civil*.
- Falizi, N. J., Hacifazlıoğlu, M. C., Parlar, İ., Kabay, N., Pek, T., & Yüksel, M. (2018). Evaluation of MBR treated industrial wastewater quality before and after desalination by NF and RO processes for agricultural reuse. *Journal of Water Process Engineering*, 22, 103–108. <https://doi.org/10.1016/J.JWPE.2018.01.015>
- Fernández-Jiménez, A., & Palomo, A. (2011). Engineering properties of alkali-activated fly ash concrete. *ACI Materials Journal*,.
- Fernández-Jiménez, A., Palomo, A., & Criado, M. (2005). Microstructure development of alkali-activated fly ash cement: A descriptive model. *Cement and Concrete Research*, 35(6), 1204–1209. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2004.08.021>
- Fernández-Jiménez, A., Palomo, A., & Krivenko, P. (2018). Alkali-activated binders: Durability and corrosion performance. *Materials*, 11(6), 1155. <https://doi.org/10.3390/ma11061155>
- Fernandez, A., Palomo, A., & López, C. (2010). *Engineering properties of alkali-activated fly ash*. https://www.researchgate.net/publication/279897807_Engineering_properties_of_alkali-activated_fly_ash
- Fernández, R., Rodríguez, A., & Sánchez, M. (2016). Thermal Effects on Amorphous Silica Phases in Volcanic Rocks. *Journal of Materials Science*. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-9123-7_12
- García-Lodeiro, I., et al. (2015). Compatibility studies between N-A-S-H and C-A-S-H gels. *Cement and Concrete Research*.
- García, M., & Torres, A. (2019). Reacciones ácido-base en medios acuosos. *Química Aplicada*, 15(2), 112-125.
- GlobalABC. (2023). Global status report for buildings and construction 2023. UNEP.
- GlobalABC. (2022). Global Alliance for Buildings and Construction. *Global Status Report for Buildings and Construction*. <https://globalabc.org/resources/publications/2022-global-status-report-buildings-and-construction>

- Goldstein, J. I., Newbury, D. E., Joy, D. C., Lyman, C. E., Echlin, P., Lifshin, E., & Newbury, D. C. (2018). *Scanning electron microscopy and X-ray microanalysis*. Springer.
- González, L., Tutora, E., & Martín, S. G. (2021). *Estudio para la reducción del impacto medioambiental y la huella de carbono ocasionada en la producción del clínker*.
- Graybeal, B. A. (2006). Ultra-high performance concrete. *Federal Highway Administration*.
- Guzmán, A., Rodríguez, E., & Paredes, C. (2019). Sustainable geopolymeric composites using volcanic ash from the Andes. *Construction and Building Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.203>
- Habert, G., Dillenburger, K., de Lacaillerie, J. D. E., & Roussel, N. (2011). Sustainability of binders through geographical diversity. *Cement and Concrete Research*.
- Haddad, R. H., & Lababneh, Z. K. (2020). Geopolymer composites using natural pozzolan and oil-shale ash base materials: A parametric study. *Construction and Building Materials*, 240. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117899>
- Harris, D. C. (2015). *Análisis químico cuantitativo*.
- Hayes, C. T., Costa, K. M., Anderson, R. F., Calvo, E., Chase, Z., Demina, L. L., Dutay, J. C., German, C. R., Heimbürger-Boavida, L. E., Jaccard, S. L., Jacobel, A., Kohfeld, K. E., Kravchishina, M. D., Lippold, J., Mekik, F., Missiaen, L., Pavia, F. J., Paytan, A., Pedrosa-Pamies, R., ... Zhang, J. (2021). Global Ocean Sediment Composition and Burial Flux in the Deep Sea. *Global Biogeochemical Cycles*, 35(4), e2020GB006769. <https://doi.org/10.1029/2020GB006769>
- Hertwich, E. G., Lifset, R., Pauliuk, S., & Heeren, N. (2022). Resource efficiency and climate change: Material efficiency strategies for a low-carbon future. *International Resource Panel, United Nations Environment Programme*. <https://www.resourcepanel.org/reports/resource-efficiency-and-climate-change>
- Hossain, M. U., Ng, S. T., Antwi-Afari, P., & Amor, B. (2020). Circular economy and the construction industry: Existing trends, challenges and prospective framework for sustainable construction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 130, 109948.
- Huey Li, O., Yun-Ming, L., Cheng-Yong, H., Bayuaji, R., Mustafa Al Bakri Abdullah, M., Kai Loong, F., Soo Jin, T., Hui Teng, N., Nabilek, M., Je, B., & Yong Sing, N. (2021). *Evaluation of the Effect of Silica Fume on Amorphous Fly Ash Geopolymers Exposed to Elevated Temperature*. <https://doi.org/10.3390/magnetochemistry7010009>
- Huseien, G. F., Sam, A. R. M., Shah, K. W., & Mirza, J. (2022). Circular economy potential of geopolymer concrete: A review on waste valorization and sustainability. *Construction and Building Materials*, 324, 126686. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126686>

- Ibrahim, M. (2022). *Geological and Geochemical exploration methods for mineral resources (skarn deposits and rare earth elements)*. https://www.researchgate.net/publication/373898522_Geological_and_Geochemical_exploration_methods_for_mineral_resources_skarn_deposits_and_rare_earth_elements
- IDAP. (2018). *Visión General de los Suelos del Ecuador*. https://www.researchgate.net/publication/360648813_Vision_General_de_los_Suelos_del_Ecuador
- IEA. (2021). *Cement Technology Roadmap: Towards Net Zero Emissions*. <https://www.iea.org/reports/cement-technology-roadmap>
- IEA. (2023a). *Cement – Analysis*. <https://www.iea.org/reports/cement>
- IEA. (2023b). *Cement*. In *IEA*.
- Iler, R. K. (1979). *The chemistry of silica; Solubility, polymerization, colloid and surface properties and biochemistry. The occurrence, dissolution and deposition of silica*. Wiley. New York, 602. <https://www.wiley.com/en-us/The+Chemistry+of+Silica%3A+Solubility%2C+Polymerization%2C+Colloid+and+Surface+Properties+and+Biochemistry+of+Silica-p-9780471024040>
- INEC. (2021). *Encuesta Nacional de Edificaciones*. www.ecuadorencifras.com
- NTE INEN 1856:2010 - Hormigón endurecido., (2010).
- INEN 198. (1987). Resistencia a la flexión y compresión de morteros. *Instituto Ecuatoriano de Normalización*.
- Norma Técnica Ecuatoriana INEN 2380: Cemento hidráulico., (2019).
- NTE INEN 2860: Ladrillos cerámicos, (2017).
- ASTM E766-15 Standard Practice for Evaluating and Reporting the Visual Quality of Scanning Electron Microscope (SEM) Images. West Conshohocken, PA: ASTM International., (2015).
- IPCC. (1977). *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Greenhouse Gas Inventory Reference Manual*.
- ISO 13315-1: Environmental management for concrete and concrete structures - Part 1: General principles, (2012).
- ISO 16700:2016 Imaging processing and analysis — Vocabulary. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, (2016).
- ISO 16700:2016 Imaging processing and analysis — Vocabulary. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization., (2016).
- ISO 18264:2016 Metallic materials — Unalloyed and alloyed steels — Micrographic determination

- of grain size. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, (2016).
- ISO 133322. (2014). *Particle size analysis — Image analysis methods* . www.iso.org
- ISO 15586. (2004). <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0031534>
- Johnson, D. B., & Hallberg, K. B. (2005). Acid mine drainage remediation options: A review. *Science of the Total Environment*., 3–14.
- Jones, C. W. (1999). Applications of Hydrogen Peroxide and Derivatives Volume 2 of RSC clean technology monographs. Royal Society of Chemistry, 264. https://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=emwoDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR7&dq=Applications+of+hydrogen+peroxide+and+its+derivatives&ots=kxPflUU2Dc&sig=qwsQqF5nMRqqWR-APHO0cPL_kWY#v=onepage&q=Sodium+Percarbonate&f=false
- Joseph, D. (2008). Geopolymer Chemistry and Applications, 5th edition. Davidovits. Joshep, 1 (January 2008), 1–698. <https://www.researchgate.net/publication/265076752>
- Juenger, M. C. G., Winnefeld, F., Provis, J. L., & Ideker, J. H. (2011). Advances in alternative cementitious binders. *Cement and Concrete Research*, 41(12), 1232–1243. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2010.11.012>
- Kaja, N., & Goyal, S. (2023). Impact of Construction Activities on Environment. *International Journal of Engineering Technologies and Management Research*, 10(1), 17–24. <https://doi.org/10.29121/ijetmr.v10.i1.2023.1277>
- Kamseu, E., & Leonelli, C. (2009). *Investigation of Volcanic ash based geopolymers as Potential Building Materials* | Request PDF. https://www.researchgate.net/publication/258926666_Investigation_of_Volcanic_ash_based_geopolymers_as_Potential_Building_Materials
- Karthiyaini, S., & Konduru, H., & O. (2025). Comparative study of silica fume and sodium silicate as replacement of active reactive silica in bauxite residue-based geopolymer mortar. *Case Studies in Construction Materials*, Elsevier. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509525001019>
- Kaufmann, J., Górski, W., & Hernández, R. (2012). Reactivity and Expansion of Geopolymers: Insights and Applications. *Journal of Materials Science*, 1452–1460. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11041-012-9392-7>
- Klug, H., & Alexander, L. (1974). X-ray Diffraction Procedures: For Polycrystalline and Amorphous Materials, 2nd Edition. Wiley, New York, EUA, 992. <https://www.wiley.com/en-us/X-Ray+Diffraction+Procedures%3A+For+Polycrystalline+and+Amorphous+Materials%2C+2nd+Edition-p-9780471493693>

- Kockal, N. U., Beycan, O., & Gulmez, N. (2018). Effect of binder type and content on physical and mechanical properties of geopolymers. *Sādhanā*, 43(4), 1–9. <https://doi.org/10.1007/S12046-018-0806-1>
- León-Velez, A., & Guillén-Mena, V. (2020). Energía contenida y emisiones de CO₂ en el proceso de fabricación del cemento en Ecuador. *Ambiente Construido*, 20(2), 423. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1590/S1678-86212020000300448>
- Liew, Y.-M., Kamarudin, H., Al Bakri, A. M., Binhussain, M., Luqman, M., Nizar, I. K., Ruzaidi, C. M., & Heah, C. (2016).). Optimization of solids-to-liquids and alkali activator ratios of calcined kaolin geopolymeric powder. *Construction and Building Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.154>
- Livi, C. N., & Repette, W. L. (2017). Effect of NaOH concentration and curing regime on geopolymer. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, 10(6), 1174–1181. <https://doi.org/10.1590/S1983-41952017000600003>
- Llivicura Landázuri, C. S. (2024). *Diseño y evaluación de mezclas de cemento polimérico como material alternativo para la fabricación de instrumentos musicales*. Universidad de Cuenca. <https://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/45708>
- Lothenbach, B., et al. (2021). Supplementary cementitious materials. *Cement and Concrete*, 141. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.10633>
- Lothenbach, B., Scrivener, K. L., & Hooton, R. D. (2007). Supplementary cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, 37. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.01.002>
- Luo, T., Hua, C., Liu, F., Sun, Q., Yi, Y., & Pan, X. (2022). Effect of adding solid waste silica fume as a cement paste replacement on the properties of fresh and hardened concrete. *Case Studies in Construction Materials*, Elsevier. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509522001802>
- Malavé Panchana, M. B., & Jativa Toapanta, A. N. (2023). *Estudio de materiales sostenibles y sustentables para la construcción de edificaciones ecoamigables en la provincia de Santa Elena*. <https://repositorio.upse.edu.ec/handle/46000/10587>
- Marcillo, A., Mellado, A., Borrachero, M., Monzó, J., Soriano, L., & Payá, J. (2021). Resistencia al ataque ácido en pastas de activación alcalina basadas en escoria de alto horno. *Congreso Latino-Americano de Patología de Construcción*, 1786–1799. <https://doi.org/https://doi.org/10.4322/conpat2021.978-65-86819-19-9>
- Marcillo Zapata, C. (2021). *Resistencia al ataque ácido de matrices activadas alcalinamente de escoria de alto horno fabricadas con activadores alternativos basados en ceniza de biomasa*. [Universitat Politècnica de València]. <https://riunet.upv.es/handle/10251/168649>
- Martín Rodríguez, J. A. (2018a). *Ataque ácido en morteros de activación alcalina: Propuesta de*

- ensayo. Universitat Politècnica de València.
- Martín Rodríguez, J. A. (2018b). Ataque ácido en morteros de activación alcalina. *Universitat Politècnica de València*.
- Martínez García, R. (2017a). *Huella de carbono de bloques de suelo estabilizado con geopolímeros preparados a partir de materiales residuales: Aplicación en países en desarrollo*. Universitat Politècnica de València.
- Martínez García, R. (2017b). *Huella de carbono de bloques de suelo estabilizado con geopolímeros preparados a partir de materiales residuales: Aplicación en países en desarrollo*. Universitat Politècnica de València.
- McLellan, B. C., Williams, R. P., Lay, J., van Riessen, A., & Corder, G. D. (2011). Costs and carbon emissions for geopolymer pastes in comparison to ordinary Portland cement. *Journal of Cleaner Production*, 19(9–10), 1080–1090. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.02.010>
- Mehta, A., & Siddique, R. (2016). An overview of geopolymers derived from industrial by-products. *Construction and Building Materials*, 127, 183–198. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.136>
- Mehta, P., & Monteiro, P. (2014). *Concrete: Microstructure, properties, and materials*. McGraw-Hill Education.
- Meli, R., Crisafulli, F., Dai, A. J., Farsi, C. M., Hart, A. T., Mebarki, A., Moghadam, F. A. S., Quiun, D., Tomazevic, M., & Yamin, S. L. (2011). *SEISMIC DESIGN GUIDE FOR LOW-RISE CONFINED MASONRY BUILDINGS Prepared by Confined Masonry Network A Project of the World Housing Encyclopedia, EERI & IAEE With funding support from Risk Management Solutions*. www.eeri.org
- Mellado, A., Catalán, C., Bouzón, N., Borrachero, M. V., Monzó, J. M., & Payá, J. (2014). Carbon footprint of geopolymeric mortar: study of the contribution of the alkaline activating solution and assessment of an alternative route. *RSC Advances*, 4(45), 23846–23852. <https://doi.org/10.1039/C4RA03375B>
- Mendes, B. C., Pedroti, L. G., Vieira, C. M. F., Carvalho, J. M. F., Ribeiro, J. C. L., Albuini-Oliveira, N. M., & Andrade, I. K. R. (2022). Evaluation of eco-efficient geopolymer using chamotte and waste glass-based alkaline solutions. *Case Studies in Construction Materials*, 16. <https://doi.org/10.1016/J.CSCM.2021.E00847>
- NEC-SE-FIRE: Requisitos de resistencia al fuego de elementos estructurales., (2015).
- NEC-SE-HM.Norma Ecuatoriana de la Construcción: Hormigón Armado, (2015).
- MIDUVI. (2017). *Manual de construcción con mampostería confinada*.
- Reglamento de Construcción Sostenible, (2021).

- Min, F. S., Yong, H. C., Ming, L. Y., Mustafa, M., Bakri, A., Razi, H., Low, F. W., Hui-teng, N., & Yong-sing, N. (2022). Effect of Silica Fume and Alumina Addition on the Mechanical and Microstructure of Fly Ash Geopolymer Concrete. *Polska Akademia Nauk*, 67, 197–202. <https://doi.org/10.24425/amm.2022.137489>
- Mindess, S., Young, J. F., & Darwin, D. (2003). *Concrete*. Prentice Hall. [https://www.scirp.org/\(S\(351jmbnt-vnsjt1aadkoze\)\)/reference/referencespapers?referenceid=1058986](https://www.scirp.org/(S(351jmbnt-vnsjt1aadkoze))/reference/referencespapers?referenceid=1058986)
- Monteiro, P. J. M., Miller, S. A., & Horvath, A. (2017). Towards sustainable concrete. *Nature Materials*, 16(7), 698–699. <https://doi.org/10.1038/nmat4930>
- Moran, S., Paola, L., Carlos, I., & Lazo, A. P. (2020). *Investigación del rendimiento del cemento portland y Geopolímeros, en presencia de fluido de perforación, base agua*.
- Morris, R. V., Ruff, S. W., & Greeley, R. (2000). Characterization of Amorphous Aluminum-Silicates in Volcanic Ash Deposits Using X-ray Diffraction Techniques. *Geochimica et Cosmochimica*, 7, 64. <https://doi.org/1249-1260>
- Murphy, D. . (2016). *Fundamentals of light microscopy and electronic imaging*. John Wiley & Sons.
- Navas de Garcia, A., Reyes, R., & Galvan, L. (2015). *Impactos ambientales asociados con el proceso de producción del concreto*. 67–80. <http://ingenieria.ute.edu.ec/enfoqueute/>
- NEC-SE-MP. (2014). *MAMPOSTERIA ESTRUCTURAL*.
- Nec, C., & Resistente, D. S. (2015). *NEC-SE-DS*.
- Nematollahi, B., et al. (2023). Acid resistance of geopolymer materials: Mechanisms, testing and future directions. *Construction and Building Materials*, 368, 130325. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130325>
- Nematollahi, B., Sanjayan, J., & Shaikh, F. U. A. (2023). Durability of ambient cured geopolymer concrete: A critical review. *Cement and Concrete Composites*, 135, 104824. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104824>
- Neville, A. M. (2011). *Properties of Concrete*. Pearson Education Limited, Essex. Scientific Research Publishing. <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1855282>
- Nordstrom, D. K., & Alpers, C. N. (1999).). Negative pH, efflorescent mineralogy, and consequences for environmental restoration at the Iron Mountain Superfund site. *Proceedings of the National Academy of Sciences*.
- NTE INEN 488. (2009). Determinación de la Resistencia a la Compresión de 50 mm de Arista. *Instituto Ecuatoriano de Normalización*, 19.

- NTE INEN 489. (1987). Determinación de la finura por tamizado seco. *Instituto Ecuatoriano de Normalización, 0489*.
- NTE INEN 856. (2010). *DENSIDAD Y ABSORCIÓN*.
<https://www.studocu.com/ec/document/universidad-del-azuy/resistencia-de-materiales-2/nte-inen-856-densidad-relativa-del-agregado-fino/39868633>
- Okoye, F. N., Prakash, S., & Singh, N. B. (2017). Durability of geopolymer composites in aggressive environments: A review. *Journal of Building Engineering*.
- Okoye, F. N., Prakash, S., & Singh, N. B. (2017). Durability of geopolymer composites in aggressive environments: A review. *Journal of Building*, 192–205.
- Orejuela, I., Plúa, A., Ceballos, L., & Vera, D. (2024). *Vista de Hormigones de ultra alto desempeño: una revisión de sus propiedades, aplicaciones y desafíos*.
<https://journalingeniar.org/index.php/ingeniar/article/view/269/376>
- Pacheco-Torgal, F., Jalali, S., & Labrincha, J. (2013). *Eco-efficient construction and building materials*. Woodhead Publishing.
- Pacheco-Torgal, F., Castro-Gomes, J., & Jalali, S. (2008). Alkali-activated binders: A review. Part 1. Historical background, terminology, reaction mechanisms and hydration products. *Construction and Building Materials*.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.10.015>
- Pacheco-Torgal, F., Labrincha, J. A., & Provis, J. L. (2022). *Handbook of alkali-activated cements, mortars and concretes*. Woodhead Publishing.
- Palomo, A., Grutzeck, M. ., & Blanco-Valera, M. . (1999). *Alkali-Activated Fly Ashes - A Cement for the Future*.
https://www.researchgate.net/publication/222502079_Alkali-Activated_Fly_Ashes_-_A_Cement_for_the_Future
- Pastori, S., & Mazzucchelli, E. S. Wallhagen, M. (2022). Hybrid timber-based structures: A state of the art review. *Construction and Building Materials*.
- Payá, J., Monzó, J., Borrachero, M. V., Soriano, L., & Tashima, M. M. (2022). Activadores alternativos para cementos de activación alcalina. *ALCONPAT*, 1, 16–31.
<https://doi.org/10.4322/conpat2021.686>
- Pérez, L., Belkis, M., Fuentes, D., Peña, C., & Alonso, A. (2022). *Empleo de adoquines de concreto en la construcción de pavimentos*.
<https://www.redalyc.org/journal/1939/193971847007/html/>
- Pérez, M. (2015). *Durabilidad de cementos activados alcalinamente: Resistencia al ataque ácido*.
- Pillajo Correa, E. D. (2022). *Análisis de ciclo de vida de materiales de construcción*.

-
- <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/22488>
- PNUMA. (2023). *Informe anual 2023 | UNEP - UN Environment Programme*.
<https://www.unep.org/es/resources/informe-anual-2023>
- Pré Consultants. (2014). *SimaPro Craft, Software de análisis de ciclo de vida*.
<https://network.simapro.com/cadis/>
- Provis, J. ., & Van Deventer, J. S. . (2009). 1 - Introduction to geopolymers BT - *Geopolymers. Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering*, 1–11.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781845694494500011>
- Provis, J. L., & Bernal, S. A. (2017). Geopolymers and related alkali-activated materials. *Annual Review of Materials Research*.
- Provis, J. L., & Bernal, S. A. (2022). Advances in geopolymer science and technology. *RILEM Technical Letters*, 7, 35-48.
- Provis, J. L., & Van Deventer, J. S. J. (2014). Alkali Activated Materials: State-of-the-Art Report. *State-of-the-Art Report. RILEM TC 224-AAM*.
- Provis, J. L., van Deventer, J. S. J., & Duxson, P. (2019). RILEM Technical Committee 247-DTA: Durability testing of alkali-activated materials. *RILEM Technical Letters*, 4, 68–74. H.
<https://doi.org/https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2019.91>
- Provis, J., & van Deventer, J. S. . (2014). *Alkali Activated Materials*. 13.
<https://doi.org/10.1007/978-94-007-7672-2>
- Provis, JL, Palomo, & Shi. (2019). *Advances in understanding alkali-activated materials*.
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.04.013>
- Puertas, F., Barba, A., Gazulla, M. F., Gómez, M. P., Palacios, M., & Martínez-ramírez, S. (2006). Residuos cerámicos para su posible uso como materia prima en la fabricación de clinker de cemento portland: Caracterización y activación alcalina. *Materiales de Construcción*, 56(281), 73–84. <https://doi.org/10.3989/MC.2006.V56.I281.94>
- Ralli, G., & Pantazopoulou, S. J. (2021). Performance of geopolymer mortars under aggressive environmental exposures. *Construction and Building Materials*.
- Ramaswamy, S., & Santhanam, M. (2017). Durability of concrete structures in aggressive marine environments. *Ocean Engineering*, 518–529.
- Reed, S. J. B. (2005). Electron Microprobe Analysis and Scanning Electron Microscopy in Geology. *Cambridge University Press*.
- Rees, C. A., Provis, J. L., Lukey, G. C., & Van Deventer, J. S. J. (2007). The mechanism of geopolymer gel formation investigated through Si and Al MAS NMR. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 97–105.

- Renovables, M. de E. y R. N. N. (2022). *Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables*.
- Richard, P., & Cheyrezy, M. (1995). Composition of reactive powder concretes. *Cement and Concrete Research*.
- Rios, S., Pérez, M., & González, J. (2014). Optimización de las mezclas de geopolímeros a base de ceniza volante y escorias de alto horno. *Revista de Materiales de Construcción*, 215–227.
- Risdanareni, P., Villagran, Y., Schollbach, K., Wang, J., & De Belie, N. (2020). Properties of alkali activated lightweight aggregate generated from Sidoarjo Volcanic Mud (Lusi), fly ash, and municipal solid waste incineration bottom ash. *Materials*, 13(11). <https://doi.org/10.3390/MA13112528>
- Rodríguez, E., & Pérez, L. (2021). *Mecanismos de degradación ácida en compuestos orgánicos*. *Avances en Corrosión*, 18(1), 67-80.
- Rodríguez, M. (n.d.). Ataque ácido en morteros de activación alcalina: Propuesta de ensayo. 2018.
- Rodríguez Martínez, E. D. (2009). *Eficiencia de activadores alcalinos basados en diferentes fuentes de sílice para la producción de sistemas geopoliméricos de ceniza volante*. Universitat Politècnica de València.
- Rovnaník, P. (2010). Effect of curing temperature on the development of hard structure of metakaolin-based geopolymer. *Construction and Building Materials*, 24(7), 1176–1183. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2009.12.023>
- Ruiz, A., & Celi, J. (2018). *Vista de FABRICACIÓN DE LADRILLOS MACIZOS CON DIATOMEAS CALCINADAS.pdf*.
- Safari, A., Bahrami, N., & Hashemi, S. (2020). Effect of sodium silicate on geopolymer properties. *Construction and Building Materials*.
- Safari, Z., Kurda, R., Al-Hadad, B., Mahmood, F., & Tapan, M. (2020a). Mechanical characteristics of pumice-based geopolymer paste. *Resources, Conservation and Recycling*, 162. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105055>
- Safari, Z., Kurda, R., Al-Hadad, B., Mahmood, F., & Tapan, M. (2020b). Mechanical characteristics of pumice-based geopolymer paste. *Resources, Conservation and Recycling*, 162. <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2020.105055>
- Salehi, S., Khatibinia, M., & Jahangiri, H. (2017). Experimental investigation on mechanical properties of geopolymer concrete under different curing conditions. *Journal of Materials in Civil Engineering*,. [https://doi.org/https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002036](https://doi.org/https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002036)
- Salirrosas, A. (2020). *Geopolímeros en la industria de la construcción: Aplicaciones con ceniza*

volante y puzolana natural.

- Sambucci, M., Ferrari, L., & Catauro, M. (2011). Chemical resistance of sodium-based geopolymers in acidic environments: Structural and durability insights. *Journal of Construction and Building Materials*,. <https://doi.org/https://doi.org/xxxx>
- Sanchez, F., & Sobolev, K. (2010). Nanotechnology in concrete – A review. *Construction and Building Materials*,.
- Santamaría, A., Torres, J., & Pérez, R. (2019). Influence of pumice aggregate on lightweight geopolymer concrete properties. *Construction and Building Materials*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.015>
- Santamaría, D. (2017). *Catálogo de eventos volcánicos ocurridos en el Ecuador continental desde el Plioceno y análisis de la frecuencia eruptiva*. https://www.researchgate.net/publication/314864486_Catalogo_de_eventos_volcanicos_ocurridos_en_el_Ecuador_continental_desde_el_Plioceno_y_analisis_de_la_frecuencia_eruptiva
- Santamaría, J. L., Adame, B., Bermeo, C., Santamaría, J. L., Adame, B., & Bermeo, C. (2021). Influencia de la calidad de los agregados y tipo de cemento en la resistencia a la compresión del hormigón dosificado al volumen. *Revista Digital Novasinergia*, 4(1), 91–101. <https://doi.org/10.37135/NS.01.07.05>
- Sawan, S. E. A., Zawrah, M. F., & Khattab, R. M. (2020). In-situ formation of geopolymer foams through addition of silica fume: Preparation and sinterability. *Materials Chemistry and Physics, Elsevier*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0254058419307965>
- Schneider, M. (2019). The cement industry on the way to a low-carbon future. **Cement and Concrete Research*, 124. <https://doi.org/10.1016>
- Schwarz, J., Camilleri-Mallia, G., & Foderà, S. (2010). Influence of waste glass addition on physical and mechanical properties of concrete. *Construction and Building*, 639–643.
- Scrivener, K. L., & Snellings, R. (2018). Reactivity of calcined clays. *Cement and Concrete Research*, 49–54.
- Scrivener, Karen L., John, V. M., & Gartner, E. M. (2018). Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry. *Cement and Concrete Research*, 114, 2–26. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2018.03.015>
- Scrivener L., K., Vanderley M., J., & Gartner M., E. (2018). *Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low CO₂ cement based materials industry*. https://www.researchgate.net/publication/326037964_Eco-efficient_cements_Potential_economically_viable_solutions_for_a_low-CO_2_cement-based_materials_industry

- Segura-sierpe, Y. P., Borrachero-rosado, M. V., & Monzó-balbuena, J. M. (2016). *Preliminary studies on hydrated cement for its reuse in geopolymers Estudios preliminares sobre cemento hidratado para su reutilización en geopolímeros*.
- Shi, C., Krivenko, P. V., & Roy, D. M. (2011). *Alkali-Activated Cements and Concretes*. CRC Press.
- Shi, C., Qu, F., & Zhang, Z. (2023). Energy consumption and carbon footprint of geopolymer concrete production: A comparative analysis. *Cement and Concrete Research*, 165, 107083. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.107083>
- Shi, Caijun, Roy, D., & Krivenko, P. (2011). *Alkali-Activated Cements and Concretes. Alkali-Activated Cements and Concretes*. <https://doi.org/10.1201/9781482266900>
- Siddique, R., Khatib, J., & Kaur, I. (2017). Use of recycled plastic in concrete: A review. *Waste Management*.
- Siddique, R., & Klaus, J. (2009). Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete. *Construction and Building Materials*.
- Sierpes, S. Y., Borrachero Rosado, M. V., Monzó Balbuena, J. M., & Payá Bernabeu, J. (2016). *Preliminary studies on hydrated cement for its reuse in geopolymers*. <https://doi.org/https://doi.org/10.15446/dyna.v83n196.54189>
- Siman, S., & Nugraha, N. (2024). Comparison Of Traditional And Modern Construction Methods In Civil Engineering Projects. *IRCEE*. <https://doi.org/https://doi.org/10.70134/ircee.v1i1.43>
- Skoog, D. A., West, D. M., Holler, F. J., & Crouch, S. R. (2014). *Fundamentos de Química Analítica* (C. Learning. (Ed.); (9.ª ed.)).
- Skoog, Douglas A., Holler, F. J., & Crouch, S. R. (2017). *Principles of Instrumental Analysis Seventh Edition*. Cengage Learning, 1–959.
- Smith, K., Johnson, L., & Williams, D. (2020). Interacción del ácido nítrico con agua destilada en experimentos de laboratorio. *Journal of Chemical Experiments*.
- Snellings, R., Mertens, G., & Elsen, J. (2012). Supplementary cementitious materials. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 74, 211–278. <https://doi.org/10.2138/RMG.2012.74.6>
- Solís Yépez, O. I., Salazar Miranda, D. A., Andrade Valle, A. I., & Castillo, T. O. (2024). Aislante térmico y acústico en revestimientos de módulos prefabricados con el uso de un mortero geopolimérico. 7(13), 10–23. <https://www.journalingeniar.org/index.php/ingeniar/article/view/192>
- Solorzano, L. (2024). *Elaboración de ladrillos ecológicos a partir de residuos plásticos para la construcción sostenible*.
- Sposito, G. (2008). *The chemistry of soils*. Oxford University Press.

- Standards., B. of I. (2021). *IS 12894:2021 - Specification for pulverized fuel ash-lime bricks: Vol. (2nd ed.)*.
- Sukontasukkul, P., & Chindaprasirt, P. (2020). Effect of fly ash/silica fume ratio and curing condition on mechanical properties of fiber-reinforced geopolymer. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*. <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/216503>
- Survey, U. S. G. (2024). Mineral commodity summaries 2024. *Mineral Commodity Summaries*. <https://doi.org/10.3133/MCS2024>
- Syvitski; James. (1991). *Principles, Methods and Application of Particle Size Analysis*. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511626142>
- Taylor, H. F. W. (1997). *Cement chemistry*. Thomas Telford.
- Técnicas., A. B. de N. (2022). *ABNT NBR 15270-3:2022 - Componentes cerâmicos — Blocos e tijolos para alvenaria — Parte 3: Blocos e tijolos cerâmicos de vedação — Terminologia e requisitos*.
- Temuujin, J., et al. (2009). Effect of curing conditions on properties of fly ash-based geopolymers. *Journal of Materials Science*.
- Tran, T. T., & Ghosh, P. (2020). Mechanical and microstructural characteristics of geopolymer concrete using volcanic pumice. *Construction and Building Materials*.
- Turner, L. K., & Collins, F. G. (2013). Carbon dioxide equivalent (CO₂-e) emissions: A comparison between geopolymer and OPC concrete. *Construction and Building Materials*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.01.023>
- Turner, L. K., Collins, F. G., & Keeler, J. (2023). Carbon footprint comparison of geopolymer and ordinary Portland cement concrete. *Journal of Cleaner Production*, 384, 135603. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135603>
- UNFCCC. (2015). *The Paris Agreement. United Nations Framework Convention on Climate Change*.
- Valle, P. del. (2023). *Ficha técnica de Silicato de Sodio*.
- Van Deventer, J. S. J. (2023). Commercialization of geopolymer technology: Current status and future prospects. *Materials Today Sustainability*, 21, 100293. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2022.100293>
- Van Deventer, Jannie S.J., Provis, J. L., & Duxson, P. (2012). Technical and commercial progress in the adoption of geopolymer cement. *Minerals Engineering*, 29, 89–104. <https://doi.org/10.1016/J.MINENG.2011.09.009>
- Vargas-López, A., Vázquez-Delgado, W., Valencia-Saavedra, W., & Mejía-de-Gutiérrez, R. (2022). Caracterización de un concreto geopolimérico fibrorreforzado para su aplicación

- en elementos constructivos. *Revista UIS Ingenierías*, 21(4).
<https://doi.org/10.18273/REVUIN.V21N4-2022004>
- Villariquin, M., Rodriguez, D., & Mejía, R. (2013). *Evaluación microestructural de geopolímeros basados en metacaolín y fuentes alternativas de sílice expuestos a temperaturas altas*.
https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-77432015000100011
- Villca Pozo, A. R. (2021). *Utilización de geopolímero para la mejora de las propiedades en morteros cal-puzolana y su empleo en países en desarrollo*. 1.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=297289&info=resumen&idioma=SPA>
- Vizcarra, G., Medina, J., & Huamaní, Y. (2020). Feasibility of volcanic ash-based geopolymers for urban pavements in seismic zones. *Materials Today: Proceedings*.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.01.377>
- Vogel, A. I. (2020). *Vogel's Textbook of Quantitative Chemical Analysis*.
- Wang, X., Ishida, T., & Stumm, W. (2021). Chemical degradation of cement-based materials: A review. *Cement and Concrete Research*.
- Weil, M., Dombrowski, K., & Buchwald, A. (2009). Life-cycle analysis of geopolymers. In *Geopolymers: Structures, Processing, Properties and Industrial Applications*. Elsevier Ltd.
<https://doi.org/10.1533/9781845696382.2.194>
- Welz, B., & Sperling, M. (2008). *Atomic absorption spectrometry*. 941.
- Wong, L. S., Al Bakri, A. M., & Liew, Y. M. (2023). Innovations in geopolymer-based precast construction elements. *Construction Innovation*, 23(1), 125-142.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1108/CI-03-2022-0057>
- Wong, Leong Sing. (2022). Durability Performance of Geopolymer Concrete: A Review. *Polymers* 2022, Vol. 14, Page 868, 14(5), 868. <https://doi.org/10.3390/POLYM14050868>
- Zannerni, M., Ranjbar, N., & Zhang, Z. (2020). Effect of acidic exposure on the microstructure and durability of geopolymer composites: A comparative study with Portland cement-based materials. *Cement and Concrete*.
- Zhang, P., et al. (2021). Effects of nano-SiO₂ and silica fume on mechanical properties and microstructure of cement-based materials. *Construction and Building Materials*.
- Zhang, B. (2024). Durability of low-carbon geopolymer concrete: A critical review. *Sustainable Materials and Technologies*, 40, E00882. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2024.e00882>
- Zhang, J. (2019). Performance assessment of prefabricated buildings: Comfort, energy efficiency, and occupant satisfaction. *Building and Environment*.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.10.051%0A>
- Zhang, Z., Provis, J. L., Reid, A., & Wang, H. (2014). Mechanical, thermal insulation, thermal

-
- resistance and acoustic absorption properties of geopolymer foam concrete. *Cement and Concrete Composites*, 62, 97–105. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.03.007>
- Zhang, Z., Provis, J. L., Reid, A., & Wang, H. (2018). Fly ash-based geopolymers: The relationship between composition, pore structure and efflorescence. *Cement and Concrete Research*, 30–40.
- Zhang, Zuhua, Provis, J. L., Reid, A., & Wang, H. (2014). Fly ash-based geopolymers: The relationship between composition, pore structure and efflorescence. *Cement and Concrete Research*, 64, 30–41. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2014.06.004>
- Zhao, Y., Zhang, L., & Liu, X. (2017). The effect of alkali activator concentration on the properties of geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 227–234. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.028>
- Zumdahl, S. S., & Zumdahl, S. A. (2014). Chemistry (9th ed.). Cengage Learning.

CAPÍTULO 9. ANEXOS

Anexo 1. Módulo de finura de la piedra pómez



Universidad Nacional de Chimborazo
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Civil



Determinación del módulo de finura por tamizado seco.
Laboratorio Corporación Estudios Especializados

Tema de investigación: Diseño de un geo polímero empleando como material precursor piedra pómez de las provincias de Cotopaxi, Imbabura y Tungurahua.

Ensayo N°1

Calculo para la determinación de la finura por tamizado seco					
Datos del yacimiento Imbabura					
mR= Masa retenida en el tamiz de 75 µm	9.81 [g]	$F = \frac{100 - (m_R * 100)}{m}$	<table border="1"> <tr> <td>F=</td> <td>80.38 %</td> </tr> </table>	F=	80.38 %
F=	80.38 %				
m= Masa total de la muestra de ensayo	50 [g]				
					
Datos del yacimiento Imbabura					
mR= Masa retenida en el tamiz de 150 µm	3.42 [g]	$F = \frac{100 - (m_R * 100)}{m}$	<table border="1"> <tr> <td>F=</td> <td>93.16 %</td> </tr> </table>	F=	93.16 %
F=	93.16 %				
m= Masa total de la muestra de ensayo	50 [g]				
					
Datos del yacimiento Cotopaxi					
mR= Masa retenida en el tamiz de 75 µm	11.98 [g]	$F = \frac{100 - (m_R * 100)}{m}$	<table border="1"> <tr> <td>F=</td> <td>76.04 %</td> </tr> </table>	F=	76.04 %
F=	76.04 %				
m= Masa total de la muestra de ensayo	50 [g]				
					
					
Datos del yacimiento Cotopaxi					
mR= Masa retenida en el tamiz de 150 µm	1.52 [g]	$F = \frac{100 - (m_R * 100)}{m}$	<table border="1"> <tr> <td>F=</td> <td>96.96 %</td> </tr> </table>	F=	96.96 %
F=	96.96 %				
m= Masa total de la muestra de ensayo	50 [g]				
					

Datos del yacimiento Tungurahua	
mR= Masa retenida en el tamiz de 75 μm	9.99 [g]
m= Masa total de la muestra de ensayo	50 [g]



Datos del yacimiento Tungurahua	
mR= Masa retenida en el tamiz de 150 μm	3.19 [g]
m= Masa total de la muestra de ensayo	50 [g]



Datos del yacimiento Tungurahua	
mR= Masa retenida en el tamiz de 75 μm	9.99 [g]
m= Masa total de la muestra de ensayo	50 [g]

$$F = \frac{100 - (m_R - 100)}{m}$$

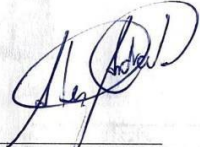
F=	80.02 %
----	---------

Datos del yacimiento Tungurahua	
mR= Masa retenida en el tamiz de 150 μm	3.19 [g]
m= Masa total de la muestra de ensayo	50 [g]

$$F = \frac{100 - (m_R - 100)}{m}$$

F=	93.62 %
----	---------


Ing. Maria Fernanda Lema
Técnico responsable


Ing. Alexis Andrade
Tutor de tesis





Universidad Nacional de Chimborazo
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Civil



Determinación del modulo de finura por tamizado seco.
Laboratorio Corporación Estudios Especializados

Tema de investigación: Diseño de un geo polimero empleando como material precursor piedra pomez de las provincias de Cotopaxi, Imbabura y Tungurahua.

Ensayo N°2

Calculo para la determinación de la finura por tamizado seco			
Datos del yacimiento Imbabura		$F = \frac{100 - (m_R + 100)}{m}$	
mR= Masa retenida en el tamiz de 75 μm	10.16 [g]	F=	79.68 %
m= Masa total de la muestra de ensayo	50.01 [g]		
Datos del yacimiento Imbabura		$F = \frac{100 - (m_R + 100)}{m}$	
mR= Masa retenida en el tamiz de 150 μm	3.86 [g]	F=	92.28 %
m= Masa total de la muestra de ensayo	50.01 [g]		
Datos del yacimiento Cotopaxi		$F = \frac{100 - (m_R + 100)}{m}$	
mR= Masa retenida en el tamiz de 75 μm	11.44 [g]	F=	77.12 %
m= Masa total de la muestra de ensayo	50.01 [g]		
Datos del yacimiento Cotopaxi		$F = \frac{100 - (m_R + 100)}{m}$	
mR= Masa retenida en el tamiz de 150 μm	1.14 [g]	F=	97.72 %
m= Masa total de la muestra de ensayo	50.01 [g]		

Datos del yacimiento Tungurahua		$F = \frac{100 - (m_R - 100)}{m}$
mR= Masa retenida en el tamiz de 75 μm	10.07 [g]	
m= Masa total de la muestra de ensayo	50.01 [g]	F= 79.86 %
		
Datos del yacimiento Tungurahua		$F = \frac{100 - (m_R - 100)}{m}$
mR= Masa retenida en el tamiz de 150 μm	3.2 [g]	
m= Masa total de la muestra de ensayo	50.01 [g]	F= 93.60 %
		

H#

Ing. María Fernanda Lema
Técnico responsable



Ing. Alexis Andrade
Tutor de tesis



Anexo 2. Ensayos de compresión a los cubos de geo polímeros realizados en los laboratorios de ingeniería civil de la UNACH

Universidad Nacional de Chimborazo
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Civil



Ensayo de rotura de cubos de geo polímero.
Laboratorio Ing. Civil UNACH - Riobamba

Tema de investigación: Diseño de un geo polímero empleando como material precursor piedra pomez de las provincias de Cotopaxi, Imbabura y Tungurahua.

Resultados

Muestra	Fecha elaboración	Concentración (mol)	Dimensiones (cm)			Carga kN	Esfuerzo a la compresión Mpa
			Base	Altura	Profundidad		
Cotopaxi Silicato NaOH 98.8%	25-Oct-21	-	5.8	4.94	5.14	4.2	1.65
Cotopaxi Silicato NaOH 98.8%	25-Oct-21	-	4.93	5.04	4.19	4.8	2.27
Tungurahua NaOH 98.8%	17-Oct-21	12	4.77	4.88	4.69	41.9	18.31
Cotopaxi NaOH 98.8%	17-Oct-21	12	4.8	4.82	4.83	27.9	11.98

Anexo fotográfico



Elaborado por: Oñate John
Paredes Kleber

Ing. Cristina Polo

Tec. Lab. Ing. Civil UNACH

Ing. Alexis Andrade

Tutor de tesis.

Universidad Nacional de Chimborazo
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Civil



Ensayo de rotura de cubos de geo polímero.
Laboratorio Ing. Civil UNACH - Riobamba

Tema de investigación: Diseño de un geo polímero empleando como material precursor piedra pomez de las provincias de Cotopaxi, Imbabura y Tungurahua.

Resultados

Muestra	Fecha elaboración	Concentración (mol)	Dimensiones (cm)			Carga kN	Esfuerzo a la compresión Mpa
			Base	Altura	Profundidad		
Cotopaxi Silicato NaOH 98.8% 60°	22-Nov-21	12	4.8	4.79	5.06	33.5	13.82
Imbabura Silicato NaOH 98.8%	22-Nov-21	12	4.76	4.83	5.03	29	11.94
Tungurahua NaOH 98.8%	22-Nov-21	12	4.74	4.85	5.04	37.5	15.34

Anexo fotográfico



Elaborado por Oñate John
Paredes Kleber

Ing. Cristina Polo

Tec. Lab. Ing. Civil UNACH

Ing. Alexis Andrade

Tutor de tesis.

3

Facultad de Ingeniería
Ingeniería Civil



Ensayo de rotura de cubos de geo polímero.
Laboratorio Ing. Civil UNACH - Riobamba

Tema de investigación: Diseño de un geo polímero empleando como material precursor piedra pomez de las provincias de Cotopaxi, Imbabura y Tungurahua.

Resultados

Muestra	Fecha elaboración	Concentración (mol)	Dimensiones (cm)			Carga kN	Esfuerzo a la compresión Mpa
			Base	Altura	Profundidad		
Cotopaxi Silicato NaOH 98.8%	30-Nov-21	16	4.88	4.88	4.95	46.3	19.17
Imbabura Silicato NaOH 98.8%	30-Nov-21	16	4.92	4.93	5	37.6	15.25
Tungurahua NaOH 98.8%	30-Nov-21	16	4.77	5.03	5.09	46.1	18.01
Cotopaxi Silicato NaOH 98.8%	30-Nov-21	8	4.9	4.8	4.96	21.5	9.03
Imbabura Silicato NaOH 98.8%	30-Nov-21	8	4.8	4.91	5.03	20.1	8.14
Tungurahua NaOH 98.8%	30-Nov-21	8	4.9	5	4.92	22.5	9.15

Anexo fotográfico



Elaborado por: Oñate John
Paredes Kleber

Ing. Cristina Polo
Tec. Lab. Ing. Civil
UNACH

Ing. Alexis Andrade
Tutor de tesis.

Universidad Nacional de Chimborazo
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Civil



Ensayo de rotura de cubos de geo polímero.
Laboratorio Ing. Civil UNACH - Riobamba

Tema de investigación: Diseño de un geo polímero empleando como material precursor piedra pomez de las provincias de Cotopaxi, Imbabura y Tungurahua.

Resultados

Muestra	Fecha elaboración	Concentración (mol)	Dimensiones (cm)			Carga kN	Esfuerzo a la compresión Mpa
			Base	Altura	Profundidad		
Imbabura Silicato NaOH 98.8% 80° Solucion calentada	6-Dec-21	16	4.89	4.8	4.97	46.4	19.45
Tungurahua Silicato NaOH 98.8% 80° Solucion calentada	6-Dec-21	16	4.83	4.84	5.09	69.3	28.13
Cotopaxi Silicato NaOH 98.8% 80° Solucion calentada	6-Dec-21	16	5.01	4.84	5.09	82.5	33.49
Tungurahua Silicato NaOH 98.8% 80° Solucion calentada	6-Dec-21	16	4.8	4.91	5.1	65.8	26.28
Cotopaxi Silicato NaOH 98.8% 80° Solucion calentada	6-Dec-21	16	5.19	4.85	5.1	69.9	28.26
Tungurahua Silicato NaOH 98.8% 80° Solucion calentada	6-Dec-21	16	4.73	5.06	4.94	69.7	27.88

Anexo fotográfico



Elaborado por: Oñate John
Paredes Kleber

Ing. Cristina Polo

Tec. Lab. Ing. Civil UNACH

Ing. Alexis Andrade

Tutor de tesis.

Universidad Nacional de Chimborazo
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Civil



**Ensayo de rotura de cubos de geo polímero.
Laboratorio Ing. Civil UNACH - Riobamba**

Tema de investigación: Diseño de un geo polímero empleando como material precursor piedra pomez de las provincias de Cotopaxi, Imbabura y Tungurahua.

Resultados

Probeta	Fecha elaboración	Concentración (mol)	Dimensiones (cm)			Carga kN	Esfuerzo a la compresión Mpa
			Base	Altura	Profundidad		
Imbabura Silicato NaOH 98.8% 80° Solucion T. Ambiente	8-Dec-21	20	4.92	5.04	4.96	81.8	32.72
Tungurahua Silicato NaOH 98.8% 80° Solución T. Ambiente	8-Dec-21	20	4.9	4.9	4.92	77.7	32.23
Cotopaxi Silicato NaOH 98.8% 80° Solución T. Ambiente	8-Dec-21	20	4.93	4.88	4.93	90.3	37.53
Imbabura Silicato NaOH 98.8% 80° Solucion calentada	8-Dec-21	20	4.85	4.87	4.84	53.4	22.66
Tungurahua Silicato NaOH 98.8% 80° Solucion calentada	8-Dec-21	20	4.98	4.87	5.15	81.4	32.46
Cotopaxi Silicato NaOH 98.8% 80° Solucion calentada	8-Dec-21	20	4.9	4.9	4.94	80.6	33.30

Anexo fotográfico



Elaborado por Oñate John
Paredes Kleber

Ing. Cristina Polo

Tec. Lab. Ing. Civil UNACH

Ing. Alexis Andrade

Tutor de tesis.

Universidad Nacional de Chimborazo
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Civil



Ensayo de rotura de cubos de geo polímero.
Laboratorio Ing. Civil UNACH - Riobamba

Tema de investigación: Diseño de un geo polímero empleando como material precursor piedra pomez de las provincias de Cotopaxi, Imbabura y Tungurahua.

Resultados

Probeta	Fecha elaboración	Concentración (mol)	Dimensiones (cm)			Carga kN	Esfuerzo a la compresión Mpa
			Base	Altura	Profundidad		
Imbabura Silicato NaOH 98.8% 80° Solucion T. Ambiente	14-Dec-21	16	4.88	4.93	5.3	40.4	15.46
Tungurahua Silicato NaOH 98.8% 80° Solución T. Ambiente	14-Dec-21	16	4.89	4.88	5.43	45.7	17.25
Cotopaxi Silicato NaOH 98.8% 80° Solución T.Ambiente	14-Dec-21	16	4.88	4.95	5.14	42.7	16.78
Imbabura Silicato NaOH 98.8% 80° T.Ambiente	14-Dec-21	20	4.91	5.03	5.1	107	41.71
Imbabura Silicato NaOH 98.8% 80° T.Ambiente	14-Dec-21	20	5.02	4.98	4.99	77.6	31.23
Tungurahua Silicato NaOH 98.8% 80° T.Ambiente	14-Dec-21	20	4.87	4.95	5.1	93.3	36.96

Anexo fotográfico



Elaborado por: Oñate John
Paredes Kleber


Ing. Cristina Polo

Tec. Lab. Ing. Civil UNACH


Ing. Alexis Andrade

Tutor de tesis.

Anexo 3. Ensayo de análisis granulométrico



Universidad Nacional De Chimborazo
Facultad de ingeniería
Ingeniería civil



DOSSIER ENSAYO GRANULOMETRIA ARIDO FINO

Tema de investigación: Diseño de un geo polímero empleando como material precursor piedra pomez de las provincias de Cotopaxi, Imbabura y Tungurahua.

Elaborado por:

Oñate Miranda John Bryan

Paredes Fierro Kleber Mauricio

Normas:

INEN 154-694-695-872

INVE 213

ASTM C 138-08

MOP 803-3

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

Mina de origen: Rio Chambo - Hormigones Moreno

Abscisa: N/D

Distancia M/P: N/D

Cota: N/D

Descripción:

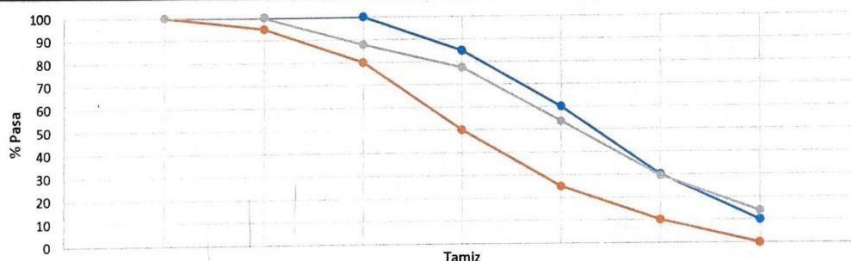
Latitud: N/D

Arena de rio Chambo - Hormigones Moreno.

Longitud: N/D

DATOS Y RESULTADOS DE ENSAYO

A		B	C		D	E	F	
Tamiz		Masa retenido parcial (g)	Porcentjes		Pasa (%)		Limites	
Inglesa	S.I		Retenido parcial (%)	Retenido acumulado (%)			Superior (%)	Inferior (%)
3/8"	9.50 mm	0.01	0%	0%	100		100	100
No. 4	4.75 mm	0.88	0%	0%	100		100	95
No. 8	2.38 mm	60.28	12%	12%	88		100	80
No. 16	1.18 mm	51.26	10%	22%	78		85	50
No. 30	600.00 um	119.96	24%	46%	54		60	25
No. 50	300.00 um	120.59	24%	71%	29		30	10
No. 100	150.00 um	77.5	16%	86%	14		10	0
Bandeja		69.52	14%	100%	0		0	0
Curva Granulometrica							Mo (g)	500



TM =	Tamaño máximo (abertura del menor tamiz por el cual pasa el 100% del agregado)	No. 4
TMN =	Tamaño nominal máximo (abertura del tamiz cuyo porcentaje retenido acumulado mayor o igual a 10%)	No. 30
MF =	Modulo de finura (suma de porcentajes retenidos acumulados excepto bandeja dividido entre 100)(2.30-3.10)	2.38
ESPECIFICACIONES		
El modulo de finura debe estar dentro del rango (2.30 - 3.10)		
La suma de los porcentajes retenidos acumulados entre dos tamices de abertura consecutiva no deben sumar mas del 45% entre ellos.		
La curva granulometrica debe desarrollarse entre los limites establecidos en la tabla adjunta.		
 Ing. María Fernanda Lema Tecnico responsable		



Universidad Nacional De Chimborazo
Facultad de Ingeniería
Ingeniería civil



DOSSIER ENSAYO GRANULOMETRIA ARIDO GRUESO

Tema de Investigación: Diseño de un geo polímero empleando como material precursor piedra pomez de las provincias de Cotopaxi, Imbabura y Tungurahua.

Elaborado por:

Oñate Miranda John Bryan

Paredes Fierro Kleber Mauricio

Normas:

INEN 694-695

INVE 213

ASTM C 136-06

MOP 803-3

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

Mina de origen: Covipal

Distancia M/P:

N/D

Descripción:

Agregado de Covipal

Abscisa:

N/D

Cota:

N/D

Latitud:

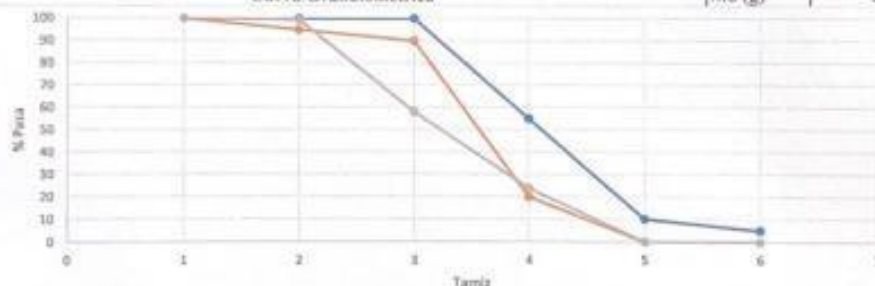
N/D

Longitud:

N/D

DATOS Y RESULTADOS DE ENSAYO

A		B	C		D	E	F	
Tamiz		Masa retenido parcial (g)	Porcentjes		Pasa (%)		Límites	
Inglés	S.I		Retenido parcial (%)	Retenido acumulado (%)			Superior (%)	Inferior (%)
1"	25.4 mm	0	0%	0%	100		100	100
3/4"	19.75 mm	12	1%	1%	99		100	95
1/2"	12.7 mm	825	41%	42%	58		100	90
3/8"	9.53 mm	685	34%	76%	24		55	20
No. 4	4.75 mm	475	24%	100%	0		10	0
No. 8	2.38 mm	2	0%	100%	0		5	0
Bandeja		1	0%	100%	0		0	0
Curva Granulométrica						Mo (g)		2000



TM =	Tamaño máximo (apertura del menor tamiz por el cual pasa el 100% del agregado)	1"
TMN =	Tamaño nominal máximo (apertura del tamiz cuyo porcentaje retenido acumulado mayor o igual)	3/4"
MF =	Modulo de finura (suma de porcentajes retenidos acumulados excepto bandeja dividido entre 100)(2.30-3.10)	2.49

ESPECIFICACIONES

El modulo de finura debe estar dentro del rango (2.30 - 3.10)

La suma de los porcentajes retenidos acumulados entre dos tamices de abertura consecutiva no deben sumar mas del 45% entre ellos.

La curva granulométrica debe desarrollarse entre los límites establecidos en la tabla adjunta.

Ing. María Fernanda Lema Técnico responsable



Universidad Nacional De Chimborazo
Facultad de ingeniería
Ingeniería civil



DOSSIER ENSAYO GRANULOMETRIA ARIDO FINO

Tema de investigación: Diseño de un geo polímero empleando como material precursor piedra pómez de las provincias de Cotopaxi, Imbabura y Tungurahua.

Elaborado por:

Oñate Miranda John Bryan
Paredes Fierro Kleber Mauricio

Normas:
INEN 154-694-695-872
INVE 213
ASTM C 138-08
MOP 803-3

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

Mina de origen: Covipal

Distancia M/P:

N/D

Descripción:

Agregado de Covipal

Abscisa: N/D

Cota: N/D

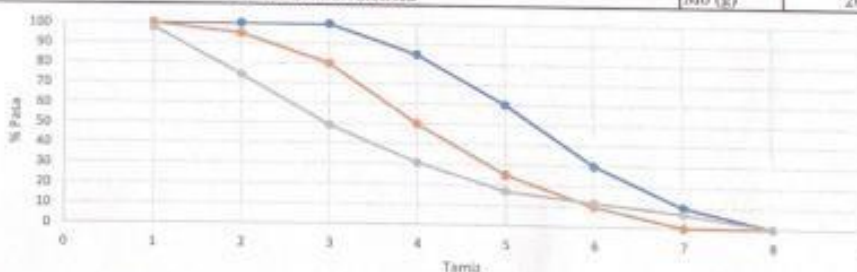
Latitud: N/D

Longitud: N/D

DATOS Y RESULTADOS DE ENSAYO

A		B	C	D	E	F	
Tamiz		Masa retenido parcial (g)	Retenido parcial (%)	Porcentajes		Límites	
Inglés	S.I			Retenido acumulado (%)	Pasa (%)	Superior (%)	Inferior (%)
3/8"	9.50 mm	43	2%	2%	98	100	100
No. 4	4.75 mm	474	24%	26%	74	100	95
No. 8	2.38 mm	502	25%	51%	49	100	80
No. 16	1.18 mm	369	18%	69%	31	85	50
No. 30	600.00 um	270	14%	83%	17	60	25
No. 50	300.00 um	102	5%	88%	12	30	10
No. 100	150.00 um	104	5%	93%	7	10	0
Bandeja		136	7%	100%	0	0	0
		2000					

Curva Granulométrica



TM =	Tamaño máximo (apertura del menor tamiz por el cual pasa el 100% del agregado)	No. 4
TMN =	Tamaño nominal máximo (apertura del tamiz cuyo porcentaje retenido acumulado mayor o igual a 10%)	No. 50
MF =	Modulo de finura (suma de porcentajes retenidos acumulados excepto bandeja dividido entre 100)(2.30-3.10)	2.38

ESPECIFICACIONES

El modulo de finura debe estar dentro del rango (2.30 - 3.10)

La suma de los porcentajes retenidos acumulados entre dos tamices de abertura consecutiva no deben sumar mas del 45% entre ellos.

La curva granulométrica debe desarrollarse entre los límites establecidos en la tabla adjunta.

[Firma]

Ing. Maria Fernanda Lema Tecnico responsable



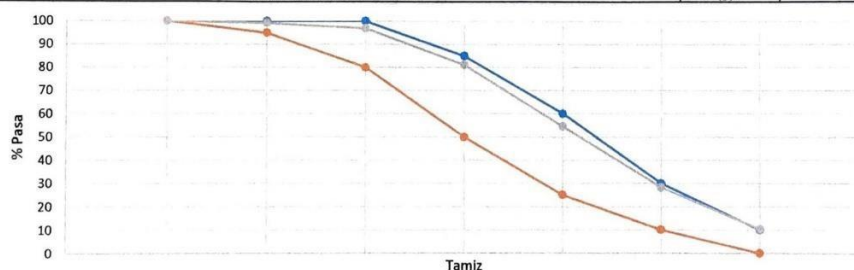
Universidad Nacional De Chimborazo
Facultad de ingeniería
Ingeniería civil
DOSSIER ENSAYO GRANULOMETRIA ARIDO FINO



Tema de investigación: Diseño de un geo polimero empleando como material precursor piedra pomez de las provincias de Cotopaxi, Imbabura y Tungurahua.	Normas: INEN 154-694-695-872 INVE 213 ASTM C 138-08 MOP 803-3
Elaborado por: Oñate Miranda John Bryan Paredes Fierro Kleber Mauricio	

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA			
Mina de origen: Rio Chambo - Hormigones Moreno	Abscisa:	N/D	
Distancia M/P: N/D	Cota:	N/D	
Descripción: Arena de rio Chambo - Hormigones Moreno.	Latitud:	N/D	
	Longitud:	N/D	

DATOS Y RESULTADOS DE ENSAYO LIMITE SUPERIOR							
A		B	C		E	F	
Tamiz		Masa retenido parcial (g)	Porcentjes			Limites	
Inglesa	S.I		Retenido parcial (%)	Retenido acumulado (%)	Pasa (%)	Superior (%)	Inferior (%)
3/8"	9.50 mm	0.01	0%	0%	100	100	100
No.4	4.75 mm	4	1%	1%	99	100	95
No. 8	2.38 mm	12	2%	3%	97	100	80
No. 16	1.18 mm	78.05	16%	19%	81	85	50
No. 30	600.00 um	133.12	27%	45%	55	60	25
No. 50	300.00 um	131	26%	72%	28	30	10
No. 100	150.00 um	90	18%	90%	10	10	0
Bandeja		51.82	10%	100%	0	0	0
Curva Granulometrica						Mo (g)	500



TM =	Tamaño máximo (abertura del menor tamiz por el cual pasa el 100% del agregado)	3/8"
TMN =	Tamaño nominal máximo (abertura del tamiz cuyo porcentaje retenido acumulado mayor o igual a 10%)	No. 16
MF =	Modulo de finura (suma de porcentajes retenidos acumulados excepto bandeja dividido entre 100)(2.30-3.10)	2.30
ESPECIFICACIONES El modulo de finura debe estar dentro del rango (2.30 - 3.10) La suma de los porcentajes retenidos acumulados entre dos tamices de abertura consecutiva no deben sumar mas del 45% entre ellos. La curva granulometrica debe desarrollarse entre los limites establecidos en la tabla adjunta.		 Ing. Maria Fernanda Lema Tecnico responsable



Universidad Nacional De Chimborazo
Facultad de ingeniería
Ingeniería civil



DOSSIER ENSAYO GRANULOMETRIA ARIDO GRUESO

Tema de investigación: Diseño de un geo polimero empleando como material precursor piedra pomez de las provincias de Cotopaxi, Imbabura y Tungurahua.

Elaborado por:

Oñate Miranda John Bryan

Paredes Fierro Kleber Mauricio

Normas:

INEN 694-695

INVE 213

ASTM C 136-06

MOP 803-3

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

Mina de origen: Rio Chambo - Hormigones Moreno

Abscisa: N/D

Distancia M/P: N/D

Cota: N/D

Descripción:

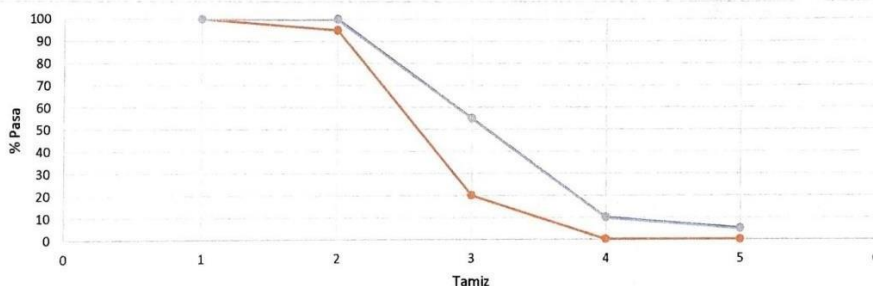
Latitud: N/D

Agregado de rio Chambo - Hormigones Moreno.

Longitud: N/D

DATOS Y RESULTADOS DE ENSAYO LIMITE SUPERIOR

A		B	C	D	E	F	
Tamiz		Masa retenido parcial (g)	Porcentjes		Pasa (%)	Limites	
Inglesa	S.I		Retenido parcial (%)	Retenido acumulado (%)		Superior (%)	Inferior (%)
1"	25.4 mm	0.01	0%	0%	100	100	100
3/4"	19.75 mm	5	0%	0%	100	100	95
3/8"	9.53 mm	900	45%	45%	55	55	20
No.4	4.75 mm	900	45%	90%	10	10	0
No. 8	2.38 mm	100	5%	95%	5	5	0
Bandeja		94.99	5%	100%	0	0	0
Curva Granulometrica						Mo (g)	2000



TM =	Tamaño máximo (abertura del menor tamiz por el cual pasa el 100% del agregado)	3/4"
TMN =	Tamaño nominal máximo (abertura del tamiz cuyo porcentaje retenido acumulado mayor o igual a 10%)	3/8"
MF =	Modulo de finura (suma de porcentajes retenidos acumulados excepto bandeja dividido entre 100)(2.30-3.10)	2.31

ESPECIFICACIONES

El modulo de finura debe estar dentro del rango (2.30 - 3.10)
 La suma de los porcentajes retenidos acumulados entre dos tamices de abertura consecutiva no deben sumar mas del 45% entre ellos.
 La curva granulometrica debe desarrollarse entre los limites establecidos en la tabla adjunta.

Ing. María Fernanda Lema

Tecnico responsable



Universidad Nacional De Chimborazo
Facultad de ingeniería
Ingeniería civil



DOSSIER ENSAYO GRANULOMETRIA ARIDO FINO

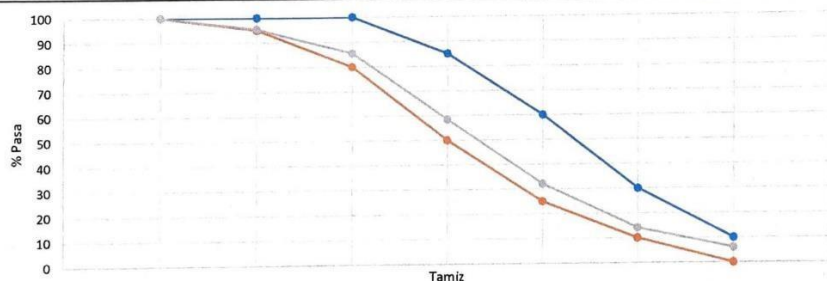
Tema de investigación: Diseño de un geo polímero empleando como material precursor piedra pomez de las provincias de Cotopaxi, Imbabura y Tungurahua.	Normas: INEN 154-694-695-872 INVE 213 ASTM C 138-08 MOP 803-3
Elaborado por: Oñate Miranda John Bryan Paredes Fierro Kleber Mauricio	

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

Mina de origen: Rio Chambo - Hormigones Moreno	Abscisa: N/D
Distancia M/P: N/D	Cota: N/D
Descripción:	Latitud: N/D
Arena de rio Chambo - Hormigones Moreno.	Longitud: N/D

DATOS Y RESULTADOS DE ENSAYO LIMITE INFERIOR

A		B	C	D	E	F	
Tamiz		Masa retenido parcial (g)	Porcentjes		Pasa (%)	Límites	
Inglés	S.I		Retenido parcial (%)	Retenido acumulado (%)		Superior (%)	Inferior (%)
3/8"	9.50 mm	0	0%	0%	100	100	100
No. 4	4.75 mm	23	5%	5%	95	100	95
No. 8	2.38 mm	50	10%	15%	85	100	80
No. 16	1.18 mm	135	27%	42%	58	85	50
No. 30	600.00 um	132	26%	68%	32	60	25
No. 50	300.00 um	90	18%	86%	14	30	10
No. 100	150.00 um	40	8%	94%	6	10	0
Bandeja		30	6%	100%		0	0
Curva Granulometrica						Mo (g)	500



TM =	Tamaño máximo (abertura del menor tamiz por el cual pasa el 100% del agregado)	3/8"
TMN =	Tamaño nominal máximo (abertura del tamiz cuyo porcentaje retenido acumulado mayor o igual a 10%)	No. 8
MF =	Modulo de finura (suma de porcentajes retenidos acumulados excepto bandeja dividido entre 100)(2.30-3.10)	3.09
ESPECIFICACIONES El modulo de finura debe estar dentro del rango (2.30 - 3.10) La suma de los porcentajes retenidos acumulados entre dos tamices de abertura consecutiva no deben sumar mas del 45% entre ellos. La curva granulometrica debe desarrollarse entre los limites establecidos en la tabla adjunta.		 Ing. Maria Fernanda Lema Tecnico responsable



Universidad Nacional De Chimborazo
Facultad de ingeniería
Ingeniería civil



DOSSIER ENSAYO GRANULOMETRIA ARIDO GRUESO

Tema de investigación: Diseño de un geo polimero empleando como material precursor piedra pomez de las provincias de Cotopaxi, Imbabura y Tungurahua.

Elaborado por:

Oñate Miranda John Bryan
Paredes Fierro Kleber Mauricio

Normas:

INEN 694-695
INVE 213
ASTM C 136-06
MOP 803-3

INFORMACIÓN DE LA MUESTRA

Mina de origen: Rio Chambo - Hormigones Moreno

Abscisa: N/D

Distancia M/P: N/D

Cota: N/D

Descripción:

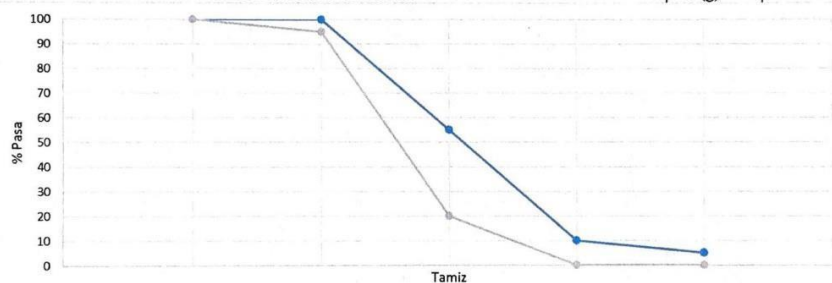
Latitud: N/D

Agregado de rio Chambo - Hormigones Moreno.

Longitud: N/D

DATOS Y RESULTADOS DE ENSAYO LIMITE INFERIOR

A		B	C	D	E	F	
Tamiz		Masa retenido parcial (g)	Porcentjes			Limites	
Inglesa	S.I		Retenido parcial (%)	Retenido acumulado (%)	Pasa (%)	Superior (%)	Inferior (%)
1"	25.4 mm	0.01	0.001%	0%	100	100	100
3/4"	19.75 mm	100	5.000%	5%	95	100	95
3/8"	9.53 mm	1500	75.000%	80%	20	55	20
No.4	4.75 mm	399.99	20.000%	100%	0	10	0
No. 8	2.38 mm	0	0.000%	100%	0	5	0
Bandeja		0	0.000%	100%	0	0	0
Curva Granulometrica						Mo (g)	2000



TM =	Tamaño maximo (apertura del menor tamiz por el cual pasa el 100% del agregado)	1"
TMN =	Tamaño nominal maximo (apertura del tamiz cuyo porcentaje retenido acumlado mayor o igual a 10%)	3/8"
MF =	Modulo de finura (suma de porcentajes retenidos acumulados excepto bandeja dividido entre 100)(2.30-3.10)	2.85

ESPECIFICACIONES

El modulo de finura debe estar dentro del rango (2.30 - 3.10)
La suma de los porcentajes retenidos acumulados entre dos tamices de abertura consecutiva no deben sumar mas del 45% entre ellos.
La curva granulometrica debe desarrollarse entre los limites establecidos en la tabla adjunta.

Ing. Maria Fernanda Lema
Tecnico responsable



Universidad Nacional de Chimborazo
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Civil



Ensayo de densidad y absorción de agregado fino.
Laboratorio Corporación Estudios Especializados

Tema de investigación: Diseño de un geo polimero empleando como material precursor piedra pomez de las provincias de Cotop Imbabura y Tungurahua.

Calculo de densidad en estado SSS Agregado Fino		
Datos de laboratorio		
Masa del Picnómetro + Arena en estado SSS	673	[g]
Masa del Picnómetro vacío	173	[g]
Masa del Picnómetro calibrado (B)	672	[g]
Masa del Picnómetro + Arena SSS+agua (c)	986	[g]
Masa del Arena en estado SSS (S)	500	[g]
		$D_{(SSS)} = \frac{0,997 \cdot S}{B + S - C}$
		D(SSS)= 2.6738 g/cm3
$S = \text{Masapicnómetro} + \text{arena SSS} - \text{Masa del picnómetro}$		

Calculo de la capacidad de absorción del Agregado Fino		
Datos de laboratorio		
Masa del Arena SSS + Recipiente	631	[g]
Masa del Arena seco + Recipiente	622	[g]
Masa del Recipiente	131	[g]
Masa del agua	8.4	[g]
Masa del Arena seco (A)	492	[g]
Masa del Arena SSS (B)	500	[g]
		$\%Abs = \frac{B - A}{A} \cdot 100$
		%Abs= 1.7087 %
$A = \text{Masa arena seco} + \text{recipiente} - \text{Masa del recipiente}$		
$B = \text{Masa arena SSS} + \text{recipiente} - \text{Masa del recipiente}$		
Elaborado por: John Oñate Kleber Parodes		

Ing. María Fernanda Lema
 Técnico responsable

Ing. Alexis Andrade
 Tutor de tesis

Anexo 4. Reporte del ensayo de ANC

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL



Tema: Resistencia al ataque ácido en matrices de activación geopoliméricas utilizando como material precursor piedra pómez proveniente de Tungurahua

Localización: Laboratorio de Ciencias Químicas (UNACH)

Fecha: 21/10/2022

Elaborado por: Góngora Ronald y Michelle Mancheno

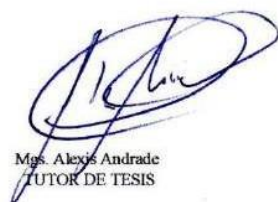
Ensayo: ENSAYO DE CAPACIDAD DE NEUTRALIZACIÓN ÁCIDA (ANC) DE PH COMBINADO

Norma: EA NEN 7371: 2004

RESULTADOS ANC EN MUESTRAS DE CEMENTO

Muestra 1								
pH inicial	11,6							
Tiempo	pH7		Tiempo	pH4		Tiempo	pH2	
	Vol ácido añad.	ANC (mmolH+/g)		Vol ácido añad.	ANC (mmolH+/g)		Vol ácido añad.	ANC (mmolH+/g)
0	0	0	136	8,40	8,806	201	12,40	12,999
1	2,40	2,516	137	9,00	9,435	202	12,60	13,209
2	3,20	3,355	138	9,10	9,540	203	12,90	13,523
3	3,50	3,669	139	9,10	9,540	204	13,00	13,628
4	3,70	3,879	140	9,20	9,645	205	13,30	13,943
5	3,90	4,088	141	9,30	9,749	206	13,30	13,943
6	4,10	4,298	142	9,40	9,854	207	13,30	13,943
7	4,30	4,508	143	9,40	9,854	208	13,30	13,943
8	4,40	4,613	144	9,50	9,959	209	13,60	14,257
9	4,50	4,717	145	9,50	9,959	210	13,60	14,257
10	4,60	4,822	147	9,60	10,064	212	13,60	14,257
12	4,80	5,032	149	9,70	10,169	214	13,60	14,257
14	4,90	5,137	151	9,80	10,274	216	13,60	14,257
16	5,00	5,242	153	9,80	10,274	218	13,60	14,257
18	5,20	5,451	155	9,90	10,378	220	13,60	14,257
20	5,30	5,556	160	10,00	10,483	224	13,60	14,257
25	5,60	5,871	165	10,10	10,588			
30	5,80	6,080	170	10,20	10,693			
35	6,00	6,290	175	10,30	10,798			
40	6,10	6,395	180	10,30	10,798			
45	6,30	6,604	185	10,50	11,007			
50	6,50	6,814	190	10,50	11,007			
55	6,50	6,814	195	10,50	11,007			
60	6,60	6,919	200	10,50	11,007			
65	6,60	6,919						
70	6,80	7,129						
75	6,90	7,233						
80	6,90	7,233						
85	7,00	7,338						
90	7,10	7,443						
95	7,20	7,548						
100	7,20	7,548						
105	7,30	7,653						
110	7,30	7,653						
115	7,40	7,758						
120	7,50	7,862						
125	7,50	7,862						
130	7,50	7,862						
135	7,50	7,862						

REVISADO POR:


Mgs. Alexis Andrade
TUTOR DE TESIS

APROBADO POR:


Dra. Nancy Orozco
TÉCNICA DE LABORATORIO

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL



Tema: Resistencia al ataque ácido en matrices de activación geopoliméricas utilizando como material precursor piedra pómez proveniente de Tungurahua

Localización: Laboratorio de Ciencias Químicas (UNACH)

Fecha: 24/10/2022

Elaborado por: Góngora Ronald y Michelle Mancheno

Ensayo: ENSAYO DE CAPACIDAD DE NEUTRALIZACIÓN ÁCIDA (ANC) DE PH COMBINADO

Norma: EA NEN 7371: 2004

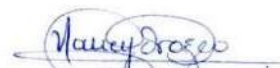
RESULTADOS ANC EN MUESTRAS DE CEMENTO

Muestra 2								
pH inicial 11,3								
pH7			pH4			pH2		
Tiempo	Vol ácido añad.	ANC (mmolH ⁺ /g)	Tiempo	Vol ácido añad.	ANC (mmolH ⁺ /g)	Tiempo	Vol ácido añad.	ANC (mmolH ⁺ /g)
0	0	0	121	8,20	8,596	196	12,00	12,580
1	2,30	2,411	122	8,50	8,911	197	12,50	13,104
2	3,00	3,145	123	8,70	9,120	198	12,70	13,314
3	3,40	3,564	124	8,90	9,330	199	12,80	13,419
4	3,60	3,774	125	9,00	9,435	200	12,90	13,523
5	3,80	3,984	126	9,10	9,540	201	13,00	13,628
6	4,00	4,193	127	9,20	9,645	202	13,10	13,733
7	4,10	4,298	128	9,30	9,749	203	13,10	13,733
8	4,30	4,508	129	9,30	9,749	204	13,10	13,733
9	4,40	4,613	130	9,40	9,854	205	13,10	13,733
10	4,50	4,717	132	9,50	9,959	207	13,30	13,943
12	4,70	4,927	134	9,60	10,064	209	13,30	13,943
14	4,80	5,032	136	9,80	10,274	211	13,30	13,943
16	5,00	5,242	138	9,80	10,274	213	13,30	13,943
18	5,10	5,346	140	9,80	10,274	215	13,30	13,943
20	5,20	5,451	145	10,00	10,483	220	13,30	13,943
25	5,40	5,661	150	10,10	10,588	222	13,30	13,943
30	5,60	5,871	155	10,20	10,693			
35	5,80	6,080	160	10,30	10,798			
40	5,90	6,185	165	10,30	10,798			
45	6,00	6,290	170	10,40	10,903			
50	6,10	6,395	175	10,40	10,903			
55	6,20	6,500	180	10,50	11,007			
60	6,30	6,604	185	10,50	11,007			
65	6,40	6,709	190	10,50	11,007			
70	6,50	6,814	195	10,50	11,007			
75	6,60	6,919						
80	6,60	6,919						
85	6,70	7,024						
90	6,80	7,129						
95	6,80	7,129						
100	6,90	7,233						
105	7,00	7,338						
110	7,00	7,338						
115	7,00	7,338						
120	7,00	7,338						

REVISADO POR:


Mgs. Alexis Andrade
TUTOR DE TESIS

APROBADO POR:


Dra. Nancy Orozco
TÉCNICA DE LABORATORIO

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL



Tema: Resistencia al ataque ácido en matrices de activación geopoliméricas utilizando como material precursor piedra pómez proveniente de Tungurahua
Localización: Laboratorio de Ciencias Químicas (UNACH) **Fecha:** 24/10/2022
Elaborado por: Góngora Ronald y Michelle Mancheno

Ensayo: ENSAYO DE CAPACIDAD DE NEUTRALIZACIÓN ÁCIDA (ANC) DE PH COMBINADO
Norma: EA NEN 7371: 2004

RESULTADOS ANC EN MUESTRAS DE CEMENTO

Muestra 3								
pH inicial	11,4							
pH7			pH4			pH2		
Tiempo	Vol ácido añad.	ANC (mmolH ⁺ /g)	Tiempo	Vol ácido añad.	ANC (mmolH ⁺ /g)	Tiempo	Vol ácido añad.	ANC (mmolH ⁺ /g)
0	0	0	131	8,30	8,701	201	11,80	12,370
1	2,70	2,830	132	8,50	8,911	202	12,40	12,999
2	3,20	3,355	133	8,70	9,120	203	12,60	13,209
3	3,50	3,669	134	8,80	9,225	204	12,80	13,419
4	3,80	3,984	135	9,00	9,435	205	12,90	13,523
5	4,00	4,193	136	9,10	9,540	206	13,00	13,628
6	4,20	4,403	137	9,20	9,645	207	13,00	13,628
7	4,30	4,508	138	9,20	9,645	208	13,00	13,628
8	4,50	4,717	139	9,30	9,749	209	13,00	13,628
9	4,60	4,822	140	9,40	9,854	210	13,00	13,628
10	4,70	4,927	142	9,50	9,959	212	13,00	13,628
12	4,90	5,137	144	9,60	10,064	214	13,40	14,048
14	5,40	5,661	146	9,60	10,064	216	13,40	14,048
16	5,50	5,766	148	9,70	10,169	218	13,40	14,048
18	5,50	5,766	150	9,80	10,274	220	13,40	14,048
20	5,60	5,871	155	9,90	10,378	225	13,40	14,048
25	5,80	6,080	160	10,00	10,483	229	13,40	14,048
30	5,90	6,185	165	10,00	10,483			
35	6,20	6,500	170	10,10	10,588			
40	6,30	6,604	175	10,10	10,588			
45	6,40	6,709	180	10,20	10,693			
50	6,50	6,814	185	10,30	10,798			
55	6,60	6,919	190	10,30	10,798			
60	6,60	6,919	195	10,30	10,798			
65	6,70	7,024	200	10,30	10,798			
70	6,80	7,129						
75	6,80	7,129						
80	6,90	7,233						
85	7,00	7,338						
90	7,00	7,338						
95	7,10	7,443						
100	7,10	7,443						
105	7,20	7,548						
110	7,20	7,548						
115	7,30	7,653						
120	7,30	7,653						
125	7,30	7,653						
130	7,30	7,653						

REVISADO POR:


Mgs. Alexis Andrade
TUTOR DE TESIS

APROBADO POR:


Dra. Nancy Orozco
TÉCNICA DE LABORATORIO

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL



Tema: Resistencia al ataque ácido en matrices de activación geopoliméricas utilizando como material precursor piedra pómez proveniente de Tungurahua
Localización: Laboratorio de Ciencias Químicas (UNACH) **Fecha:** 27/10/2022
Elaborado por: Góngora Ronald y Michelle Mancheno

Ensayo: ENSAYO DE CAPACIDAD DE NEUTRALIZACIÓN ÁCIDA (ANC) DE PH COMBINADO
Norma: EA NEN 7371: 2004

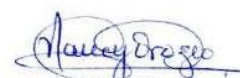
RESULTADOS ANC EN MUESTRAS DE GEOPOLÍMERO DE PIEDRA PÓMEZ

Muestra 1								
pH inicial	10,6							
pH7			pH4			pH2		
Tiempo	Vol ácido añad.	ANC (mmolH+/g)	Tiempo	Vol ácido añad.	ANC (mmolH+/g)	Tiempo	Vol ácido añad.	ANC (mmolH+/g)
0	0	0	26	0,80	0,839	46	1,30	1,363
1	0,50	0,524	27	0,80	0,839	47	1,30	1,363
2	0,50	0,524	28	0,80	0,839	48	1,30	1,363
3	0,50	0,524	29	0,80	0,839	49	1,30	1,363
4	0,60	0,629	30	0,90	0,943	50	1,30	1,363
5	0,60	0,629	31	0,90	0,943	51	1,30	1,363
6	0,60	0,629	32	0,90	0,943	52	1,30	1,363
7	0,60	0,629	33	0,90	0,943	53	1,30	1,363
8	0,60	0,629	34	0,90	0,943	54	1,30	1,363
9	0,60	0,629	35	0,90	0,943	55	1,30	1,363
10	0,60	0,629	37	0,90	0,943	57	1,40	1,468
12	0,60	0,629	39	0,90	0,943	59	1,40	1,468
14	0,60	0,629	41	0,90	0,943	61	1,40	1,468
16	0,60	0,629	43	0,90	0,943	63	1,40	1,468
18	0,60	0,629	45	0,90	0,943	65	1,40	1,468
20	0,60	0,629				70	1,40	1,468
25	0,60	0,629						

REVISADO POR:


Mgs. Alexis Andrade
TUTOR DE TESIS

APROBADO POR:


Dra. Nancy Orozco
TÉCNICA DE LABORATORIO

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL



Tema: Resistencia al ataque ácido en matrices de activación geopoliméricas utilizando como material precursor piedra pómez

Localización: Laboratorio de Ciencias Químicas (UNACH)

Fecha: 27/10/2022

Elaborado por: Góngora Ronald y Michelle Mancheno

Ensayo: ENSAYO DE CAPACIDAD DE NEUTRALIZACIÓN ÁCIDA (ANC) DE PH COMBINADO

Norma: EA NEN 7371: 2004

RESULTADOS ANC EN MUESTRAS DE GEOPOLÍMERO DE PIEDRA PÓMEZ

Muestra 2								
pH inicial	10,6							
pH7			pH4			pH2		
Tiempo	Vol ácido añad.	ANC (mmolH ⁺ /g)	Tiempo	Vol ácido añad.	ANC (mmolH ⁺ /g)	Tiempo	Vol ácido añad.	ANC (mmolH ⁺ /g)
0	0	0	26	0,90	0,943	44	1,20	1,258
1	0,50	0,524	27	0,90	0,943	45	1,30	1,363
2	0,50	0,524	28	0,90	0,943	46	1,30	1,363
3	0,50	0,524	29	0,90	0,943	47	1,30	1,363
4	0,50	0,524	30	0,90	0,943	48	1,40	1,468
5	0,60	0,629	31	0,90	0,943	49	1,40	1,468
6	0,60	0,629	32	0,90	0,943	50	1,40	1,468
7	0,60	0,629	33	0,90	0,943	51	1,40	1,468
8	0,60	0,629	34	0,90	0,943	52	1,40	1,468
9	0,60	0,629	35	0,90	0,943	53	1,40	1,468
10	0,60	0,629	37	0,90	0,943	55	1,40	1,468
12	0,60	0,629	39	0,90	0,943	57	1,40	1,468
14	0,60	0,629	41	0,90	0,943	59	1,40	1,468
16	0,60	0,629	43	0,90	0,943	61	1,40	1,468
18	0,60	0,629				63	1,40	1,468
20	0,60	0,629						
25	0,60	0,629						

REVISADO POR:


Mgs. Alexis Andrade
TUTOR DE TESIS

APROBADO POR:


Dra. Nancy Orozco
TÉCNICA DE LABORATORIO

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL



Tema: Resistencia al ataque ácido en matrices de activación geopoliméricas utilizando como material precursor piedra pómez proveniente de Tungurahua
Localización: Laboratorio de Ciencias Químicas (UNACH)
Elaborado por: Góngora Ronald y Michelle Mancheno

Fecha: 27/10/2022

Ensayo: ENSAYO DE CAPACIDAD DE NEUTRALIZACIÓN ÁCIDA (ANC) DE PH COMBINADO
Norma: EA NEN 7371: 2004

RESULTADOS ANC EN MUESTRAS DE GEOPOLÍMERO DE PIEDRA PÓMEZ

Muestra 3								
pH inicial	10,5							
pH7			pH4			pH2		
Tiempo	Vol ácido añad.	ANC (mmolH ⁺ /g)	Tiempo	Vol ácido añad.	ANC (mmolH ⁺ /g)	Tiempo	Vol ácido añad.	ANC (mmolH ⁺ /g)
0	0	0	19	0,80	0,839	44	1,20	1,258
1	0,40	0,419	20	0,80	0,839	45	1,20	1,258
2	0,50	0,524	21	0,80	0,839	46	1,30	1,363
3	0,50	0,524	22	0,80	0,839	47	1,30	1,363
4	0,50	0,524	23	0,80	0,839	48	1,30	1,363
5	0,50	0,524	24	0,80	0,839	49	1,30	1,363
6	0,50	0,524	25	0,80	0,839	50	1,30	1,363
7	0,50	0,524	26	0,80	0,839	51	1,30	1,363
8	0,50	0,524	27	0,80	0,839	52	1,30	1,363
9	0,50	0,524	28	0,80	0,839	53	1,30	1,363
10	0,50	0,524	30	0,90	0,943	55	1,30	1,363
12	0,50	0,524	32	0,90	0,943	57	1,30	1,363
14	0,50	0,524	34	0,90	0,943	59	1,30	1,363
16	0,50	0,524	36	0,90	0,943	61	1,30	1,363
18	0,50	0,524	38	0,90	0,943	63	1,30	1,363
			43	0,90	0,943			

REVISADO POR:

Mgs. Alexis Andrade
TUTOR DE TESIS

APROBADO POR:

Dra. Nancy Orozco
TÉCNICA DE LABORATORIO

Anexo 5 Pérdida de masas

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO FACULTAD DE INGENIERÍA CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL



Tema: Resistencia al ataque ácido en matrices de activación geopoliméricas utilizando como material precursor piedra pómez proveniente de Tungurahua.

Localización: Laboratorio de Ciencias Químicas (UNACH) **Fecha:** 21/11/2022 25/11/2022

Elaborado por: Góngora Ronald y Michelle Mancheno

Ensayo: ENSAYO DE PÉRDIDA DE MASA EN UN AMBIENTE ÁCIDO CONTROLADO

Norma: -

RESULTADOS DE MASA RESIDUAL CONTROLADA EN LA MATRIZ DE CEMENTO

MUESTRA 1				MUESTRA 2				MUESTRA 3			
pH inicial	9,8	P. Inicial (g)	11,301	pH inicial	9,6	P. Inicial (g)	11,7436	pH inicial	9,6	P. Inicial (g)	11,2808
TIEMPO (H)	VOL (ml)	PESO (g)	%PESO	TIEMPO (H)	VOL (ml)	PESO (g)	%PESO	TIEMPO (H)	VOL (ml)	PESO (g)	%PESO
0,00	0,00	11,30	100,00	0,00	0,00	11,74	100,00	0,00	0,00	11,28	100,00
0,33	6,70	11,17	98,85	0,33	10,20	11,59	98,66	0,33	7,50	11,14	98,72
0,67	7,00	11,12	98,44	0,67	10,30	11,53	98,20	0,67	7,80	11,06	98,00
1,00	7,30	11,09	98,17	1,00	10,50	11,48	97,76	1,00	8,50	11,04	97,88
1,33	7,30	11,05	97,76	1,33	10,60	11,43	97,36	1,33	8,70	11,01	97,56
1,67	8,80	11,01	97,38	1,67	10,80	11,38	96,90	1,67	9,00	10,93	96,85
2,00	8,80	10,96	97,02	2,00	11,00	11,30	96,21	2,00	9,20	10,91	96,72
3,00	8,80	10,91	96,54	3,00	11,50	11,26	95,84	3,00	9,70	10,86	96,24
4,00	11,70	10,89	96,34	4,00	14,80	11,22	95,52	4,00	12,80	10,83	95,96
8,00	12,30	10,86	96,06	8,00	15,60	11,18	95,19	8,00	13,50	10,80	95,71
20,00	14,30	10,78	95,43	20,00	17,00	11,06	94,21	20,00	15,60	10,71	94,94
24,00	16,00	10,74	95,05	24,00	18,00	11,03	93,92	24,00	16,80	10,64	94,28
28,00	17,00	10,66	94,31	28,00	19,20	10,99	93,60	28,00	17,90	10,59	93,88
32,00	17,40	10,65	94,25	32,00	19,70	10,98	93,52	32,00	18,60	10,58	93,79
44,00	19,00	10,63	94,07	44,00	21,20	10,96	93,35	44,00	19,90	10,56	93,61
48,00	19,20	10,56	93,44	48,00	21,20	10,91	92,88	48,00	20,00	10,53	93,30
52,00	20,20	10,52	93,09	52,00	22,40	10,88	92,64	52,00	21,20	10,50	93,05
56,00	20,70	10,51	93,04	56,00	23,20	10,87	92,55	56,00	21,90	10,48	92,92
68,00	22,00	10,50	92,92	68,00	24,50	10,85	92,43	68,00	23,20	10,45	92,68
72,00	22,00	10,44	92,41	72,00	24,50	10,80	91,96	72,00	23,20	10,41	92,32
76,00	23,30	10,43	92,26	76,00	25,40	10,76	91,65	76,00	24,20	10,36	91,80
80,00	23,80	10,37	91,78	80,00	26,10	10,70	91,07	80,00	24,90	10,29	91,18
92,00	25,00	10,21	90,33	92,00	27,30	10,55	89,88	92,00	26,20	10,13	89,82
96,00	26,70	10,18	90,12	96,00	28,80	10,53	89,67	96,00	27,80	10,11	89,64
100,00	26,70	10,14	89,72	100,00	28,80	10,50	89,43	100,00	27,80	10,08	89,37
104,00	27,00	10,14	89,70	104,00	29,30	10,50	89,38	104,00	28,30	10,07	89,29
116,00	28,00	10,14	89,69	116,00	30,10	10,49	89,31	116,00	29,10	10,07	89,26
120,00	28,50	10,09	89,31	120,00	30,70	10,46	89,09	120,00	29,90	10,06	89,14

REVISADO POR:

Mgs. Alexis Andrade
TUTOR DE TESIS

APROBADO POR:

Dra. Naney Orozco
TÉCNICA DE LABORATORIO

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL



Tema: Resistencia al ataque ácido en matrices de activación geopoliméricas utilizando como material precursor piedra pómez proveniente de Tungurahua
Localización: Laboratorio de Ciencias Química (UNACH)
Elaborado por: Góngora Ronald y Michelle Mancheno

Fecha: 06/12/2022 06/02/2023

Ensayo: ENSAYO DE PÉRDIDA DE MASA EN UN AMBIENTE ÁCIDO EXTREMO

Norma: -

RESULTADOS DE MASA RESIDUAL EN LA MATRIZ DE CEMENTO

FECHA	TIEMPO (días)	pH	M1	% M1	M2	% M2	M3	% M3	pH	% MP
07/12/2023	0	1,2	220,00	100,00	219,50	100,00	219,80	100,00	1,20	100,00
09/12/2023	2	2,1	219,80	99,91	218,50	99,54	219,50	99,86	2,10	99,77
12/12/2023	5	2,5	219,50	99,77	218,30	99,45	218,90	99,59	2,50	99,61
12/12/2023	5	1,1	219,50	99,77	218,30	99,45	218,90	99,59	1,10	99,61
14/12/2023	7	2,2	218,80	99,45	217,20	98,95	217,40	98,91	2,20	99,10
16/12/2023	9	2,5	218,40	99,27	216,90	98,82	217,00	98,73	2,50	98,94
16/12/2023	9	0,9	218,40	99,27	216,90	98,82	217,00	98,73	0,90	98,94
19/12/2023	12	2,3	215,60	98,00	214,10	97,54	214,20	97,45	2,30	97,66
21/12/2023	14	2,5	215,30	97,86	213,80	97,40	214,00	97,36	2,50	97,54
21/12/2023	14	0,8	215,30	97,86	213,80	97,40	214,00	97,36	0,80	97,54
23/12/2023	16	2	212,80	96,73	211,50	96,36	211,40	96,18	2,00	96,42
26/12/2023	19	2,5	209,00	95,00	208,00	94,76	208,00	94,63	2,50	94,80
26/12/2023	19	1,1	209,00	95,00	208,00	94,76	208,00	94,63	1,10	94,80
28/12/2023	21	2,1	206,10	93,68	205,30	93,53	204,50	93,04	2,10	93,42
30/12/2023	23	2,5	203,00	92,27	202,00	92,03	201,00	91,45	2,50	91,92
30/12/2023	23	1,2	203,00	92,27	202,00	92,03	201,00	91,45	1,20	91,92
02/01/2023	26	1,9	201,30	91,50	201,50	91,80	200,20	91,08	1,90	91,46
04/01/2023	28	2,5	200,00	90,91	201,00	91,57	200,00	90,99	2,50	91,16
04/01/2023	28	1,2	200,00	90,91	201,00	91,57	200,00	90,99	1,20	91,16
06/01/2023	30	1,8	197,20	89,64	198,50	90,43	197,60	89,90	1,80	89,99
09/01/2023	33	1,9	192,60	87,55	194,90	88,79	193,70	88,13	1,90	88,15
11/01/2023	35	2,2	191,80	87,18	192,90	87,88	193,00	87,81	2,20	87,62
13/01/2023	37	2,4	190,80	86,73	191,30	87,15	192,50	87,58	2,40	87,15
16/01/2023	40	2,5	184,50	83,86	189,00	86,10	189,60	86,26	2,50	85,41
16/01/2023	40	1,2	184,50	83,86	189,00	86,10	189,60	86,26	1,20	85,41
18/01/2023	42	1,6	177,80	80,82	180,40	82,19	180,20	81,98	1,60	81,66
20/01/2023	44	1,9	177,10	80,50	179,70	81,87	179,80	81,80	1,90	81,39
23/01/2023	47	2	176,90	80,41	178,90	81,50	179,40	81,62	2,00	81,18
25/01/2023	49	2,1	176,20	80,09	178,60	81,37	178,40	81,16	2,10	80,87
27/01/2023	51	2,2	176,50	80,23	178,60	81,37	178,40	81,16	2,20	80,92
30/01/2023	54	2,3	175,90	79,95	177,80	81,00	178,40	81,16	2,30	80,71
01/01/2023	56	2,4	175,60	79,82	177,20	80,73	178,30	81,12	2,40	80,56
03/01/2023	58	2,4	175,10	79,59	176,80	80,55	177,90	80,94	2,40	80,36
06/02/2023	61	2,5	174,20	79,18	176,30	80,32	177,20	80,62	2,50	80,04

REVISADO POR:


Mgs. Alexis Andrade
TUTOR DE TESIS

APROBADO POR:


Dra. Nancy Orozco
TÉCNICA DE LABORATORIO