



**UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN,
VINCULACIÓN Y
POSGRADO
DIRECCIÓN DE POSGRADO**

TEMA

“Resistencia al ataque ácido de matrices activadas alcalinamente de piedra pómez y polvo de ladrillo fabricados con activadores químicos comerciales”

**Trabajo de Titulación para optar al título de
Magister en ingeniería civil, con Mención en Gestión de la Construcción**

Autor:

Pamela Liliana Ibarra Loza

Tutor:

Ing. Cristian Andrés Marcillo Zapata MsC

Riobamba, Ecuador 2024

DECLARATORIA DE AUTORÍA

Yo, Pamela Liliana Ibarra Loza, con cédula de ciudadanía 0603449067, autora del trabajo de investigación titulado: “RESISTENCIA AL ATAQUE ÁCIDO DE MATRICES ACTIVADAS ALCALINAMENTE DE PIEDRA POMEZ Y POLVO DE LADRILLO FABRICADOS CON ACTIVADORES QUÍMICOS COMERCIALES”, certifico que la producción, ideas, opiniones, criterios, contenidos y conclusiones expuestas son de mí exclusiva responsabilidad.

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

En Riobamba, 15 de noviembre de 2024

Ing. Pamela Liliana Ibarra Loza

C.I: 0603449067

Riobamba, 11 de noviembre de 2024

ACTA DE SUPERACIÓN DE OBSERVACIONES

En calidad de miembro del Tribunal designado por la Comisión de Posgrado, CERTIFICO que una vez revisado el Proyecto de Investigación y/o desarrollo denominado **"RESISTENCIA AL ATAQUE ÁCIDO DE MATRICES ACTIVADAS ALCALINAMENTE DE PIEDRA POMEZ Y POLVO DE LADRILLO FABRICADOS CON ACTIVADORES QUÍMICOS COMERCIALES"**, dentro de la línea de investigación de: **Ingeniería, Producción, Industria y Construcción, presentado por el maestrante Ibarra Loza Pamela Liliana**, portador de la CI. 060344906-7, del programa de **Maestría en Ingeniería Civil con mención en Gestión de la Construcción**, cumple al 100% con los parámetros establecidos por la Dirección de Posgrado de la Universidad Nacional de Chimborazo.

Es todo lo que podemos certificar en honor a la verdad.

Atentamente,



CRISTIAN ANDRÉS
MARCILLO ZAPATA

Mgs. Andrés Marcillo
MIEMBRO DEL TRIBUNAL

Riobamba, 11 de noviembre de 2024

ACTA DE SUPERACIÓN DE OBSERVACIONES

En calidad de miembro del Tribunal designado por la Comisión de Posgrado, CERTIFICO que una vez revisado el Proyecto de Investigación y/o desarrollo denominado "**Resistencia al ataque ácido de matrices activadas alcalinamente de piedra pomez y polvo de ladrillo fabricados con activadores químicos comerciales**", dentro de la línea de investigación de **Ingeniería, construcción, industria y producción**, presentado por el maestrante **Pamela Liliana Ibarra Loza**, portador de la CI. 0603449067, del programa de **Maestría en ingeniería civil, con mención en gestión de la construcción**, cumple al 100% con los parámetros establecidos por la Dirección de Posgrado de la Universidad Nacional de Chimborazo.

Es todo lo que podemos certificar en honor a la verdad.

Atentamente,



Tito Castillo C.
MIEMBRO DEL TRIBUNAL

Riobamba, 11 de noviembre de 2024

ACTA DE SUPERACIÓN DE OBSERVACIONES

En calidad de miembro del Tribunal designado por la Comisión de Posgrado, CERTIFICO que una vez revisado el Proyecto de Investigación y/o desarrollo denominado "**RESISTENCIA AL ATAQUE ÁCIDO DE MATRICES ACTIVADAS ALCALINAMENTE DE PIEDRA POMEZ Y POLVO DE LADRILLO FABRICADOS CON ACTIVADORES QUÍMICOS COMERCIALES**", dentro de la línea de investigación Ingeniería, construcción, industria y producción, **presentado por la maestrante Pamela Liliana Ibarra Loza**, portador de la Ci. 0603449067, del programa de **Maestría en Ingeniería Civil con mención en Gestión de la Construcción**, cumple al 100% con los parámetros establecidos por la Dirección de Posgrado de la Universidad Nacional de Chimborazo.

Es todo lo que podemos certificar en honor a la verdad.

Atentamente,



ALEXIS IVAN ANDRADE
VALLE

Ing. Alexis Andrade MSc.
MIEMBRO DEL TRIBUNAL

 UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO	CERTIFICADO DE CONTENIDO DE SIMILITUD		 SGC <small>SISTEMA DE GESTIÓN DE LA CALIDAD UNIVERSIDAD NACIONAL DE CHIMBORAZO</small>
	CÓDIGO:	VERSIÓN:	
	FECHA:		
	MACROPROCESO:		
	PROCESO:		
	SUBPROCESO:		

Riobamba, 11 de septiembre de 2024

CERTIFICADO

De mi consideración:

Yo **Cristian Andrés Marcillo Zapata**, certifico que **Pamela Liliana Ibarra Loza** con cédula de identidad No. 060344906-7 estudiante del programa de **Maestría en Ingeniería Civil con mención en Gestión de la Construcción, cohorte Primera** presentó su trabajo de titulación bajo la modalidad de Proyecto de titulación con componente de investigación aplicada/desarrollo denominado: **Resistencia al ataque ácido de matrices activadas alcalinamente de piedra pómez con polvo de ladrillo fabricados con activadores químicos comerciales**, el mismo que fue sometido al sistema de verificación de similitud de contenido TURNITIN identificando el 6% de similitud en el texto.

Es todo en cuanto puedo certificar en honor a la verdad.

Atentamente,



Ing. Cristian Andrés Marcillo Zapata Mgs.

Ci: 060387763-0

Adj.:

- Resultado del análisis de similitud

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a mi familia, por su apoyo que hicieron posible que alcanzara este logro. A mis padres, por ser mi ejemplo de perseverancia y dedicación. A mis hermanos, por su aliento constante y comprensión durante este largo camino.

A mis amigos cercanos, quienes siempre estuvieron ahí para escucharme, motivarme. Su amistad fue un baluarte en los momentos difíciles y una fuente de celebración en los triunfos.

Finalmente, dedico este trabajo a todos aquellos que, de una manera u otra, me han inspirado y han formado parte de este viaje.

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi profunda gratitud a todas las personas que contribuyeron de manera significativa a la realización de este trabajo de investigación.

En primer lugar, agradezco sinceramente a mi tutor de tesis, Ing. Andrés Marcillo, por su orientación experta, paciencia y apoyo. Sus conocimientos y consejos fueron fundamentales para dar forma a este trabajo y superar los desafíos que surgieron en el camino.

A mis amigos, agradezco su apoyo moral y las discusiones enriquecedoras que tuvimos, las cuales contribuyeron significativamente a mi desarrollo académico y personal.

A mi familia, a quienes debo mi éxito en cada paso de mi educación. Su amor incondicional, sacrificios y constante aliento han sido mi mayor motivación.

ÍNDICE

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	18
1.1 Justificación	20
1.2 Formulación del Problema.....	21
1.3 Hipótesis	22
1.4 Objetivos.....	¡Error! Marcador no definido.
1.4.1 General.....	22
1.4.2 Específicos	22
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO	23
2.1 Comportamiento del Cemento y Geopolímeros en Contacto con Ácidos	¡Error!
Marcador no definido.	
2.1.1 Composición Química	¡Error! Marcador no definido.
2.1.2 Estructura y Microestructura.....	¡Error! Marcador no definido.
2.1.3 Productos de Reacción	¡Error! Marcador no definido.
2.1.4. Resistencia a la Degradación	¡Error! Marcador no definido.
CAPÍTULO III. METODOLOGÍA	30
3.1 Materiales Utilizados.....	34
3.1.1 Cemento.....	34
3.1.2 Piedra Pómez (PP).....	35
3.1.3 Polvo de Ladrillo (PL).....	37

3.1.4	Activadores	39
3.1.5	Ácido Nítrico	40
3.2	Equipos Utilizados	41
3.2.1	Máquina de los Ángeles	41
3.2.2	Moldes	42
3.2.3	Agitador Magnético.....	42
3.2.4	Phmetro.....	43
3.2.5	Buretra Graduada	43
3.2.6	Balanza Analítica	44
3.3	Dosificaciones para Preparación de Mezcla como Control (Cemento)	46
3.4	Dosificación para Geopolímero (Piedra Pómez y Polvo de Ladrillo).....	47
3.5	Capacidad de Neutralización Ácida (ANC) de pH Combinado	48
3.5.1	Procedimiento General Según la Norma Europea EA NEN 7371:2004	48
3.6	Ensayo de pérdida de masa controlada	52
3.7	Pérdida de Masa en Probetas Sumergidas en Condiciones de Acidez Extrema	54
CAPITULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN		56
4.1	Ensayos de Compresión de las probetas.....	56
4.2	Capacidad de Neutralización Ácida (ANC) de pH Combinado	58
4.3	Pérdida de Masa en Probetas Prismáticas.	70
4.3	Pérdida de Masa en Probetas Sumergidas en Condiciones de Acidez Extrema	78

CAPITULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES98

5.1 Conclusiones.....98

5.2 Recomendaciones.....100

BIBLIOGRAFÍA.....101

ANEXOS103

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características químicas y mineralógicas del cemento portland tipo I.....	34
Tabla 2. Composición química de la Piedra Pómez.....	36
Tabla 3. Composición química del polvo de ladrillo	38
Tabla 4. Probetas utilizadas en el proyecto de investigación	45
Tabla 5. Resultados de los ensayos a compresión	57
Tabla 6. PH inicial de las probetas empleadas en la investigación.....	59
Tabla 7. Resultados de las probetas de cemento y geopolímero	90
Tabla 8. Peso de las probetas	103
Tabla 9. Dosificación final de las probetas empleadas en la investigación.....	104

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diseño Experimental.....	31
Figura 2. a) Probetas en el horno; b) y c) Probetas desencofradas	34
Figura 3. Cemento Portland.....	35
Figura 4. Piedra Pómez (PP)	36
Figura 5. a) Piedra pómez directo de la mina; b) Piedra pómez tamizada y secada en el horno..	37
Figura 6. Polvo de Ladrillo (PL).....	38
Figura 7. a) Pedazos de ladrillos en la máquina de los Ángeles; b) Polvo de ladrillo sin tamizar	39
Figura 8. Silicato de Sodio e Hidróxido de Sodio	40
Figura 9. Ácido Nítrico	41
Figura 10. Máquina de los Ángeles	41
Figura 11. Moldes	42
Figura 12. Agitador Magnético.....	43
Figura 13. Phmetro.....	43
Figura 14. Buretra Graduada	44
Figura 15. Balanza Analítica	44
Figura 16. a) Triturado de probeta; b) Muestra triturada con Agua destilada; c) Control de pH inicial.....	52
Figura 17. a)Vigueta, b)muestra 24horas de ensayo, c)muestra a las 120horas de ensayo.....	54
Figura 18. Muestras a los 3 días de ensayo.	55
Figura 19. Gráfica de las muestras de Cemento vs. Tiempo - Ph7 Neutra, Ph4 Ácida y Ph2 Muy Ácida	60

Figura 20. Gráfica 8M PP + 15%PL vs Tiempo - Ph7 Neutra, Ph4 Ácida y Ph2 Muy Ácida.....	61
Figura 21. Gráfica 8M PP + 25%PL vs Tiempo - Ph7 Neutra, Ph4 Ácida y Ph2 Muy Ácida.....	63
Figura 22. Gráfica 10M PP + 15%PL vs Tiempo - Ph7 Neutra, Ph4 Ácida y Ph2 Muy Ácida...	65
Figura 23. Gráfica 10M PP + 25%PL vs Tiempo - Ph7 Neutra, Ph4 Ácida y Ph2 Muy Ácida...	66
Figura 24. Gráfica 12M PP + 15%PL vs Tiempo - Ph7 Neutra, Ph4 Ácida y Ph2 Muy Ácida...	68
Figura 25. Gráfica 12M PP + 25%PL vs Tiempo - Ph7 Neutra, Ph4 Ácida y Ph2 Muy Ácida...	69
Figura 26. Comparación general de todas las gráficas resultantes en la investigación	89
Figura 27. Gráfica de pérdida de masa - Cemento vs Tiempo	71
Figura 28. Gráfica de pérdida de masa - 8M PP + 15%PL vs Tiempo	72
Figura 29. Gráfica de pérdida de masa - 8M PP + 25%PL vs Tiempo	73
Figura 30. Gráfica de pérdida de masa - 10M PP + 15%PL vs Tiempo	74
Figura 31. Gráfica de pérdida de masa – 10M PP + 25%PL vs Tiempo	76
Figura 32. Gráfica de pérdida de masa - 12M PP + 15%PL vs Tiempo	77
Figura 33. Gráfica de pérdida de masa - 12M PP + 25%PL vs Tiempo	78
Figura 34. <i>Comparación general de todas las gráficas resultantes en la investigación</i>	<i>92</i>
Figura 35. Comparación general de todas las gráficas resultantes en la investigación	93
Figura 36. Gráfica de pérdida de masa en condiciones de acidez extrema - Cemento vs Tiempo	79
Figura 37. Gráfica de pérdida de masa en condiciones de acidez extrema – 8M PP + 15%PL vs Tiempo.....	80
Figura 38. Gráfica de pérdida de masa en condiciones de acidez extrema – 8M PP + 25%PL vs Tiempo.....	81

Figura 39. Gráfica de pérdida de masa en condiciones de acidez extrema – 10M PP + 15%PL vs Tiempo.....	83
Figura 40. Gráfica de pérdida de masa en condiciones de acidez extrema – 10M PP + 25%PL vs Tiempo.....	84
Figura 41. Gráfica de pérdida de masa en condiciones de acidez extrema – 12M PP + 15%PL vs Tiempo.....	86
Figura 42. Gráfica de pérdida de masa en condiciones de acidez extrema – 12M PP + 25%PL vs Tiempo.....	87
Figura 43. Comparación general de todas las gráficas resultantes en la investigación	96

RESUMEN

Los geopolímeros, como alternativa sostenible al cemento convencional, ofrecen ventajas como la reducción de la huella de carbono, mayor resistencia y durabilidad, y la capacidad de incorporar residuos industriales. Sin embargo, enfrentan retos en cuanto a optimización, normativas y aceptación en la industria. Este estudio evalúa la durabilidad de geopolímeros elaborados con piedra pómez y polvo de ladrillo frente a ataques ácidos, comparándolos con cemento Portland. La piedra pómez y el polvo de ladrillo, ricos en sílice y alúmina, reaccionan con activadores alcalinos para formar una estructura sólida tridimensional.

Se prepararon siete mezclas con variaciones en la molaridad de los activadores (8M, 10M, 12M) y en el porcentaje de polvo de ladrillo (15% y 25%). Las propiedades fueron evaluadas mediante ensayos de capacidad de neutralización ácida (ANC) a diferentes pH y pérdidas de masa en condiciones de pH 2 y acidez extrema. Los resultados mostraron que los geopolímeros basados en piedra pómez y polvo de ladrillo presentan mayor resistencia al ataque ácido que los cementos Portland, lo que se atribuye a su estructura química más resistente a la corrosión ácida. Estos resultados sugieren que los geopolímeros podrían ser una opción más duradera y sostenible en ambientes agresivos, ampliando su uso en la construcción.

Palabras clave: geopolímero, piedra pómez, polvo de ladrillo, matrices activadas, ácido nítrico, pH, durabilidad.

ABSTRACT

As a sustainable alternative to conventional cement, geopolymers offer advantages such as reduced carbon footprint, higher strength and durability, and the ability to incorporate industrial waste. However, they need help in optimization, regulations, and industry acceptance. This study evaluates the durability of geopolymers made from pumice and brick dust against acid attacks, comparing them with Portland cement. Pumice and brick dust, rich in silica and alumina, react with alkaline activators to form a solid three-dimensional structure.

Seven mixtures were prepared with variations in the molarity of the activators (8M, 10M, 12M) and the percentage of brick dust (15% and 25%). The properties were evaluated through acid neutralization capacity (ANC) tests at different pH levels, mass loss under pH two conditions, and extreme acidity. The results showed that pumice and brick dust-based geopolymers exhibit more excellent resistance to acid attack than Portland cement due to their chemical structure being more resistant to acid corrosion. These findings suggest that geopolymers could be a more durable and sustainable option in aggressive environments, expanding their use in construction.

Keywords: geopolymer, pumice, brick dust, activated matrices, nitric acid, pH, durability.



Reviewed by:

Mgs. Sofia Freire Carrillo

ENGLISH PROFESSOR

C.C. 0604257881

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

El hormigón es uno de los materiales más utilizados en la construcción debido a sus sobresalientes propiedades mecánicas en estado endurecido, tales como alta resistencia a la compresión, resistencia a la flexión, resistencia a la tracción, módulo de elasticidad, dureza y plasticidad. Sin embargo, a pesar de sus ventajas, el hormigón enfrenta problemas significativos relacionados con su durabilidad. Entre estos, el ataque químico que es la degradación debido a reacciones de agentes externos químicos, el cual causa pérdida de resistencia, fisuración y en casos extremos colapso de la estructura. La exposición a ambientes agresivos como son las aguas salinas, contaminantes químicos o ciclos de congelación y descongelación, puede acelerar el deterioro del hormigón, afectando su rendimiento a largo plazo. Problemas como la corrosión, las reacciones con sulfatos y la reacción álcali-sílice contribuyen a su degradación, lo que lleva a un alto costo de mantenimiento y reparación en la industria de la construcción (A. Castro., 2016).

Además, la producción de hormigón tiene implicaciones ambientales considerables. La fabricación de cemento, el componente aglutinante del hormigón, requiere la calcinación de piedra caliza a altas temperaturas, un proceso que consume grandes cantidades de energía y libera dióxido de carbono (CO_2) como subproducto. De hecho, la industria del cemento es responsable de aproximadamente el 8% de las emisiones globales de CO_2 , contribuyendo de manera significativa al cambio climático (Bella et al., 2020). Los problemas de durabilidad asociados con los hormigones basados en cemento Portland, junto con la necesidad de reducir las emisiones de CO_2 , han impulsado la búsqueda de alternativas más sostenibles.

En este contexto, los geopolímeros han surgido como una prometedora alternativa al cemento convencional. Estos materiales aglutinantes inorgánicos pueden reemplazar parcial o

totalmente el cemento, ofreciendo ventajas tales como una menor huella de carbono, mayor resistencia y durabilidad, y mejor compatibilidad con residuos industriales.

1.1 Justificación

La investigación en geopolímeros se centra en optimizar sus propiedades y adaptarlos a diversas aplicaciones, respondiendo así a la creciente demanda de materiales de construcción más sostenibles y de menor impacto ambiental. Utilizando precursores como piedra pómez y polvo de ladrillo, junto con activadores alcalinos como hidróxido de sodio y silicato de sodio, los geopolímeros tienen el potencial de ofrecer beneficios significativos en términos de rendimiento y durabilidad, especialmente en condiciones adversas. Este estudio tiene como objetivo evaluar el comportamiento de los geopolímeros frente a ataques químicos acelerados y compararlo con el de los cementos Portland convencionales, una comparación que es fundamental para entender las capacidades de estos nuevos materiales en entornos críticos.

Al realizar ensayos a ataque químico, se busca identificar tanto las ventajas como las limitaciones de cada material en términos de durabilidad. Esta investigación no solo contribuirá a la selección de soluciones más eficientes y sostenibles en la construcción, sino que también proporcionará información valiosa para el desarrollo de normativas y mejores prácticas en nuestra sociedad. Con ello, se espera facilitar la adopción de innovaciones que minimicen el impacto ambiental y mejoren el rendimiento a largo plazo de las estructuras, allanando el camino hacia un futuro más sostenible en la industria de la construcción.

1.2 Formulación del Problema

Los geopolímeros han demostrado tener propiedades mecánicas comparables, e incluso superiores, a las del concreto tradicional. Sin embargo, su adopción a gran escala está limitada por la incertidumbre en torno a su durabilidad a largo plazo. Factores críticos como la resistencia a la abrasión, la respuesta a ciclos de congelación-descongelación, la resistencia a agentes corrosivos y la estabilidad frente a la radiación ultravioleta son áreas que requieren una investigación más profunda (Van Deventer et al., 2012).

Además, a pesar de que en los últimos años hay un aumento de estudios sobre la durabilidad en geopolímeros, y aunque estos estudios han contribuido significativamente al conocimiento científico, aún persiste una falta de consenso y de estándares sobre su comportamiento en entornos agresivos, lo que impide su aceptación y utilización generalizada en la construcción. Esta situación limita la capacidad del sector para adoptar soluciones más sostenibles y resilientes, necesarias en el contexto actual de cambio climático.

Dada esta problemática, es esencial investigar y desarrollar metodologías que evalúen la durabilidad de los geopolímeros y establecer normativas que faciliten su integración en el mercado de la construcción. Esto no solo contribuiría a la sostenibilidad del sector, sino que también ofrecería soluciones efectivas ante los desafíos ambientales contemporáneos. Además, es fundamental fomentar la concienciación sobre los beneficios de los geopolímeros y llevar a cabo estudios de caso que demuestren su eficacia en aplicaciones prácticas.

En resumen, a pesar de las ventajas teóricas que presentan los geopolímeros como una alternativa sostenible capaz de mitigar el impacto ambiental de la construcción y mejorar la durabilidad de las estructuras, su aceptación y estandarización en la industria se ven obstaculizadas por la incertidumbre sobre su comportamiento a largo plazo, especialmente en

condiciones de ataque ácido. Esto resalta la necesidad de un enfoque más sistemático para investigar y validar sus propiedades, promoviendo así su uso en un futuro más sostenible.

1.3 Hipótesis

Las matrices geopoliméricas formuladas a partir de piedra pómez y polvo de ladrillo, cuando son activadas con soluciones químicas comerciales, presentan una resistencia superior al ataque ácido en comparación con las muestras de control de cemento Portland.

1.3.1 General

Evaluar el comportamiento de las matrices geopoliméricas basadas en piedra pómez y polvo de ladrillo fabricadas con activadores químicos comerciales frente al ataque ácido, y compararlo con la muestra control de cemento Portland.

1.3.2 Específicos

- Realizar ensayos de ataque ácido acelerado para evaluar el comportamiento de las matrices activadas alcalinamente y compararlas con el cemento portland.
- Determinar cuáles son los parámetros que se ven influenciados por el ataque ácido acelerado para tomarlo como referencia y evidencia de la durabilidad de las matrices activadas alcalinamente.
- Determinar la Capacidad de neutralización Ácida (ANC) de los geopolímeros fabricados con activadores químicos comerciales y compararlo con la muestra control de cemento portland.
- Determinar el comportamiento de los geopolímeros de piedra pómez y polvo de ladrillo ante ensayos de pérdida de masa al someterlos a una disolución de ácido concentrado.

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

La creciente preocupación por los impactos ambientales ha impulsado la investigación y el desarrollo de nuevas técnicas y materiales en la construcción. En particular, la industria del cemento enfrenta desafíos significativos tanto económicos como ecológicos debido a su alta producción a nivel global. Esta industria debe lidiar con problemas económicos y energéticos, como el uso cada vez más costoso y limitado de combustibles fósiles, así como con problemas ecológicos, ya que la producción de una tonelada de cemento genera aproximadamente 1,5 toneladas de materias primas y emite 0,8 toneladas de CO₂. Se estima que es el 8% de las emisiones globales de CO₂ provienen de la industria cementera (Scrivener y Kirkpatrick, 2007).

Según D. Ramón de la Cruz (2004), la generación de CO₂ durante la fabricación del cemento se produce principalmente por dos procesos: la descarbonatación de las materias primas y la combustión de los combustibles utilizados en la clinkerización.

El primer proceso, la descarbonatación de la piedra caliza, implica la descomposición del carbonato de calcio (CaCO₃) a altas temperaturas, liberando óxido de calcio (CaO) y dióxido de carbono (CO₂). La reacción química básica es la siguiente: $\text{CaCO}_3 + \text{calor} \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$. Por cada 100 g de CaCO₃ descarbonatado, se liberan aproximadamente 44 g de CO₂.

El segundo proceso importante que contribuye a las emisiones de CO₂ es la combustión de los combustibles fósiles, principalmente carbón, utilizado en la clinkerización. La combustión del carbono con oxígeno produce CO₂ y calor, como se describe en la siguiente reacción: $\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO}_2 + \text{calor}$. Por cada 12 g de carbono quemado, se generan 44 g de CO₂.

Como resultado de estos procesos, se estima que por cada tonelada de clínker producida en la fabricación de cemento se emiten aproximadamente 0,85 toneladas de CO₂. De esta cantidad, 0,3 toneladas provienen de la combustión del carbón utilizado en la clinkerización, y 0,55 toneladas son el resultado de la descarbonatación de las materias primas, principalmente el carbonato de calcio.

Además, La durabilidad del hormigón es una preocupación fundamental en la industria de la construcción debido a su impacto directo en la vida útil y el costo de mantenimiento de las estructuras. El hormigón basado en cemento Portland, aunque ampliamente utilizado, presenta diversos problemas relacionados con su durabilidad, que afectan tanto su rendimiento a largo plazo como los costos de reparación y mantenimiento (D. Ramón de la Cruz, 2004). Uno de los problemas más críticos son los ataques químicos. El cemento Portland es susceptible a ataques cuando la estructura del hormigón se encuentra en un entorno ácido. Estas condiciones provocan reacciones físicas y químicas que reducen los niveles de pH del material, debilitando su resistencia. A medida que las reacciones continúan, la estructura del hormigón pierde gradualmente su resistencia mecánica, lo que resulta en grietas, pérdida de masa y, en algunos casos, el eventual colapso de la estructura. Aunque las estructuras de hormigón están diseñadas típicamente para durar más de 50 años, el daño a veces puede ocurrir antes de lo estimado (M. Pérez Ramos, 2015).

Otro factor que afecta la durabilidad del hormigón es la degradación por ciclación de congelación y deshielo. Este fenómeno es particularmente problemático en climas fríos, donde el agua absorbida por el hormigón puede congelarse, expandirse y causar grietas. La repetición de este ciclo de congelación-descongelación puede generar una desintegración de la superficie del

hormigón, reduciendo significativamente su durabilidad. En condiciones extremas, este proceso puede llevar a la pérdida de integridad estructural del material (J. Quispe, 2019).

El curado del hormigón es otro factor crítico que puede afectar su durabilidad. Durante este proceso, el hormigón puede experimentar deshidratación y retracción, lo que puede originar grietas superficiales de retracción. Estas grietas no solo comprometen la estética y la resistencia superficial del material, sino que también sirven como puntos de entrada para agentes agresivos, como agua o sales. Estos agentes pueden penetrar en la estructura del hormigón, acelerando la degradación del material (J. Cedeño, 2009).

Un proceso químico importante que afecta la durabilidad del hormigón es la carbonatación, en el cual el CO_2 presente en el aire reacciona con el hidróxido de calcio en el hormigón, formando carbonato de calcio y agua. Este proceso reduce el pH del material, lo que compromete la protección de las armaduras de acero contra la corrosión. La pérdida de esta capa protectora puede llevar a una acelerada corrosión de las armaduras, reduciendo la vida útil del hormigón y aumentando los costos de mantenimiento y reparación de las estructuras (I. Galán García, 2011).

A partir de lo expuesto, los geopolímeros surgen como una alternativa prometedora en el sector de la construcción, debido a su potencial para reducir la contaminación ambiental y la posible mejora en la durabilidad de las estructuras. Los geopolímeros se producen a través de la reacción entre minerales aluminosilicatos, conocidos como precursores, y soluciones alcalinas, denominadas activadores. Este proceso genera materiales con propiedades similares a las de los cementos y morteros convencionales, pero con una menor huella de carbono. Entre los precursores más comunes utilizados en la fabricación de geopolímeros se incluyen escorias

vítreas de alto horno, que son ricas en calcio, cenizas volantes, con bajo contenido de calcio, y arcillas activadas térmicamente, particularmente el metacaolín. Los activadores alcalinos suelen ser sales de álcalis o hidróxidos alcalinos como el hidróxido de sodio (NaOH) y el silicato de sodio (Na₂SiO₃) (Torres-Carrasco & Puertas, 2017).

La investigación sobre geopolímeros está en constante desarrollo, buscando optimizar sus propiedades y ampliar sus aplicaciones en diversas condiciones ambientales. Estos estudios abarcan aspectos esenciales como la compatibilidad con diferentes tipos de agregados, la mejora de sus propiedades mecánicas y la evaluación de su desempeño en condiciones extremas, como temperaturas elevadas o ambientes químicos agresivos. Esto hace que los geopolímeros sean una opción viable no solo para el sector de la construcción en general, sino también para proyectos que requieran materiales con una alta resistencia a las condiciones adversas.

En la presente investigación, se emplearán piedra pómez y polvo de ladrillo como precursores para la fabricación de geopolímeros. Estos materiales serán activados con hidróxido de sodio y silicato de sodio, que actúan como los activadores alcalinos necesarios para la formación del material geopolimérico. Posteriormente, las probetas obtenidas serán sometidas a una serie de ensayos diseñados para evaluar su resistencia a ataques químicos agresivos, simulando condiciones reales a las que está expuesto el hormigón convencional, como las lluvias ácidas, un fenómeno que puede provocar la descomposición de las estructuras de concreto debido a su alta acidez. Estos ensayos permitirán determinar si los geopolímeros elaborados con estos precursores y activadores son capaces de ofrecer una mayor durabilidad y resistencia a ambientes químicos adversos en comparación con los materiales tradicionales basados en cemento Portland.

La exploración de estos materiales es fundamental para avanzar hacia una construcción más sostenible, con menores impactos ambientales y mayores capacidades de adaptación a condiciones extremas, lo que se alinea con los objetivos de sostenibilidad y longevidad en las infraestructuras urbanas.

En esta investigación se ha elegido ácido nítrico debido a su alta reactividad y su capacidad para simular de manera efectiva las condiciones corrosivas que enfrentan los materiales de construcción, particularmente en entornos urbanos e industriales. En estos ambientes, la contaminación atmosférica, generada principalmente por la emisión de gases como el dióxido de nitrógeno (NO_2), reacciona con el agua en la atmósfera formando compuestos ácidos como el ácido nítrico (HNO_3), lo que hace de este ácido una representación precisa de los efectos de las lluvias ácidas en las infraestructuras (Fenn et al., 1998; Meyer, 2009). Además, el ácido nítrico, siendo un ácido fuerte y altamente soluble en agua, presenta una notable capacidad para interactuar con los componentes alcalinos presentes en los geopolímeros, como los silicatos y hidróxidos. Esta alta reactividad facilita el estudio de los mecanismos de degradación química en materiales como los geopolímeros, permitiendo una evaluación precisa de su resistencia a ambientes ácidos (Neville, 2011; Zhang, 2013).

La elección del ácido nítrico no solo ayuda a simular las condiciones reales de agresión química, sino que también permite una comparación con estudios previos sobre la resistencia de materiales similares, como el cemento Portland, frente a ataques ácidos. Esto enriquece la comprensión del comportamiento de los geopolímeros bajo condiciones extremas, aportando

datos clave sobre su durabilidad y desempeño en entornos altamente corrosivos. Además, la investigación realizada con ácido nítrico proporciona una base más sólida para evaluar el comportamiento a largo plazo de estos materiales, especialmente en contextos donde la contaminación atmosférica juega un papel crucial en la degradación de las infraestructuras (Duxson et al., 2007; Provis & van Deventer, 2009). De esta forma, se optimiza la comparación entre geopolímeros y materiales tradicionales en cuanto a su resistencia ácida, lo que es fundamental para el desarrollo de soluciones más sostenibles en la industria de la construcción (Meyer, 2009).

En esta investigación se llevaron a cabo varios ensayos enfocados en evaluar la durabilidad y resistencia de los geopolímeros frente a condiciones de alta acidez, específicamente en su exposición al ácido nítrico. Estos análisis incluyeron la pérdida de masa, la capacidad de neutralización ácida (ANC) y pruebas de pérdida de masa bajo condiciones de acidez extrema, los cuales proporcionaron información detallada sobre los mecanismos de deterioro y el comportamiento de los geopolímeros en ambientes químicos agresivos.

Uno de los ensayos clave fue el ensayo de capacidad de neutralización ácida (ANC) de pH combinado. Este ensayo es crucial para evaluar cómo los geopolímeros pueden resistir la corrosión cuando están expuestos a ambientes de alta acidez. La medición de su capacidad para neutralizar el ácido permite comprender el comportamiento del material frente a condiciones químicas adversas. Según M. Pérez Ramos (2015), este tipo de ensayo es particularmente útil para prever cómo reaccionarán los geopolímeros en entornos donde el pH bajo puede ser un factor determinante en su deterioro.

Además, se realizó el ensayo de pérdida de masa controlada, cuyo objetivo principal es cuantificar la cantidad de masa que un material pierde durante su exposición a condiciones específicas de ensayo. Este análisis es fundamental para determinar la resistencia a la corrosión y la degradación de los geopolímeros, proporcionando una medida directa de su durabilidad bajo condiciones controladas de exposición (Pérez Ramos, 2015).

Por último, se llevó a cabo un ensayo de pérdida de masa en probetas sumergidas en condiciones de acidez extrema, con el fin de evaluar la resistencia de los geopolímeros frente a soluciones ácidas altamente corrosivas. Este tipo de pruebas es crucial para determinar la viabilidad de los geopolímeros en aplicaciones donde estarán en contacto prolongado con ácidos, como en entornos industriales o zonas de alta contaminación química. La información obtenida es vital para valorar su desempeño en condiciones extremadamente agresivas y en aplicaciones donde la durabilidad es una característica esencial (J. Martín Rodríguez, 2018).

Estos ensayos, en conjunto, permitirán obtener un panorama más completo de la resistencia a la corrosión y la degradación de los geopolímeros, permitiendo una comparación detallada con el comportamiento de los cementos tradicionales en condiciones adversas. Los resultados obtenidos proporcionarán información valiosa sobre el desempeño de los geopolímeros, que servirá para evaluar su viabilidad en aplicaciones industriales y de construcción en ambientes con agresiones químicas severas. De este modo, será posible determinar la durabilidad de los geopolímeros frente a los cementos convencionales, lo cual contribuirá a la selección de materiales más sostenibles y resistentes para la construcción de infraestructuras en entornos químicos altamente agresivos.

CAPÍTULO III. METODOLOGÍA

El estudio se llevó a cabo utilizando un diseño experimental explicativo, con un alcance explicativo, empleando métodos cuantitativos. Los experimentos realizados permitieron examinar el comportamiento de las variables manipuladas. A través de este diseño, se identificaron los mecanismos subyacentes de los geopolímeros frente a la exposición a ácidos, brindando una comprensión detallada sobre su resistencia a la degradación en condiciones químicas agresivas.

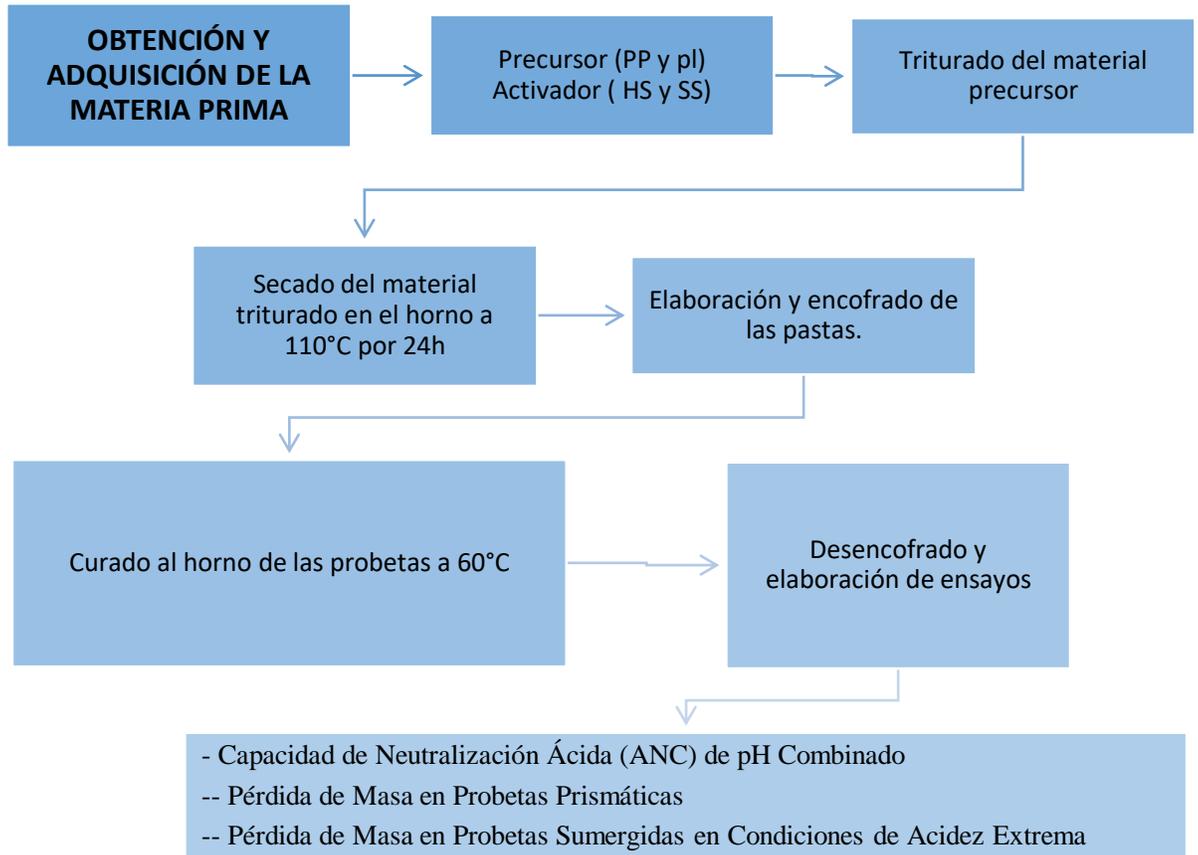
La población de estudio está constituida por muestras de geopolímeros que fueron preparadas con diferentes combinaciones de material precursor (piedra pómez y polvo de ladrillo) y concentraciones de activadores. Dado que el objetivo principal del estudio es examinar la resistencia de los geopolímeros frente a la exposición a ácidos.

A continuación, se muestra un esquema de la metodología empleada para la presente investigación:

Figura 1. Metodología del trabajo de investigación



EXPERIMENTO



En total, se prepararon 7 grupos de muestras con diferentes combinaciones de precursor y molaridad del activador, como se describió anteriormente. Estas muestras fueron evaluadas para determinar su resistencia a la degradación frente a la exposición a ácidos.:

- CEMENTO: muestra de cemento Portland (control).
- 8M-PP+15PL: muestra que se utilizó como activador hidróxido de sodio y silicato de sodio con molaridad de 8 (8M) y como precursor 85% del peso Piedra Pómez (PP) y 15% de peso Polvo de Ladrillo (PL).

- 8M-PP+25%PL: muestra que se utilizó como activador hidróxido de sodio y silicato de sodio con molaridad de 8 (8M) y como precursor 75% del peso Piedra Pómez (PP) y 25% de peso Polvo de Ladrillo (PL).
- 10M-PP+15PL: muestra que se utilizó como activador hidróxido de sodio y silicato de sodio con molaridad de 10 (10M) y como precursor 85% del peso Piedra Pómez (PP) y 15% de peso Polvo de Ladrillo (PL).
- 10M-PP+25%PL: muestra que se utilizó como activador hidróxido de sodio y silicato de sodio con molaridad de 10 (10M) y como precursor 75% del peso Piedra Pómez (PP) y 25% de peso Polvo de Ladrillo (PL).
- 12M-PP+15PL: muestra que se utilizó como activador hidróxido de sodio y silicato de sodio con molaridad de 12 (12M) y como precursor 85% del peso Piedra Pómez (PP) y 15% de peso Polvo de Ladrillo (PL).
- 12M-PP+25%PL: muestra que se utilizó como activador hidróxido de sodio y silicato de sodio con molaridad de 12 (12M) y como precursor 75% del peso Piedra Pómez (PP) y 25% de peso Polvo de Ladrillo (PL).

La figura 2, presenta las muestras de geopolímeros en diferentes etapas del proceso de curado. Este proceso es crucial para el desarrollo de las propiedades mecánicas y químicas de los geopolímeros, que se forman a partir de la activación de materiales ricos en silicatos y aluminatos, como cenizas volantes y escorias.

Figura 2. a) *Probetas en el horno; b) y c) Probetas desencofradas*



a)

b)

c)

Con un total de 126 muestras para realizar los ensayos planteados y cumplir con el objeto de la investigación se procede con el acondicionamiento de las materias primas:

3.1 Materiales Utilizados

3.1.1 Cemento

El cemento Portland es un tipo de cemento hidráulico ampliamente utilizado en la industria de la construcción debido a su capacidad para endurecer incluso bajo agua, su alta resistencia y su durabilidad. Estos atributos lo convierten en el material de construcción más utilizado a nivel mundial. Sin embargo, la producción de cemento Portland tiene un impacto significativo en el medio ambiente. Representa aproximadamente el 40% del consumo de energía primaria en el sector de la construcción, contribuye con alrededor del 33% de las emisiones globales de CO₂, y demanda el 60% de las materias primas extraídas de la litósfera. Para este estudio se utilizará el cemento Portland fabricado por Cemento Chimborazo UCEM, las características químicas del cemento son:

Tabla 1.

Características químicas y mineralógicas del cemento portland tipo I

REQUISITOS FISICOS	COMPOSICIÓN (wt%)	FASES MINERALOGICAS	COMPOSICIÓN (wt%)
CaO	66.96	Silicato tricalcicos (C3S)	60.07

SiO₂	22.64	Silicato dicalcico (C2S)	18.99
Fe₂O₃	3.69	Aluminato tricalcico(C3A)	5.06
SO₃	0.55	Ferro-aluminio tetra - calcico(C4AF)	11.22
Al₂O₃	4.27		
MgO	1.29		

Nota. Rivadeneira (2014)

Figura 3. *Cemento Portland*



3.1.2 *Piedra Pómez (PP)*

La piedra pómez es un tipo de roca volcánica porosa y ligera, formada por la solidificación rápida de lava viscosa y rica en gases, está compuesta principalmente por silicatos, como el cuarzo, feldespato y vidrio volcánico. Su color puede variar desde blanco hasta gris claro o incluso rosa, dependiendo de su composición mineral y el tipo de magma del que se formó. En nuestro caso de estudio se lo utilizara como precursor para la preparación de geopolímeros.

La inclusión de piedra pómez finamente molida como material precursor mejora la liberación de iones de aluminio (Al) y silicio (Si) durante la geopolimerización. Esto optimiza diversas propiedades químicas del geopolímero, como su capacidad para retener líquidos y gases.

Además, contribuye a incrementar la resistencia a la compresión y reducir la densidad del material (Cwirzen et al., 2014), Para la elaboración de la investigación se usará el material obtenido de la mina “Profuturo” ubicada en la provincia de Cotopaxi.

Figura 4. Piedra Pómez (PP)



Tabla 2.

Composición química de la Piedra Pómez

Código de referencia	Nombre del compuesto	Fórmula química	Porcentaje
00-039-1425	Cristobalita, syn	SiO ₂	1.9%
00-041-1486	Anortita, ordenada	CaAl ₂ Si ₂ O ₂	3.8%
00-041-1480	Albita, calcita, ordenada	(Na, Ca)Al(Si, Al) ₃ O ₈	6.7%
00-033-0988	Silicato e aluminio y potasio	KAlSiO ₄	4.3%

Nota. (Cajamarca & Paullan, 2023)

La piedra pómez fue sometida a un proceso de tamizado utilizando un tamiz No. 200, el cual fue protegido previamente con un tamiz No. 50 para preservar la integridad del equipo. Tras realizar el tamizado, se obtuvo la cantidad necesaria del material, que fue secada en un horno industrial a una temperatura de 110°C ± 5°C. Este proceso de secado se llevó a cabo hasta alcanzar

una masa constante, asegurando que se contará con la cantidad adecuada para la elaboración de las probetas requeridas en la investigación.

Figura 5. a) *Piedra pómez directo de la mina;* b) *Piedra pómez tamizada y secada en el horno*



a)



b)

3.1.3 Polvo de Ladrillo (PL)

El material proviene de la fabricación de ladrillos del cantón Chambo, provincia de Chimborazo, es un material derivado de la trituración de ladrillos reciclados o desechados, está compuesto principalmente por fragmentos de arcilla cocida, sílice y caolinita que brindarán aluminio a la mezcla, para fines de esta investigación se prepara mezclas con diferentes cantidades de polvo de ladrillo como precursor que serán del 15% y 25% del peso de la muestra.

Figura 6. Polvo de Ladrillo (PL)

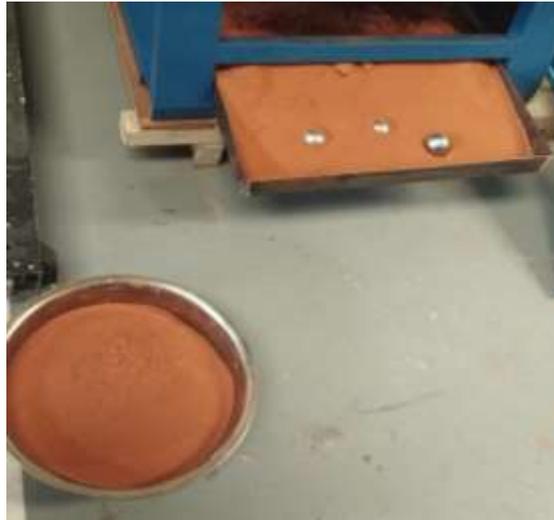


Tabla 3.

Composición química del polvo de ladrillo

Mineral	Fórmula química	Contenido (%)
Grupo plagioclasas	$(\text{Na, Ca})\text{Al}(\text{Si, Al})\text{SiO}_8$	78%
Hematita	Fe_2O_3	12%
Cuarzo	SiO_2	5%
Cordierita	$\text{Mg}_2\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{18}$	5%

Nota. (Cajamarca & Paullan, 2023)

El polvo de ladrillo fue triturado utilizando la Máquina de los Ángeles, aplicando 900 vueltas junto con 12 bolas de acero. Posteriormente, el material triturado fue secado a una temperatura de $110^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ para eliminar la humedad residual. Una vez seco, se procedió a tamizar el polvo utilizando un tamiz No. 200, asegurándose de alcanzar una masa constante. Este

proceso permitió obtener la cantidad necesaria para la elaboración de las probetas requeridas en la investigación.

Figura 7. a) Pedazos de ladrillos en la máquina de los Ángeles; b) Polvo de ladrillo sin tamizar



a)



b)

3.1.4 Activadores

Los activadores son sustancias químicas que facilitan la reacción entre los precursores minerales y forman la estructura del geopolímero. En este estudio se emplearán hidróxido de sodio y silicato de sodio en molaridades de 8M, 10M y 12M. Las sales alcalinas o los hidróxidos alcalinos, como NaOH, Na₂CO₃, Na₂O·nSiO₂ y Na₂SO₄, son comúnmente utilizados como activadores para cementos y hormigones activados alcalinamente. Aunque algunos compuestos de potasio también se han investigado, su uso es limitado debido a su disponibilidad y coste. Las propiedades de los activadores de sodio y potasio son similares, y pueden usarse en forma líquida o sólida (Shi et al., 2006).

Figura 8. *Silicato de Sodio e Hidróxido de Sodio*



3.1.5 *Ácido Nítrico*

El ácido nítrico (HNO_3) es un líquido corrosivo y altamente reactivo, con una fórmula química simple de HNO_3 . Este ácido fuerte se utiliza en diversas aplicaciones tanto en la industria como en el laboratorio. En el entorno de laboratorio, el ácido nítrico es empleado en reacciones como la oxidación de metales y la producción de sales nitradas.

Se presenta como un líquido que puede ser incoloro o tener un tono amarillento, y su olor es característico. Debido a su naturaleza altamente corrosiva, el ácido nítrico puede causar quemaduras severas en la piel y reaccionar violentamente con numerosas sustancias. Por lo tanto, su manejo requiere precauciones especiales, incluyendo el uso de equipo de protección adecuado y una ventilación adecuada.

Figura 9. *Ácido Nítrico*



3.2 Equipos Utilizados

3.2.1 Máquina de los Ángeles

La máquina de los ángeles realiza una serie de pruebas en las que las muestras se colocan en un tambor rotatorio junto con un material abrasivo. Al girar el tambor, las partículas de suelo se frotan entre sí y con el material abrasivo, lo que permite evaluar su resistencia al desgaste. Para fines de esta investigación se la utilizo 12 bolas a 900 revoluciones para lograr obtener la granulometría del material usado como precursor, material pasante del tamiz No. 200.

Figura 10. *Máquina de los Ángeles*



3.2.2 *Moldes*

Los moldes para encofrado son herramientas esenciales en la construcción de estructuras de concreto. Su función principal es dar forma al concreto mientras se endurece, asegurando que tome la forma deseada antes de que se haya curado completamente, se elaboraron moldes de 1x1x6cm y de 5x5x5cm metálicos para la cantidad total de las probetas de la investigación.

Figura 11. *Moldes*



3.2.3 *Agitador Magnético*

Es un equipo de laboratorio utilizado para mezclar líquidos de manera eficiente y controlada mediante la acción de un campo magnético. Es una herramienta común en laboratorios químicos y bioquímicos debido a su capacidad para proporcionar una mezcla homogénea sin necesidad de contacto directo con el líquido.

Figura 12. *Agitador Magnético*



3.2.4 *Phmetro*

Es un dispositivo de medición utilizado para determinar el **pH** de una solución. El pH es una escala que mide la acidez o alcalinidad de una solución, y el pHmetro proporciona una lectura precisa de este valor.

Figura 13. *pH-metro*



3.2.5 *Bureta Graduada*

Es un instrumento de medición volumétrica utilizado principalmente en laboratorios de química para la dispensación precisa de líquidos. Es especialmente útil en técnicas analíticas

como la titulación, donde se requiere un control exacto del volumen de reactivo añadido a una muestra.

Figura 14. *Bureta Graduada*



3.2.6 *Balanza Analítica*

Es un dispositivo de precisión utilizado en laboratorios para medir masas con una alta exactitud y precisión. Es esencial en aplicaciones que requieren mediciones de masa muy pequeñas. Capaz de medir masas con una precisión generalmente de hasta 0.0001 gramos (o 0.1 miligramos), y algunos modelos más avanzados pueden alcanzar precisiones aún mayores.

Figura 15. *Balanza Analítica*



A continuación, en la Tabla 4 se detalla las probetas que se utilizaron en el trabajo de investigación

Tabla 4.

Probetas utilizadas en el proyecto de investigación: polvo de piedra pómez (PP) y polvo de ladrillo (PL)-

MUESTRA	ACN (probetas de 1x1x0.6cm)	CONTROLAD A (probetas de 1x1x0.6cm)	EXTREMA (probetas de 5x5x5cm)	COMPRESION (probetas de 1x1x0.6cm)	COMPRESION (probetas de 5x5x5cm)
CEMENTO	3 u	3 u	3 u	6 u	3 u
8M - PP+15%PL	3 u	3 u	3 u	6 u	3 u
8M - PP+25%PL	3 u	3 u	3 u	6 u	3 u
10M - PP+15%PL	3 u	3 u	3 u	6 u	3 u
10M - PP+25%PL	3 u	3 u	3 u	6 u	3 u
12M - PP+15%PL	3 u	3 u	3 u	6 u	3 u
12M - PP+25%PL	3 u	3 u	3 u	6 u	3 u
TOTAL	21u	21u	21u	42u	21u

A continuación, en la Tabla 5 y 6 se detalla la dosificación de las probetas que se utilizaron en el trabajo de investigación

Tabla 5.

Dosificación de las probetas – Control

MUESTRA	AGUA/MATERIAL CEMENTANTE	CEMENTO (kg)	PP (kg)	PL (kg)	ACTIVADOR/BINDER (kg)
Cemento	0.7	1.680			1.180
Polvo de PP + 15%PL			1.428	0.252	1.180

Polvo de PP + 25%PL	1.260	0.420	1.180
--------------------------------	-------	-------	-------

Tabla 6.

Dosificación final de las probetas empleadas en la investigación

Concentración de NaOH	Na ₂ SiO ₃ /NaOH	NaOH (gr) en un litro de Agua destilada	Na ₂ SiO ₃ (gr) en un litro de Agua destilada al 44.63%	Agua destilada (litros)	Solución NaOH (kg) + Agua destilada	Na ₂ SiO ₃ (kg) + Agua destilada	NaOH+Na ₂ SiO (kg)
8M	2.5	320	2187	1lt	0.33	0.85	1.18
10M	2.5	400	2734	1lt	0.33	0.85	1.18
12M	2.5	480	3281	1lt	0.33	0.85	1.18

3.3 Dosificaciones para Preparación de Mezcla como Control (Cemento)

El proceso de preparación de la muestra de cemento inicia con el mezclado del cemento Portland, en el cual es fundamental seguir las recomendaciones específicas del fabricante para asegurar una mezcla adecuada. Se utiliza agua limpia, con una relación agua-cemento que se especifica en la Tabla No. 5. La mezcla se lleva a cabo en un recipiente adecuado, garantizando que los componentes se integren de manera uniforme y que la pasta resultante sea homogénea y libre de grumos.

Una vez obtenida la pasta de cemento, se procede al vertido y moldeado. La mezcla se vierte cuidadosamente en moldes de probetas previamente preparados. Es crucial compactar la mezcla de manera adecuada en el molde, utilizando herramientas como varillas de compactación y mazos de goma para eliminar el aire atrapado y asegurar una densidad uniforme. Este proceso

de compactación es esencial, ya que la presencia de burbujas de aire puede comprometer la integridad del cemento y afectar su rendimiento mecánico.

Una vez finalizado el vertido y la compactación, las probetas se colocan en un ambiente controlado para su curado. Se mantiene una temperatura y humedad adecuadas, y se sumergen en agua para facilitar el proceso de hidratación. Este cuidado es esencial para permitir que el cemento alcance su resistencia óptima, la cual se determina generalmente a los 28 días de curado.

3.4 Dosificación para Geopolímero (Piedra Pómez y Polvo de Ladrillo)

Veinticuatro horas antes de la elaboración de la pasta, se preparó el activador de acuerdo con la molaridad y dosificación especificadas en la Tabla No. 4. Para iniciar el proceso, se mezcló el polvo de los materiales secos durante 5 minutos, asegurando que la mezcla fuera homogénea. Después se añadió el activador preparado y se continuó mezclando hasta obtener una pasta completamente homogénea.

Posteriormente, la mezcla se vertió en los encofrados de las probetas, que habían sido tratados previamente para garantizar una fácil extracción posterior. El proceso de curado para los geopolímeros se llevó a cabo colocando las probetas en un horno a 60°C durante un período de 5 días. Esta etapa es crucial para permitir que las reacciones químicas necesarias para la formación del geopolímero ocurran de manera eficiente. Una vez completado el curado en horno, las probetas se dejaron en condiciones de clima ambiente hasta alcanzar un periodo total de 28 días, asegurando así que el material alcanzará su resistencia óptima antes de ser sometido a ensayos.

Una vez transcurrido los 28 días de elaboración de las probetas se comienza con los ensayos propuestos para la investigación lo cuales son:

3.5 Capacidad de Neutralización Ácida (ANC) de pH Combinado

La Capacidad de Neutralización Ácida (ANC) mide la habilidad de un material para neutralizar ácidos, lo que indica su resistencia a la acidificación y capacidad para mantener un pH adecuado. La medición del pH combinado, obtenida tras la mezcla de muestras y reactivos, permite evaluar la estabilidad de las fases sólidas del material según la norma europea EA NEN 7371:2004. Los pH analizados son: 7 (neutro), que indica un equilibrio entre iones hidrógeno y iones hidróxido; 4 (ácido), para verificar la sensibilidad del electrodo en condiciones ácidas; y 2 (muy ácido), que evalúa la capacidad del material para neutralizar ácidos en condiciones extremas, ayudando a entender su resistencia a la acidificación en distintos niveles de pH.

3.5.1 Procedimiento General Según la Norma Europea EA NEN 7371:2004

3.5.1.1 Preparación de Probetas

a) Molienda

- **Equipos y materiales Utilizados:** 3 probetas prismáticas, Mortero y tamiz de 125 μm .
- **Procedimiento:** Las probetas se muelen con un mortero hasta obtener partículas que pasen a través de un tamiz de 125 μm . Si quedan partículas retenidas en el tamiz, se deben moler nuevamente. Este proceso se repite hasta que todo el material pase por el tamiz.

b) Deshidratación

- **Equipos Utilizados:** Estufa.
- **Procedimiento:** El polvo obtenido se coloca en una estufa a 60°C durante dos horas para eliminar la humedad. Este paso asegura que el material esté seco y listo para el análisis.

3.5.1.2 Valoración del Ácido Nítrico

a) Preparación de la Solución de Carbonato de Sodio:

- **Materiales Necesarios y Equipos utilizados:** Carbonato de sodio, matraz Erlenmeyer de 100 ml, agua desionizada, indicador naranja de metilo.
- **Procedimiento:**
 - Disuelve **0.2000 ± 0.1000 g** de carbonato de sodio en un matraz Erlenmeyer de 100 ml con **50 ml** de agua desionizada.
 - Agrega **5 gotas** de indicador naranja de metilo para visualizar el cambio de pH durante la titulación.

b) Titulación con Ácido Nítrico:

- **Materiales y Equipos Necesarios:** Bureta graduada, ácido nítrico con concentración de **1 mol/L**.
- **Procedimiento:**
 - Llena la bureta con ácido nítrico.
 - Añade el ácido lentamente a la solución mientras agitas.
 - Observa el cambio de color del indicador, de naranja a rosado, que indica el cambio de pH de básico a ácido.
 - Registra el volumen de ácido nítrico utilizado en el momento en que se produce el cambio de color.

c) Cálculo del Factor de Corrección:

- **Ecuación**

$$f = \frac{2 \times m \times 1000}{105,989 \times C \times v} \quad (1)$$

- **Donde:**
 - m = Masa de carbonato de sodio (g)
 - 105,989 = Masa molecular del carbonato de sodio (g/mol)
 - C = Concentración de ácido nítrico (1 mol/L)
 - v = Volumen de ácido utilizado (mL)

3.5.1.3 Calibración del pH-Metro

a) Preparación y Calibración:

- **Materiales y Equipos Necesarios:** pH metro, disoluciones patrón de pH 7.00 y pH 4.01.
- **Procedimiento:**
 - Limpia y seca el electrodo del pH-metro.
 - Sumerge el electrodo en una disolución patrón de pH 7.00 y ajusta el pH-metro hasta que el valor sea estable y coincida con pH 7.00.
 - Limpia nuevamente el electrodo y repite el proceso con la disolución patrón de pH 4.01.
 - El pH-metro estará calibrado para medir con precisión pH en muestras desconocidas.

3.5.1.4 Medición del pH y Cálculo del ANC

a) Preparación de la Muestra para Medición:

- **Equipos y Materiales Utilizados:** Vaso de precipitación de 100 ml, barra, imantada, agitador magnético, balanza digital, buretra graduada, pH metro, muestra prismática
- **Procedimiento:**

- Se pesa la muestra y coloca en un vaso de precipitación de 100 ml con una barra imantada.
- Se agrega **50 ml** de agua desionizada y coloca el vaso sobre el agitador magnético. Inicia el agitado para mantener las partículas en suspensión.

b) Medición del pH:

- **Procedimiento:**

- Comienza con el ajuste del pH a 7.00, con un rango de ± 0.20 unidades. Esto se logra añadiendo ácido nítrico a la disolución hasta que el pH se mantenga en el intervalo de 7.20 a 6.80.
- El criterio que se utiliza para pasar de pH 7 a pH 4 es cuando no existe la necesidad de agregar ácido nítrico por un lapso de 15 minutos, mientras que la disolución analizada se mantenga en el intervalo de 7.20 a 6.80
- Ajusta el rango de pH a 4.00 (con límites de 4.20 y 3.80) y repite el proceso. Registra los valores hasta que no se añada más ácido durante 15 minutos.
- Finalmente, ajusta el pH a 2.00 (con límites de 2.20 y 1.80) y repite el proceso.

c) Cálculo del ANC:

El ANC se utiliza para evaluar la capacidad de un material para neutralizar ácidos. Se puede calcular utilizando la siguiente fórmula:

• **Ecuación**

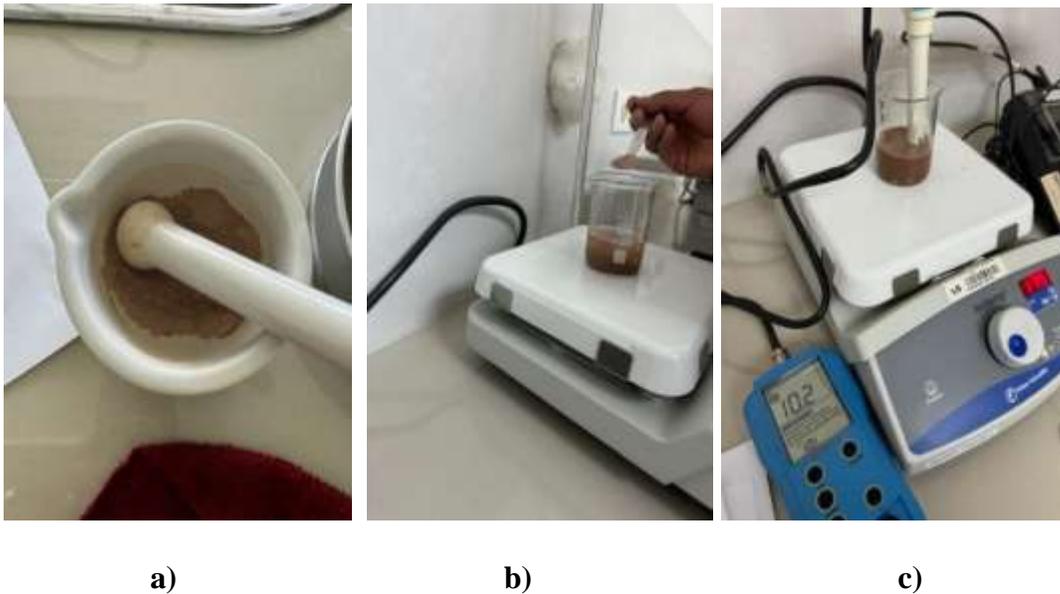
$$f = \frac{V_{HNO_3} \times C_{HNO_3} \times f}{m} \quad (2)$$

• **Donde:**

- V_{HNO_3} = Volumen de ácido Nítrico añadido (ml)
- C_{HNO_3} = Concentración de ácido nítrico (1 mol/L)
- f = Factor de corrección
- m = Peso de la muestra (g)

La figura muestra el proceso de medición de la Capacidad de Neutralización Ácida (ANC) de la muestra utilizando un agitador magnético. En el centro de la imagen se observa el agitador, donde se coloca un recipiente que contiene la muestra en análisis.

Figura 16. a) Triturado de probeta; b) Muestra triturada con Agua destilada; c) Control de pH inicial



3.6 Ensayo de pérdida de masa controlada

En este experimento, se sometieron dos probetas prismáticas de dimensiones (1x1x6) cm a condiciones agresivas en un entorno controlado. Las muestras se mantuvieron durante 120

horas sumergidas en una disolución de ácido nítrico con un pH de 2.00 ± 0.10 . Durante el periodo del ensayo, se registraron la masa residual de las probetas y la cantidad de ácido añadido para mantener el pH constante. El procedimiento seguido fue el siguiente:

Se establecieron los parámetros del ensayo en el pH-metro, ajustando la disolución para que mantuviera un pH constante de 2.00 ± 0.20 durante toda la prueba, siguiendo el procedimiento descrito en el literal b) del numeral 3.3.1.4. Para preparar la disolución, se añadieron 200 mL de agua desionizada en un vaso de precipitados de 500 mL, al que se le incorporó una barra imantada y se situó sobre un agitador magnético. Las probetas prismáticas se colocaron en una cesta plástica, asegurando que quedaran completamente sumergidas y rodeadas de líquido por todos lados, esta cesta se introdujo en el vaso con la disolución. Se inició la agitación y se sumergió el electrodo de pH, esperando hasta que el pH-metro indicara un valor estable. Una vez alcanzada la estabilidad, se registró el pH inicial y se comenzó el ensayo conectando el dosificador al pH-metro e iniciando el cronómetro. A partir de este momento, se realizaron adiciones de ácido para mantener el pH constante, y durante el ensayo se registraron datos periódicos que incluían el tiempo, la cantidad de ácido añadido y el peso residual de las probetas.

La figura 17, ilustra las diferentes etapas del proceso del ensayo de pérdida de masa controlada. Este ensayo es fundamental para evaluar la durabilidad y resistencia de los materiales bajo condiciones específicas.

Figura 17. a) *Vigueta*, b) *muestra 24 horas de ensayo*, c) *muestra a las 120 horas de ensayo*



a)

b)

c)

3.7 Pérdida de Masa en Probetas Sumergidas en Condiciones de Acidez Extrema

- En base a la investigación de (Marcillo & Bernabeu, 2021) se describe la metodología que se utilizó para el ensayo, utilizando tres probetas cúbicas de dimensiones 50x50x50 mm, se sumergieron en ácido nítrico con una concentración de 1 M dentro de un recipiente hermético.
- Las probetas se colocaron sobre una parrilla para asegurar que todas las caras estuvieran en contacto con la solución corrosiva.
- Durante el ensayo, se monitoreó continuamente el pH de la disolución, asegurándose de que no descendiera por debajo de 2.50 unidades para mantener condiciones adecuadas de corrosión.
- A intervalos específicos de tiempo, se extrajeron las probetas del ácido nítrico para medir la masa residual restante.
- Se registraron datos precisos que incluyen la masa residual de las probetas, los valores de pH de la solución en diferentes puntos temporales y el tiempo exacto en que se tomaron las mediciones.

Este enfoque experimental permite evaluar la resistencia de los materiales al ácido nítrico bajo condiciones controladas, proporcionando información crucial sobre la durabilidad y la respuesta del material frente a ambientes corrosivos específicos.

En la Figura 18 se presentan las muestras que han sido sumergidas en ácido nítrico, lo que permite observar los efectos del tratamiento sobre su superficie.

Figura 18. *Muestras a los 3 días de ensayo.*



CAPITULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Resultados

En este capítulo se procederá a un análisis de los resultados obtenidos a partir de los ensayos realizados a lo largo de la investigación. Este análisis se desglosará en secciones específicas, cada una centrada en un ensayo particular o en una variable clave evaluada durante el estudio. Cada sección proporcionará una visión detallada del proceso, presentando los resultados en un formato que puede incluir tablas, gráficos y otros elementos visuales relevantes.

4.2 Ensayos de Compresión de las probetas

La tabla a continuación presenta los resultados obtenidos de los ensayos de compresión realizados sobre probetas de geopolímeros y cemento. La resistencia a la compresión es un indicador crucial del desempeño estructural de los materiales, ya que refleja su capacidad para soportar cargas aplicadas sin fallar. A través de estos ensayos, se busca comparar el comportamiento mecánico de ambos tipos de materiales bajo condiciones controladas, lo que permitirá evaluar la viabilidad de los geopolímeros como alternativa sostenible y duradera al cemento tradicional.

Tabla 7.*Resultados de los ensayos a compresión*

	MUESTRA	RESISTENCIA CUBICAS MPa	RESISTENCIA PRISMATICAS MPa	PROMEDIO CUBICAS MPa	PROMEDIO PRISMATICAS MPa
CEMENTO	1	10.80	14.30	10.83	14.51
	2	11.00	14.00		
	3	10.69	15.23		
8M PP+15%PL	1	15.20	17.65	15.67	18.13
	2	16.00	18.23		
	3	15.80	18.50		
8M PP+25%PL	1	18.30	19.30	18.09	19.07
	2	17.96	19.00		
	3	18.00	18.90		
10M PP+15%PL	1	3.56	4.86	4.94	4.84
	2	5.26	5.10		
	3	6.00	4.56		
10M PP+25%PL	1	13.20	12.87	12.70	13.10
	2	12.50	13.24		
	3	12.40	13.20		
12M PP+15%PL	1	10.30	10.30	10.13	10.97
	2	10.00	11.20		
	3	10.10	11.40		
12M PP+25%PL	1	13.90	15.20	14.17	16.57
	2	14.00	14.90		
	3	14.60	19.60		

Al observar la tabla No. 7 se evidencia que los geopolímeros están superando al cemento Portland en términos de resistencia a la compresión a los 28 días. En particular, el geopolímero 8M PP+25%PL, con una resistencia de 18.09 MPa, se destaca como el de mejor desempeño entre las muestras evaluadas. Esta superioridad en resistencia sugiere que los geopolímeros no solo pueden competir con el cemento Portland, sino que también podrían ofrecer ventajas significativas en aplicaciones específicas, como en entornos agresivos o donde se requieren materiales más sostenibles. La capacidad de los geopolímeros para desarrollar resistencia

rápidamente y su menor huella de carbono en comparación con el cemento Portland refuerzan su potencial como alternativa viable en la construcción moderna. Estos hallazgos respaldan la creciente investigación en el uso de materiales basados en geopolímeros, resaltando su capacidad para contribuir a prácticas de construcción más sostenibles y eficientes (Davidovits, 1991; Provis & van Deventer, 2009).

La resistencia a la compresión de una probeta prismática (1x1x6 cm) puede ser superior a la de un cubo (5x5x5 cm) debido a varios factores. La geometría alargada de la probeta permite una mejor distribución de la carga a lo largo de su longitud, lo que reduce concentraciones de estrés y mejora la resistencia mecánica. Además, las probetas más delgadas suelen presentar menos defectos acumulados, favoreciendo su rendimiento en ensayos de compresión. El comportamiento anisotrópico de algunos materiales también puede resultar en una mayor resistencia en probetas alargadas bajo carga axial, mientras que el curado uniforme de las probetas más pequeñas contribuye a propiedades mecánicas más consistentes. Estos aspectos resaltan la importancia de la geometría en la evaluación de la resistencia de los materiales (Neville, 2011; Mehta & Monteiro, 2014).

4.3 Capacidad de Neutralización Ácida (ANC) de pH Combinado

Este ensayo se lo realizó con la finalidad de tener conocimiento de la cantidad de ácido necesario para neutralizar la muestra permite evaluar la capacidad de la misma para resistir la acción de ácidos y, por lo tanto, su potencial durabilidad en condiciones ambientales adversas. Este análisis es fundamental para entender cómo las características químicas de las muestras afectan su rendimiento y longevidad en aplicaciones prácticas, proporcionando información valiosa para su uso en diferentes contextos industriales y ambientales.

El parámetro de pH es crucial en este contexto, ya que proporciona una medida directa de la capacidad de las muestras para resistir la acidificación. La durabilidad de las matrices estudiadas está estrechamente vinculada a su comportamiento frente a los agentes ácidos presentes en el ambiente. Dada la elevada alcalinidad inherente de las muestras, estas pueden reaccionar significativamente con los ácidos, lo que podría comprometer su integridad y funcionalidad a lo largo del tiempo.

A continuación, se detalla el pH inicial de las diferentes muestras antes de iniciar el ensayo:

Tabla 8.

PH inicial de las probetas empleadas en la investigación

Material	pH inicial
Cemento	11.47
8M PP + 15%PL	11.73
8M PP + 25%PL	10.03
10M PP + 15%PL	11.97
10M PP + 25%PL	11.87
12M PP + 15%PL	11.50
12M PP + 25%PL	11.27

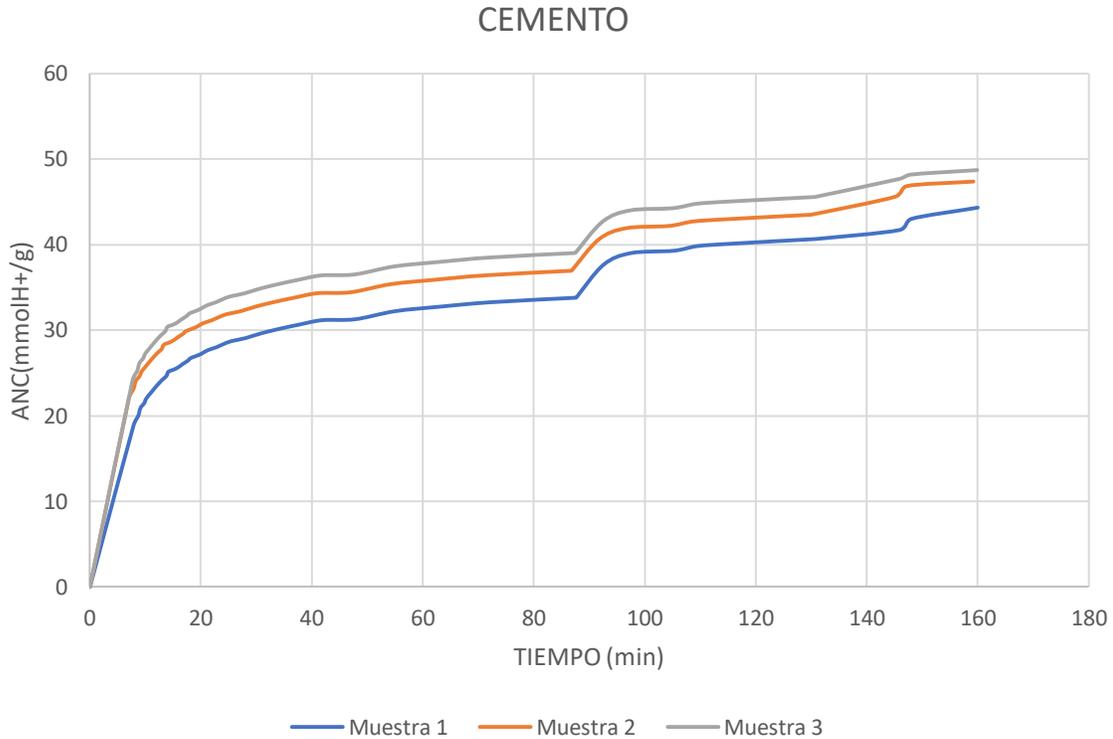
Los resultados de la tabla 8, muestran que los valores de pH para todas las muestras analizadas superan las 10 unidades. Esto indica que tanto las probetas de cemento como las muestras de geopolímero fabricadas con piedra pómez y polvo de ladrillo exhiben características alcalinas. El pH elevado observado en estas muestras sugiere una alta concentración de iones hidroxilo, confirmando que los materiales son altamente básicos (Smith & Johnson, 2020).

4.3.1 Muestra Cemento

Las tres muestras de cemento Portland sometidas al ensayo de neutralización de ácido mostraron un comportamiento similar confirmando su homogeneidad en sus características.

A continuación, se adjunta la figura 19, que muestra los resultados de las muestras de cemento en función del tiempo.

Figura 19. Gráfica de las muestras de Cemento vs. Tiempo - Ph7 Neutra, Ph4 Ácida y Ph2 Muy Ácida



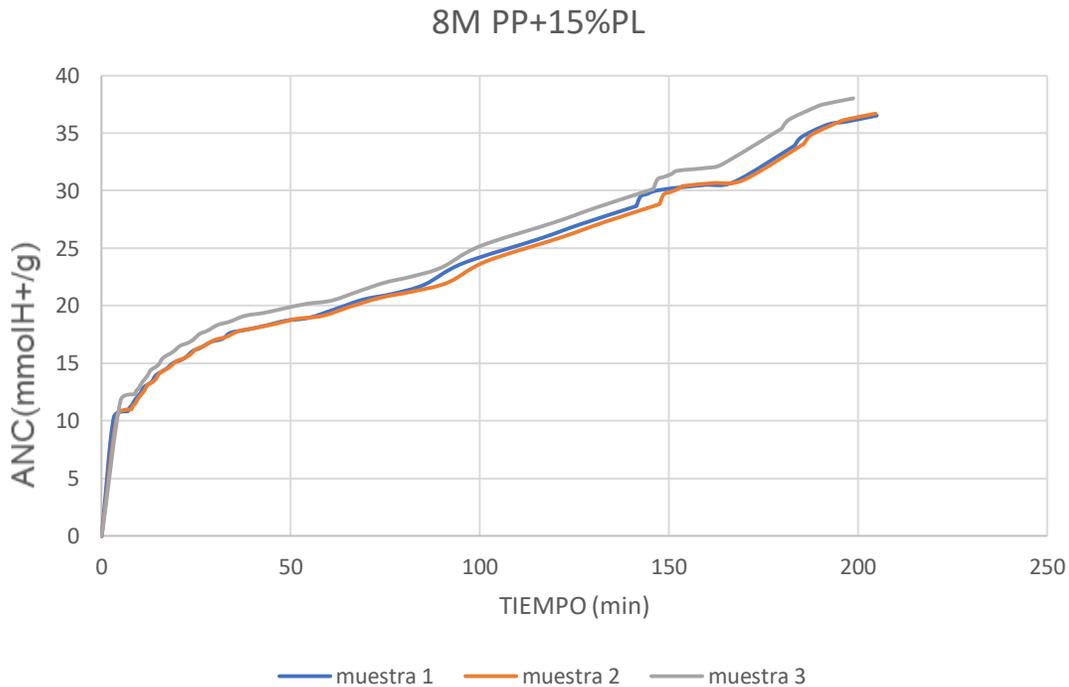
La Figura 19 muestra cómo disminuye el pH de la solución al reducir la alcalinidad de la muestra. El ácido añade iones H^+ a la mezcla, que reaccionan con la portlandita ($Ca(OH)_2$), neutralizando su efecto alcalino. Los niveles de pH más bajos, 4 y 2, se estabilizaron en un tiempo ligeramente menor, alrededor de 80 minutos. Esta diferencia en el tiempo de estabilización puede reflejar las dinámicas de la reacción de neutralización, con el nivel de pH 7 requiriendo un tiempo adicional para alcanzar un equilibrio completo debido a la mayor cantidad de ácido necesario para neutralizar la base fuerte presente en la muestra (Doe & White, 2019).

4.3.2 8M PP + 15%PL

Las muestras fueron tratadas con ácido nítrico, mostrando un comportamiento consistente entre las probetas en cuanto a tiempo y concentración de iones H^+ . Se observó que la cantidad de ácido nítrico añadida inicialmente es significativamente mayor en comparación con las dosis posteriores, de acuerdo con los datos de la investigación. Esta diferencia se refleja en el tiempo requerido para la neutralización, donde el primer punto de control (pH 7) demandó el doble de volumen de ácido y tiempo en comparación con los niveles de pH 4 y pH 2 (Smith & Johnson, 2020).

A continuación, se presenta la Figura 20, que muestra la relación entre el pH y el tiempo.

Figura 20. Gráfica 8M PP + 15%PL vs Tiempo - Ph7 Neutra, Ph4 Ácida y Ph2 Muy Ácida



Para alcanzar un pH de 7, se utilizó un promedio de 29.20 ml de ácido en un tiempo de neutralización de 145 minutos. Este tiempo prolongado y la cantidad significativa de ácido reflejan

la alta alcalinidad de las muestras, lo que indica la presencia considerable de compuestos básicos. En contraste, para los otros puntos de neutralización, se requirió un promedio de 7.86 ml de ácido, con un tiempo de neutralización de 58 minutos. Esta diferencia en las cantidades y tiempos sugiere que la neutralización de pH 7 presenta un desafío mayor en comparación con los niveles de pH más bajos, donde se logra una respuesta más rápida y eficiente en términos de cantidad de ácido necesario (Smith & Johnson, 2020).

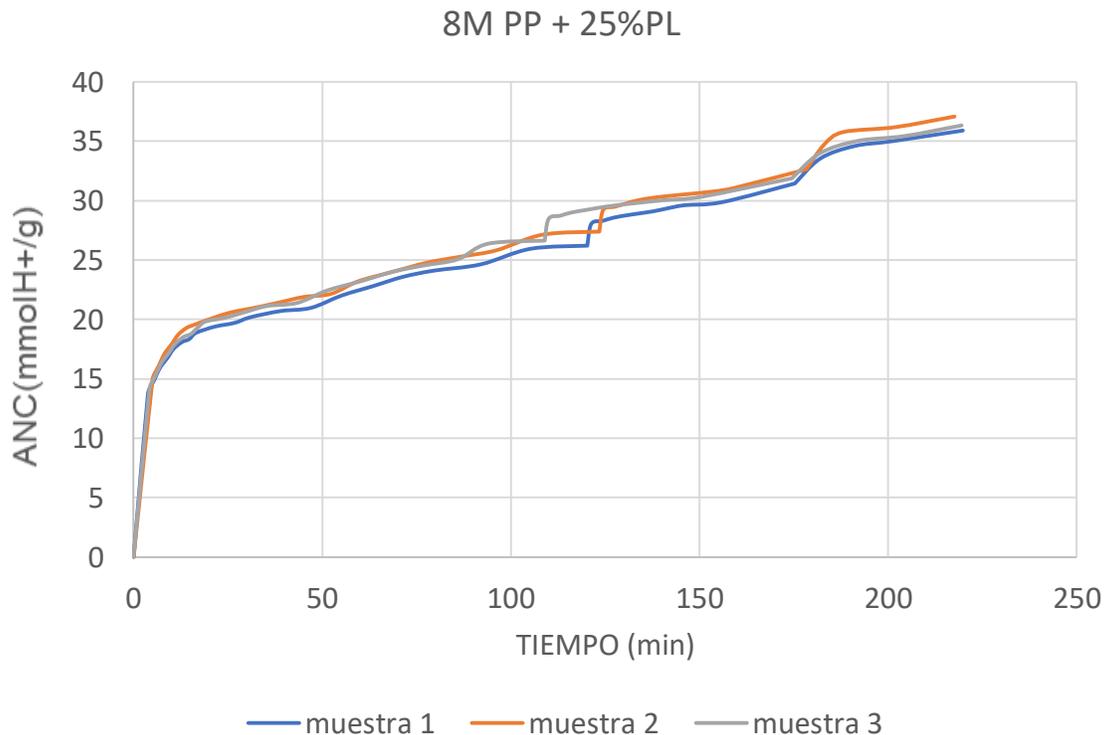
4.3.3 8MPP + 25%PL

En el estudio del comportamiento de las muestras de geopolímeros expuestas a ácido nítrico, se observaron patrones consistentes en cuanto a la cantidad de ácido necesario y el tiempo requerido para alcanzar la neutralización. Los datos sugieren que la primera cantidad de

ácido nítrico añadida fue significativamente mayor en comparación con los valores añadidos en otros puntos de control de pH.

A continuación, se muestra la gráfica 21, que representa la relación entre el pH y el tiempo.

Figura 21. Gráfica 8M PP + 25%PL vs Tiempo - Ph7 Neutra, Ph4 Ácida y Ph2 Muy Ácida



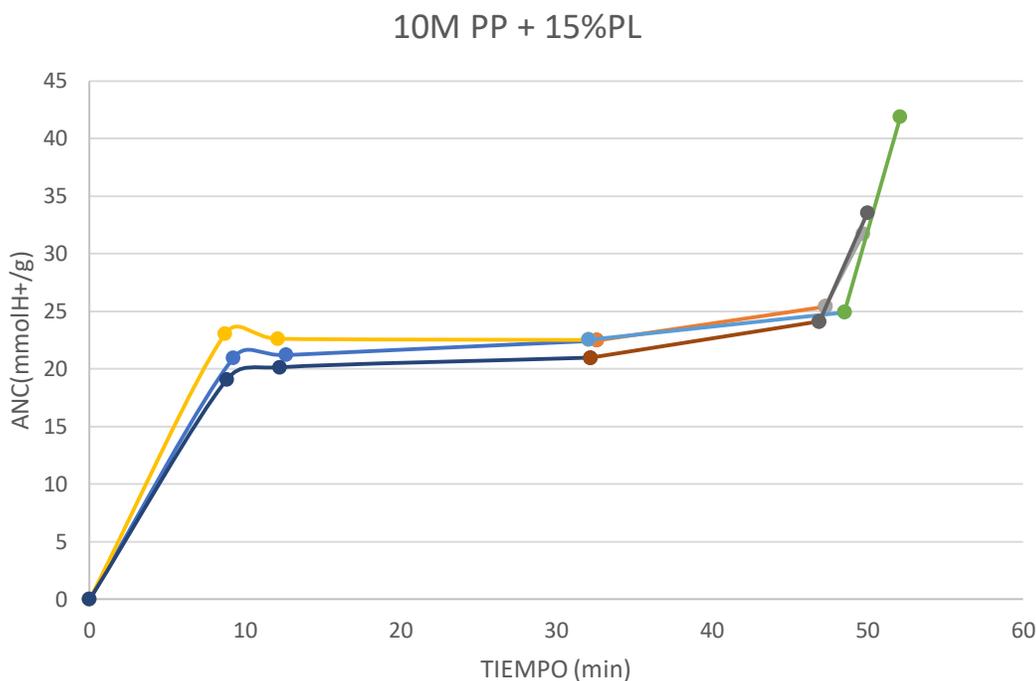
Las muestras presentaron un comportamiento similar en cuanto a la cantidad de iones H^+ , se observa que la primera cantidad de ácido nítrico añadido es alta en relación a los otros valores añadidos, el tiempo para la neutralización del primer punto de control pH7 es mayor que el tiempo de pH4 y pH2, esto podría deberse a la alta concentración de iones hidroxilo (OH^-) en la solución inicial. A pH 7, el equilibrio entre H^+ y OH^- es tal que el sistema tiene una mayor capacidad para neutralizar los iones de hidrógeno añadidos antes de que el pH cambie

significativamente (J. Davidovits, 2008), la neutralización para Ph7 se dio en un tiempo promedio de 117min con una cantidad de ácido añadido de 26.74

4.3.4 10M PP + 15%PL

La muestra analizada presenta una reacción atípica en comparación con las demás. Aunque su pH inicial es similar al de las otras probetas, se observó que se necesitó una cantidad significativamente mayor de ácido nítrico, con un promedio de 20.07 ml, para iniciar la reacción. Posteriormente, el tiempo total requerido para la neutralización de los diferentes pH fue relativamente corto, con un promedio de 50.60 minutos y un total de ácido añadido de 35.71 ml. Esto sugiere que, a pesar de un pH inicial similar, esta muestra tiene características que afectan la reacción y la neutralización, lo que podría ser indicativo de propiedades químicas o físicas particulares (Friedman & Weitz, 2004).

Figura 22. Gráfica 10M PP + 15%PL vs Tiempo - Ph7 Neutra, Ph4 Ácida y Ph2 Muy Ácida

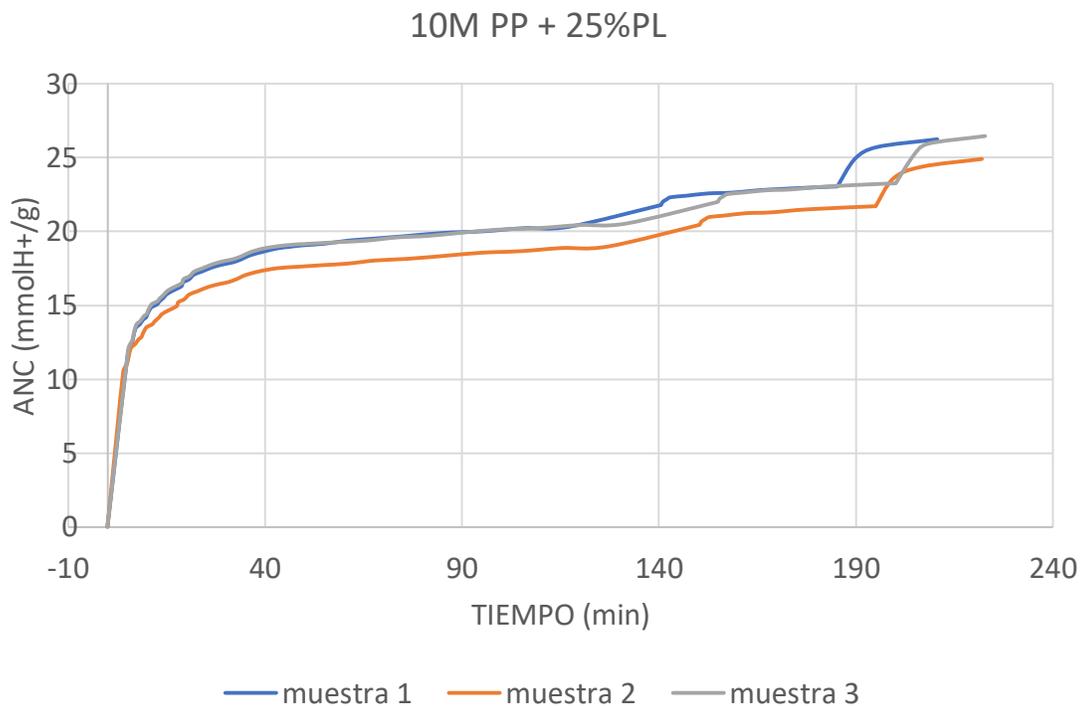


Un posible efecto de este comportamiento puede ser que variaciones en el proceso de preparación o curado del geopolímero hayan llevado a diferencias en la estructura y, por ende, en la reactividad frente al ácido. La muestra podría tener una composición diferente o una estructura reticulada única que afecta la interacción con el ácido nítrico. Por ejemplo, podría contener una mayor proporción de componentes que requieren más ácido para ser neutralizados (Wang et al., 2012). Este fenómeno es coherente con estudios que indican que la morfología y la composición de los materiales influyen significativamente en su comportamiento químico (Fischer et al., 2011).

4.3.5 10M PP + 25%PL

La figura que se presenta a continuación ilustra la variación del pH a lo largo del tiempo en un experimento específico. El pH, una medida de acidez o alcalinidad de una solución.

Figura 23. Gráfica 10M PP + 25%PL vs Tiempo - Ph7 Neutra, Ph4 Ácida y Ph2 Muy Ácida



Para alcanzar la neutralización a pH 7, se añadió un promedio de 21.41 mL de ácido nítrico. Este volumen fue significativamente mayor en comparación con el ácido añadido en los otros puntos de control. Este hallazgo sugiere que el geopolímero a pH 7 tenía una mayor capacidad de taponamiento que es la habilidad de una solución para resistir cambios en el pH cuando se añaden ácidos, o una mayor concentración de iones OH^- , requiriendo más ácido para neutralizarlo, el tiempo de neutralización para alcanzar pH 7 fue de 148 minutos, el cual es aproximadamente el doble del tiempo requerido para los otros puntos de control. Este tiempo prolongado podría reflejar la mayor resistencia del material en condiciones cercanas al pH neutro, donde la cantidad de ácido necesario para lograr un cambio de pH es mayor.

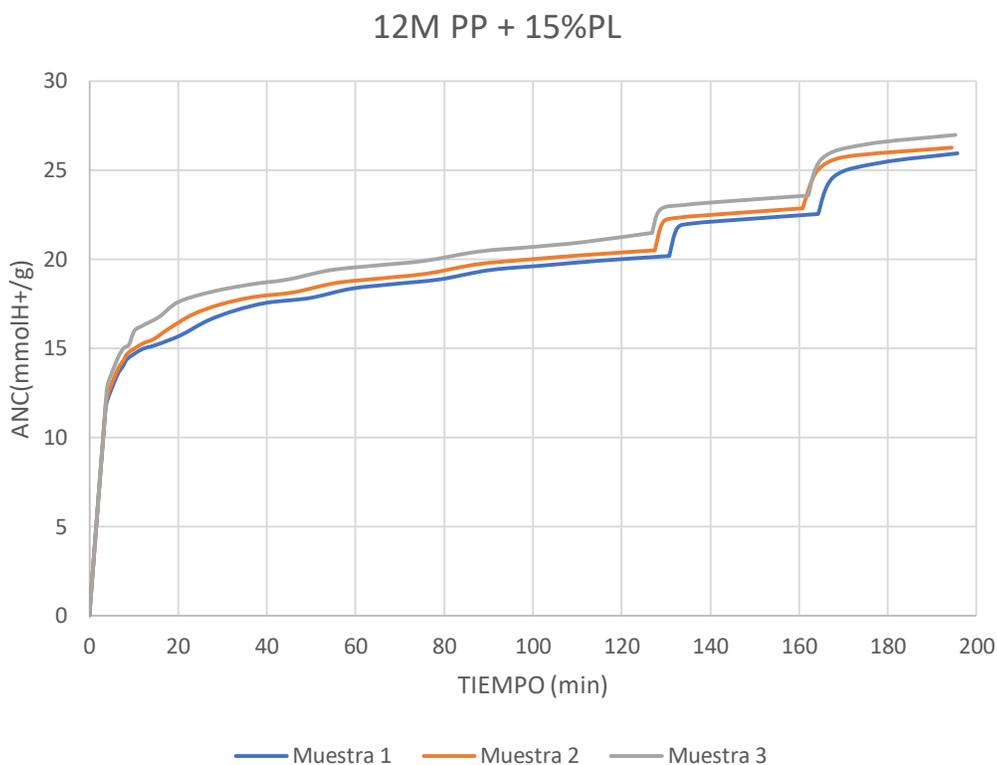
Los resultados indican que el geopolímero mostró una respuesta más lenta y una mayor cantidad de ácido necesario para neutralizarse en condiciones cercanas al pH neutro (pH 7) en

comparación con condiciones más ácidas (pH 4 y pH 2). Esto se debe probablemente a una mayor capacidad de neutralización de pH 7, donde se requieren mayores volúmenes de ácido para neutralizar la misma cantidad de iones OH⁻ presentes. La diferencia en el tiempo de neutralización también refleja la variabilidad en la tasa de reacción bajo diferentes condiciones de pH, con una neutralización más rápida en ambientes más ácidos. (Fernandez-Jimenez, A., & Palomo, A. 2005)

4.3.6 12M PP + 15%PL

Durante el ataque con ácido nítrico, las muestras de geopolímeros mostraron un comportamiento consistente en términos de tiempo y cantidad de iones H⁺ necesarios para la neutralización. Se observaron diferencias notables en la cantidad de ácido añadido y el tiempo requerido para alcanzar la neutralización en función del pH objetivo.

Figura 24. Gráfica 12M PP + 15%PL vs Tiempo - Ph7 Neutra, Ph4 Ácida y Ph2 Muy Ácida



Para alcanzar un pH de 7, se utilizó un promedio de 20.72 mL de ácido nítrico. Este volumen es considerablemente mayor en comparación con los volúmenes necesarios para alcanzar los puntos de control pH 4 y pH 2. La cantidad de ácido necesaria para pH 7 refleja una mayor concentración inicial de iones hidroxilo (OH^-) en la muestra, que requiere más ácido para neutralizarse, en relación al tiempo promedio requerido para alcanzar la neutralización a pH 7 fue de 128 minutos. Este tiempo es aproximadamente el doble del tiempo necesario para los otros niveles de pH, reflejando una mayor dificultad para ajustar el pH en condiciones cercanas a la neutralidad. La alta concentración de iones OH^- en la solución inicial a pH 7 implica una mayor capacidad de taponamiento, que resulta en un proceso de neutralización más lento.

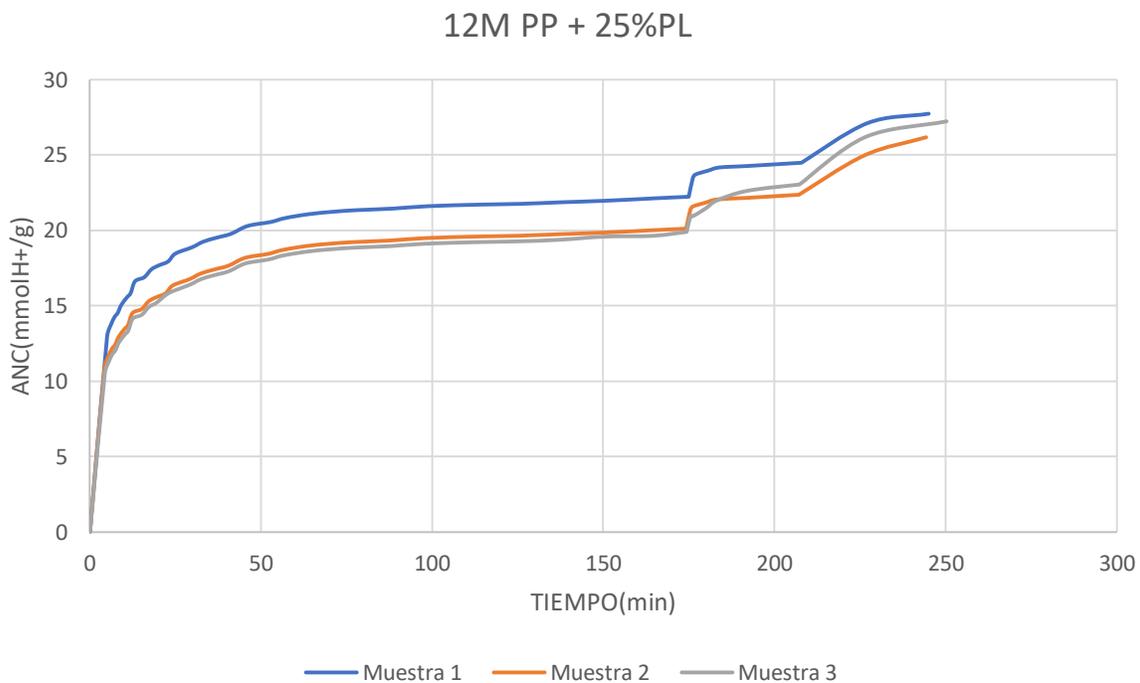
Para neutralizar las muestras hasta los niveles de pH 4 y pH 2, se utilizó un promedio de 5.68 mL de ácido nítrico. Esta cantidad es significativamente menor que la utilizada para pH 7,

indicando que menos ácido fue necesario para neutralizar la alcalinidad en estas soluciones más ácidas, el tiempo de neutralización promedio fue de 67 minutos. La menor duración de la neutralización en estos puntos indica que el ácido reaccionó más rápidamente con la base, alcanzando el equilibrio en un tiempo más corto.

4.3.7 12M PP + 25%PL

El análisis de las muestras de geopolímeros expuestas a ácido nítrico revela patrones distintos en cuanto a la cantidad de ácido necesario y el tiempo requerido para alcanzar la neutralización en diferentes niveles de pH. A continuación, la gráfica No. 25

Figura 25. Gráfica 12M PP + 25%PL vs Tiempo - Ph7 Neutra, Ph4 Ácida y Ph2 Muy Ácida



Para alcanzar un pH de 7, se requirió un promedio de 20.75 mL de ácido, con un tiempo de neutralización de 180 minutos. Este volumen es notablemente mayor en comparación con los otros puntos de control, donde se utilizó un promedio de solo 6.3 mL de ácido y el tiempo de neutralización fue de 72 minutos (Davidovits, 2013). Esta discrepancia sugiere que el sistema

presenta una mayor resistencia a la neutralización en condiciones cercanas al pH neutro, posiblemente debido a una mayor capacidad de taponamiento del material (Bakharev, 2005). La diferencia en la cantidad de ácido requerido y el tiempo de neutralización indica que, al intentar alcanzar un pH de 7, se enfrenta a interacciones químicas más complejas, lo que puede tener implicaciones significativas en la comprensión de la reactividad del geopolímero en diversas condiciones (Kumar et al., 2020).

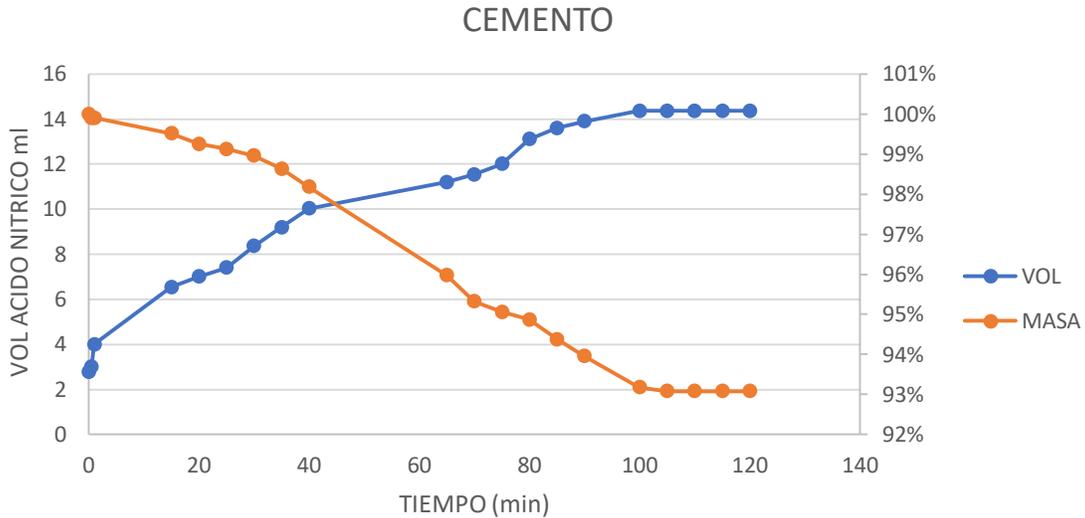
4.4 Pérdida de Masa en Probetas Prismáticas.

La pérdida de masa en probetas prismáticas, particularmente cuando se someten a condiciones de ataque ácido, es una medida importante para evaluar la durabilidad y la resistencia del concreto en entornos agresivos.

4.4.1 *Cemento*

La figura 26, ilustra cómo el volumen de ácido nítrico añadido afecta la masa residual de las probetas de cemento Portland. Se observa que, con un aumento en la cantidad de ácido añadido, la masa residual de las probetas disminuye. Este fenómeno indica que una mayor concentración de ácido provoca una mayor pérdida de masa en el cemento Portland.

Figura 26. Gráfica de pérdida de masa - Cemento vs Tiempo



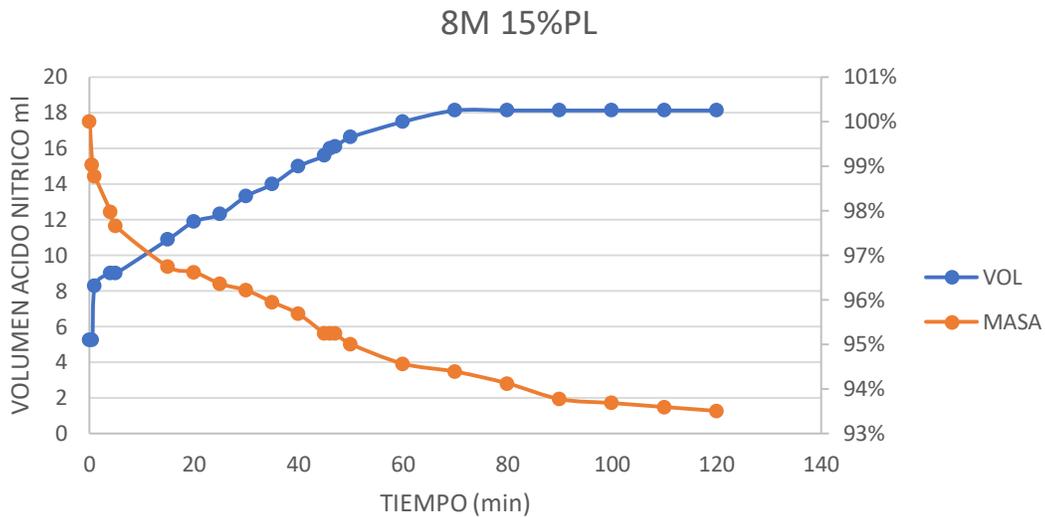
La pérdida de masa promedio registrada es del 6.92%. Esta pérdida corresponde a la adición de 14.37 mL de ácido nítrico durante un período de 120 horas, manteniendo el pH de la solución en pH 2. Esta significativa pérdida de masa refleja el impacto corrosivo del ácido nítrico sobre el cemento Portland, descomponiendo y disolviendo componentes del material.

Se puede analizar en la gráfica No. 27 que después de aproximadamente 100 horas de exposición al ácido nítrico, la masa y el volumen de las probetas de cemento Portland se estabilizan.

4.4.2 8M PP + 15%PL

La figura 27 muestra que, a medida que aumenta el volumen de ácido nítrico añadido, la masa residual de las probetas de geopolímero disminuye.

Figura 27. Gráfica de pérdida de masa - 8M PP + 15%PL vs Tiempo



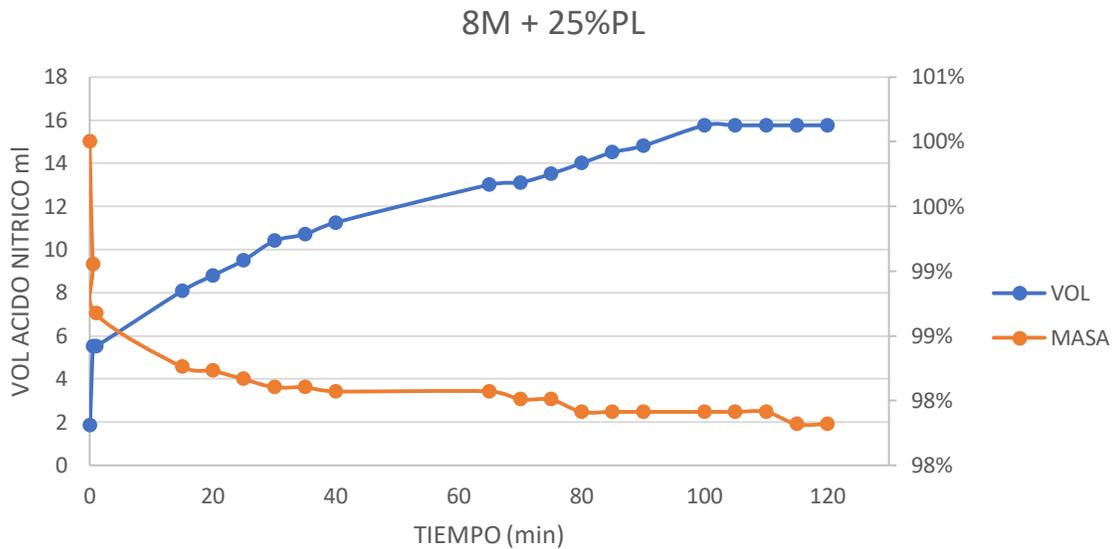
La pérdida de masa promedio observada es del 6.50%. Esto se relaciona con la adición de 18.13 mL de ácido nítrico durante un período de 120 horas, manteniendo el pH de la solución en pH 2. La pérdida de masa refleja el impacto corrosivo del ácido nítrico sobre el geopolímero, sugiriendo que el ácido está disolviendo componentes del material.

La pérdida de masa en las probetas de geopolímero aumenta con la cantidad de ácido nítrico añadido, lo que indica el efecto corrosivo del ácido sobre el material. Sin embargo, después de aproximadamente 100 horas, la masa y el volumen se estabilizan. (Lothenbach, B., & Scrivener, K. 2008).

4.4.3 8M PP + 25%PL

A continuación, se presenta la gráfica de pérdida de masa vs tiempo en geopolímeros.

Figura 28. Gráfica de pérdida de masa - 8M PP + 25%PL vs Tiempo



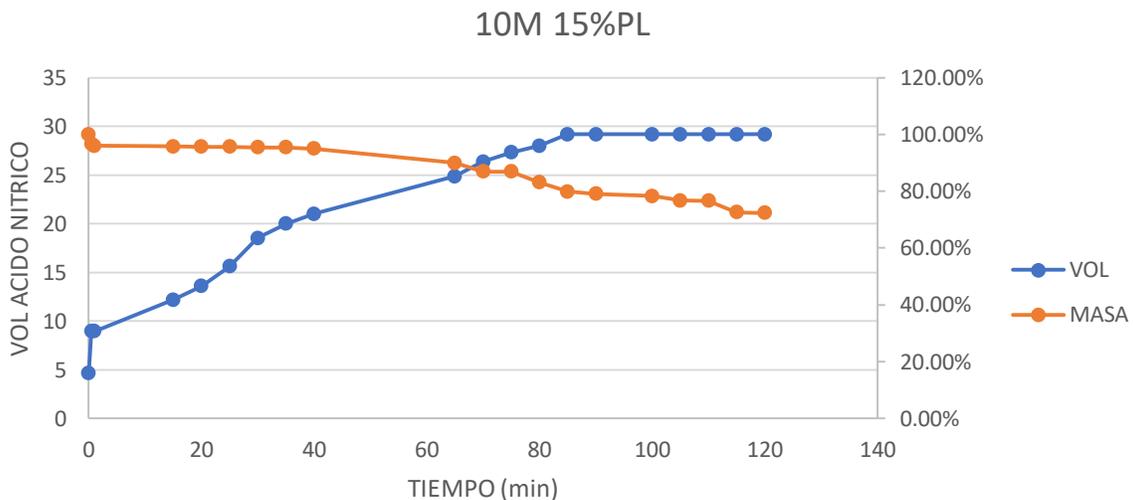
En el experimento realizado, se añadió un total de 10.14 ml de ácido nítrico a las probetas, manteniendo un pH de 2 durante 120 horas. Bajo estas condiciones, la pérdida de masa promedio observada en las probetas fue del 2.18%. Esta pérdida de masa sugiere que la probeta experimenta una corrosión significativa debido a la alta concentración de ácido y el prolongado tiempo de exposición.

El resultado obtenido confirma que la corrosión de las probetas aumenta con la concentración del ácido nítrico. Un pH de 2 indica un entorno altamente ácido, que facilita la disolución y ataque corrosivo sobre las probetas metálicas. La pérdida de masa promedio del 2.18% refleja la alta reactividad del ácido con el material de las probetas en las condiciones experimentales establecidas. La relación observada entre el volumen de ácido y la pérdida de masa es consistente con la teoría de corrosión, donde una mayor concentración de ácido acelera el proceso corrosivo.

4.4.4 10M PP + 15%PL

El ensayo evaluó el efecto de la concentración de ácido nítrico sobre la pérdida de masa en las probetas. Los resultados mostraron que, al aumentar el volumen de ácido añadido, la masa residual de las probetas disminuye.

Figura 29. Gráfica de pérdida de masa - 10M PP + 15%PL vs Tiempo



La figura 29 muestra una relación inversamente proporcional entre el volumen de ácido nítrico añadido y la masa residual de los geopolímeros. A medida que se incrementa la concentración de ácido, la pérdida de masa de los geopolímeros aumenta, sugiriendo que el ácido nítrico contribuye significativamente a la disolución y degradación del material.

La presente gráfica ilustra la relación entre la pérdida de masa y el tiempo, evidenciando un descenso promedio del 27.70% en un periodo de 120 horas, al someter geopolímeros a una solución de 29.18 unidades de ácido con un pH de 2. Este notable comportamiento resalta la sensibilidad de los geopolímeros a la corrosión ácida, una característica coherente con sus propiedades químicas. La exposición a ácidos fuertes puede alterar significativamente la estructura de estos materiales, resultando en una mayor disolución. Estos hallazgos, respaldados

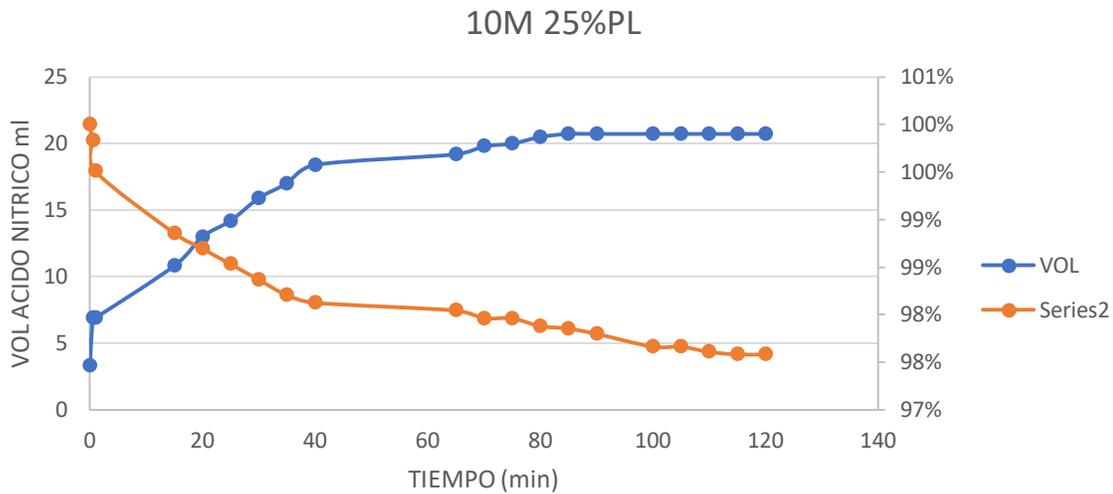
por la investigación de Khan y Mujtaba (2020), son cruciales para entender el comportamiento de los geopolímeros en entornos agresivos y su potencial aplicación en la construcción y la ingeniería.

4.4.5 10M PP + 25%PL

El análisis de la influencia de la concentración de ácido nítrico en la pérdida de masa de geopolímeros muestra que, al incrementar el volumen de ácido añadido, la masa residual de las probetas disminuye. En particular, con una cantidad de ácido nítrico de 11.93 ml añadidas durante 120 horas y manteniendo el pH en 2, se registró una pérdida de masa promedio del 2.42%. Estos resultados sugieren que una mayor concentración de ácido nítrico conduce a una mayor degradación del geopolímero.

A continuación, la figura 30 de pérdida de masa vs tiempo de las 3 probetas de geopolímero:

Figura 30. Gráfica de pérdida de masa – 10M PP + 25%PL vs Tiempo

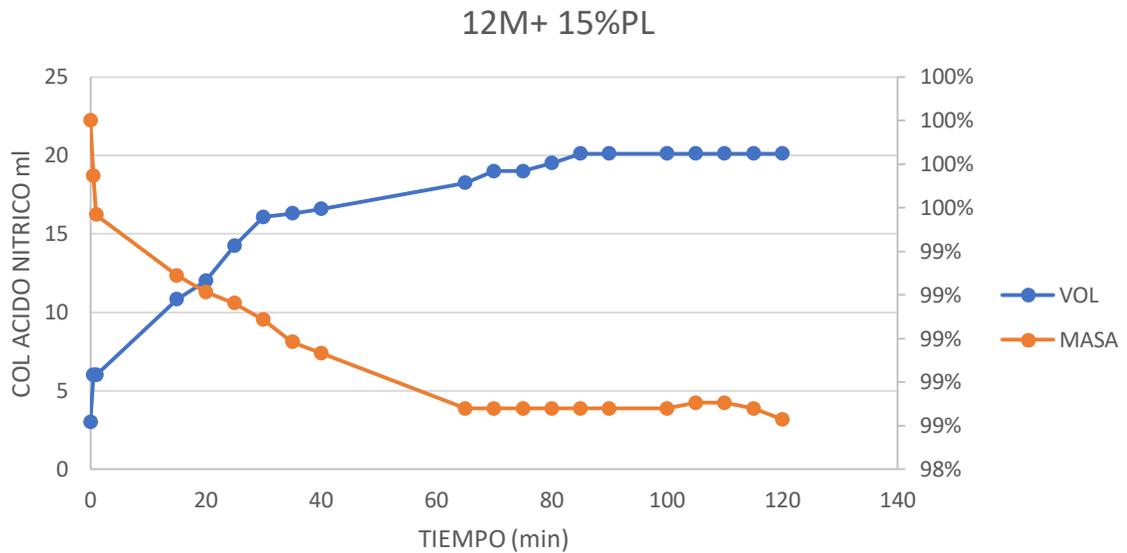


La figura. 30 evidencia una relación directa entre el volumen de ácido nítrico añadido y la disminución de la masa residual de los geopolímeros. La pérdida de masa promedio del 2.42% con 11.93 unidades de ácido y un pH constante de 2 durante 120 horas indica que la presencia de ácido nítrico causa una corrosión notable en los geopolímeros, aunque el porcentaje de pérdida observado es relativamente bajo comparado con otros materiales más susceptibles a la corrosión ácida.

4.4.6 12M PP + 15%PL

El estudio evaluó el impacto del ácido nítrico en la pérdida de masa de probetas de geopolímero. La figura ilustra que, al aumentar el volumen de ácido añadido, la masa residual de las probetas disminuye. En particular, con una cantidad de ácido nítrico de 20.12 unidades añadidas durante 120 horas y manteniendo el pH en 2, se observó una pérdida de masa promedio del 1.37%. Estos resultados indican que una mayor concentración de ácido nítrico provoca una mayor pérdida de masa en las probetas que a continuación se representa en la figura 31:

Figura 31. Gráfica de pérdida de masa - 12M PP + 15%PL vs Tiempo

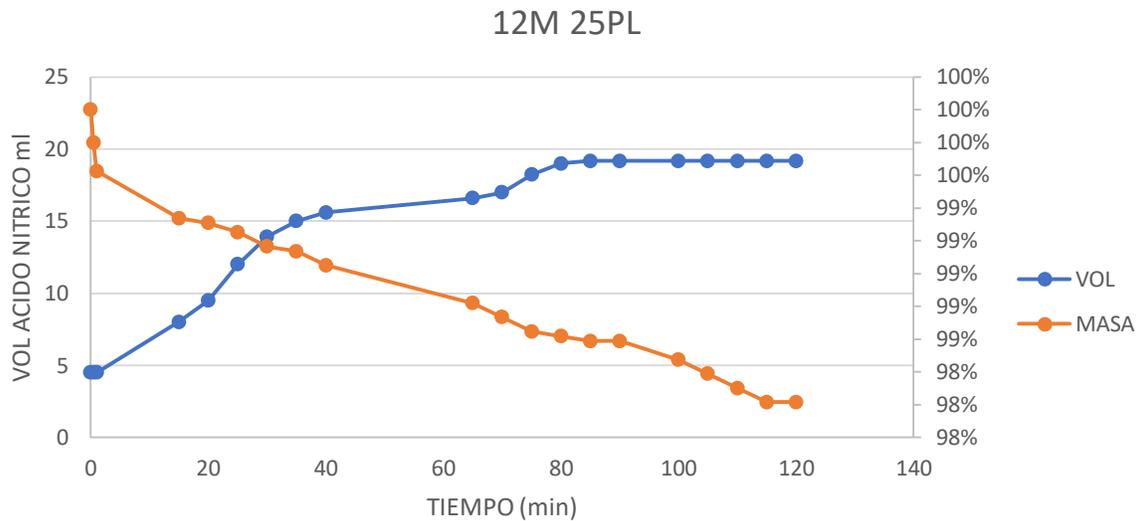


La figura 31 muestra que a medida que aumenta el volumen de ácido añadido, la masa residual de las probetas disminuye. Esto indica que una mayor concentración de ácido lleva a una mayor pérdida de masa en las probetas. La pérdida de masa promedio es de 1.37% con una cantidad de ácido nítrico añadido durante 120h fue 20.12 manteniendo la neutralización a un pH2.

4.4.7 12M PP + 25%PL

El análisis muestra que, al incrementar el volumen de ácido nítrico añadido, la masa residual de las probetas de geopolímero disminuye. Específicamente, con 20.12 unidades de ácido nítrico aplicadas durante 120 horas y manteniendo un pH de 2, la pérdida de masa promedio observada fue del 1.37%. Esto indica que una mayor concentración de ácido conduce a una mayor pérdida de masa en las probetas.

Figura 32. Gráfica de pérdida de masa - 12M PP + 25%PL vs Tiempo



La figura 32 revela una relación directa entre la cantidad de ácido nítrico añadido y la reducción en la masa residual de las probetas de geopolímero. Con una pérdida de masa promedio del 1.37% al utilizar 20.12 unidades de ácido y un pH de 2 durante 120 horas, se confirma que el ácido nítrico afecta la integridad del geopolímero, aunque la pérdida de masa es relativamente baja.

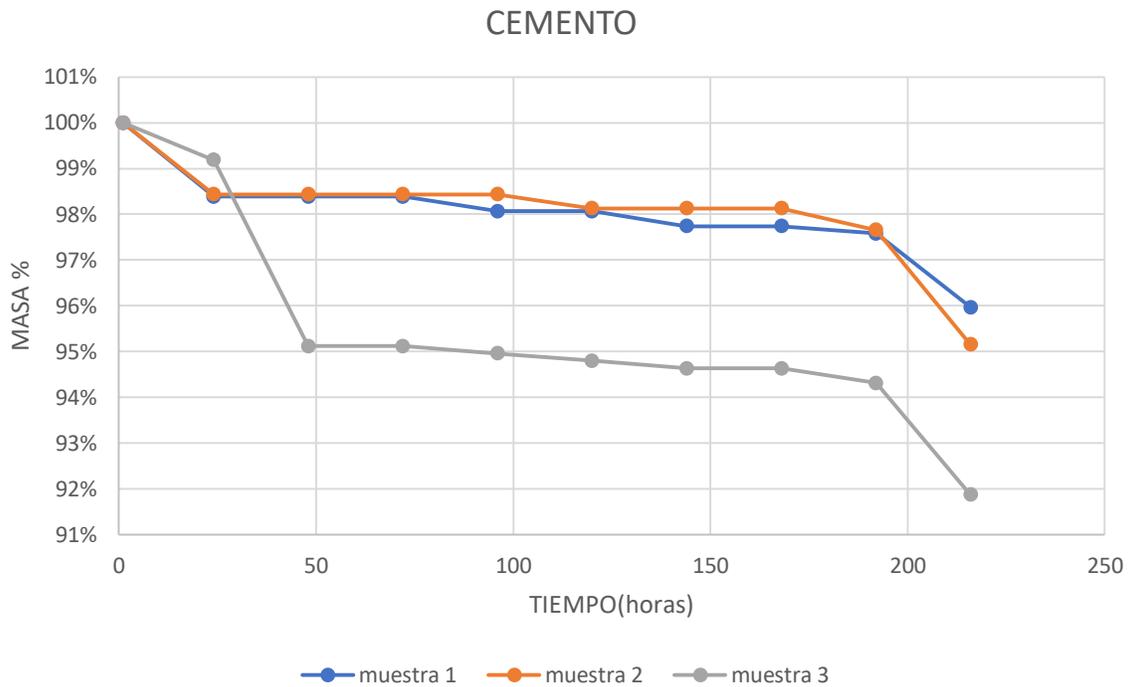
4.5 Pérdida de Masa en Probetas Sumergidas en Condiciones de Acidez Extrema

Este apartado del ensayo se centra en la evaluación de la resistencia de los geopolímeros frente al ataque ácido al exponer probetas a condiciones de acidez extrema. A través de la inmersión en ácido nítrico.

4.5.1 Cemento

La gráfica a continuación ilustra la pérdida de masa de probetas de cemento Portland cuando se exponen a condiciones de acidez extrema. En el estudio, el cemento Portland fue sumergido en una solución de ácido nítrico.

Figura 33. Gráfica de pérdida de masa en condiciones de acidez extrema - Cemento vs Tiempo



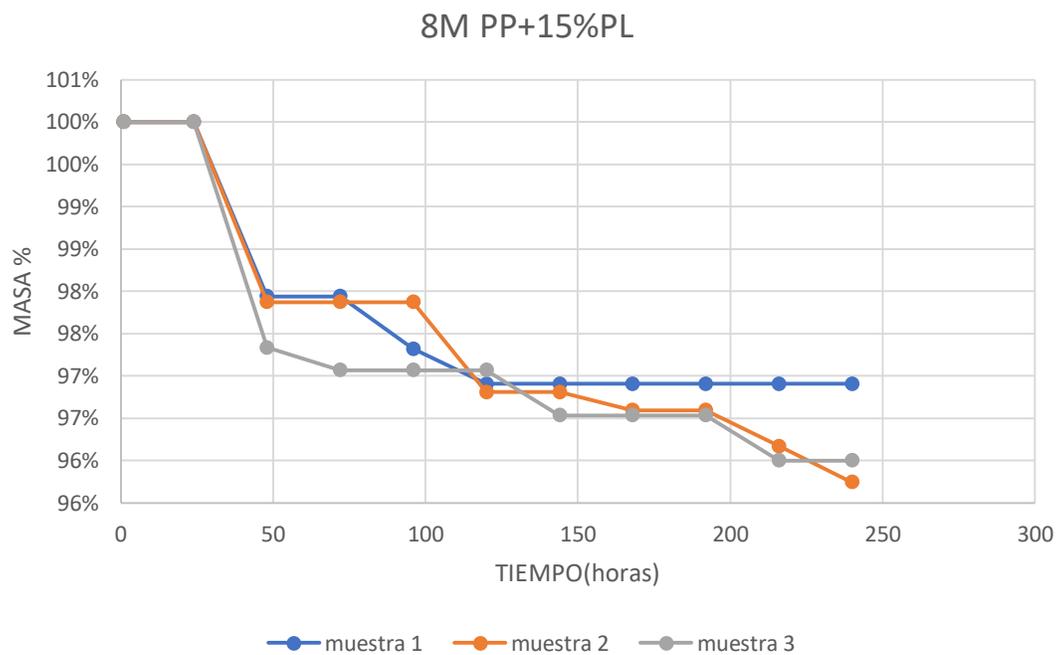
Al inicio del ensayo, las probetas de cemento Portland expuestas a condiciones de acidez extrema muestran una reacción de desgaste significativa en los primeros minutos. Esta rápida pérdida de masa indica que el cemento es especialmente vulnerable al ataque ácido.

Del mismo modo se puede observar en la figura 33, que a medida que el tiempo avanza la masa disminuye en las 3 muestras, corroborando de esta manera que la tendencia es similar en todas las muestras de cemento, y que puede existir una variación por diferentes agentes presentes al momento de elaborar la muestra, de compactar o incluso en el curado.

4.5.2 8M PP + 15%PL

La siguiente gráfica compara la pérdida de masa de probetas de geopolímeros cuando se exponen a condiciones de acidez extrema.

Figura 34. Gráfica de pérdida de masa en condiciones de acidez extrema – 8M PP + 15%PL vs Tiempo



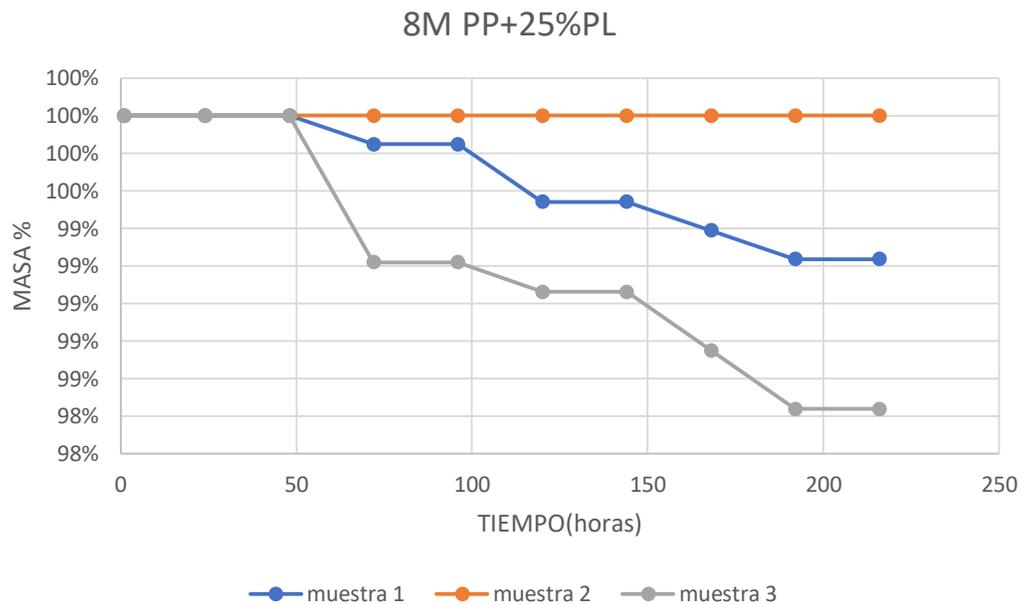
La figura 34 muestra la pérdida de masa de probetas de geopolímeros expuestas a condiciones de acidez extrema, específicamente en una solución de ácido nítrico. Los resultados indican que los geopolímeros presentan una notable resistencia al ataque ácido, con una pérdida de masa que no supera el 5% en 10 días de exposición al ácido. El uso de polvo de ladrillo como precursor en la elaboración de geopolímeros puede influir significativamente en esta resistencia. Sin embargo, dado que muchos ladrillos son producidos de manera artesanal, puede haber una variabilidad considerable en sus características, como la porosidad y la densidad. Esta falta de uniformidad puede afectar la calidad del polvo de ladrillo utilizado y, por ende, la capacidad del

geopolímero para formar una capa protectora efectiva durante la exposición al ácido. Ladrillos más homogéneos, obtenidos de procesos más controlados, pueden contribuir a mejores propiedades en los geopolímeros, subrayando la importancia de la calidad del material de partida. Este fenómeno ha sido observado en otros materiales, donde la formación de una película pasiva reduce significativamente la tasa de corrosión y mejora la durabilidad en condiciones agresivas (Khan et al., 2017; Zhang et al., 2018).

4.5.3 8M PP + 25%PL

La gráfica a continuación presenta los resultados del estudio sobre la pérdida de masa de probetas de geopolímeros sometidas a condiciones de acidez extrema.

Figura 35. Gráfica de pérdida de masa en condiciones de acidez extrema – 8M PP + 25%PL vs Tiempo



La figura 35 muestra la pérdida de masa de probetas de geopolímeros expuestas a condiciones de acidez extrema, en una solución de ácido nítrico. Los resultados obtenidos

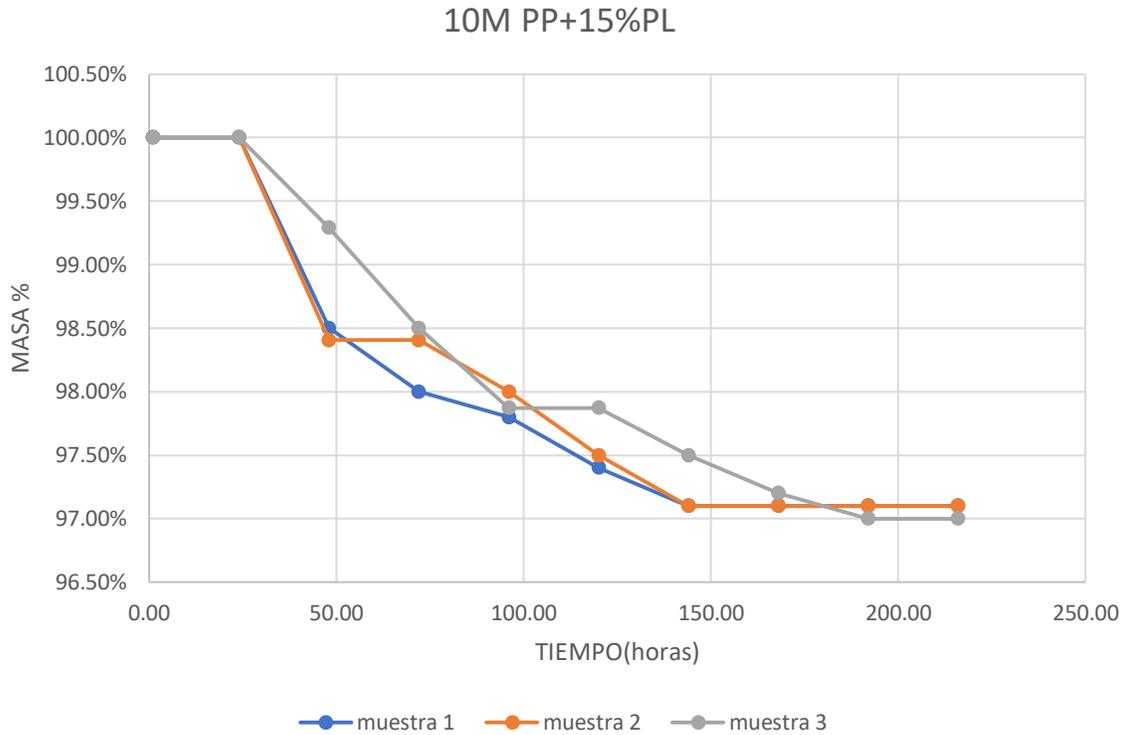
indican que los geopolímeros son altamente resistentes al ataque ácido, con una pérdida de masa promedio de solo 0.78% después de 200 horas de exposición. Este bajo nivel de desgaste resalta la capacidad de los geopolímeros para mantener su integridad estructural en condiciones ácidas severas. La estructura química estable, caracterizada por una red tridimensional de aluminosilicatos, contribuye significativamente a la resistencia del geopolímero. Asimismo, se observa que la probeta de color naranja no experimenta pérdida de masa, lo que podría deberse a la formación de una capa pasiva que protege el material subyacente tras la exposición inicial al ácido. Este fenómeno es común en materiales expuestos a ambientes agresivos, donde la formación de una película pasiva puede mejorar significativamente la durabilidad y resistencia a la corrosión (Khan & Khan, 2017).

Además, es posible que la composición del polvo de ladrillo artesanal utilizado en la probeta naranja contribuya a esta protección, ya que su interacción con el ácido podría haber generado productos de reacción que actúan como barrera.

4.5.4 10M PP + 15%PL

La gráfica presentada a continuación ofrece una visión detallada del comportamiento de las muestras de geopolímeros cuando se exponen a condiciones de acidez extrema. Este análisis es fundamental para evaluar la capacidad de los geopolímeros para mantener su integridad y funcionalidad en ambientes altamente corrosivos.

Figura 36. Gráfica de pérdida de masa en condiciones de acidez extrema – 10M PP + 15%PL vs Tiempo

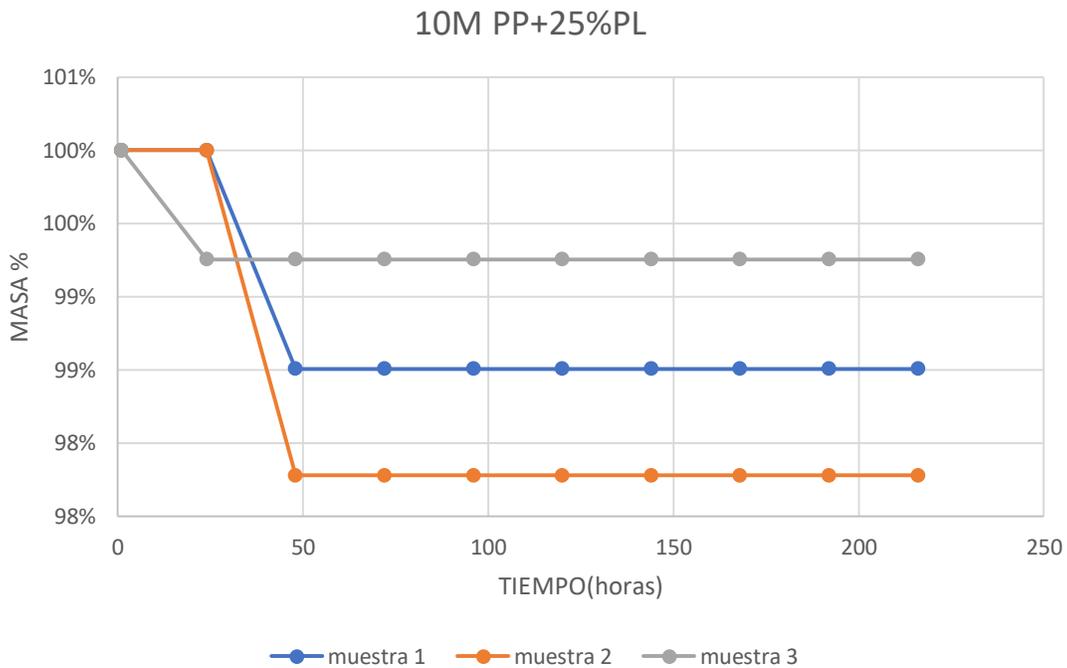


En particular, la figura 36 muestra que las muestras de geopolímeros exhiben una resistencia notable al desgaste, con una pérdida de masa que no supera el 5% en las primeras horas de exposición. Este resultado es indicativo de una durabilidad sobresaliente y un buen desempeño del geopolímero frente a condiciones ácidas severas. La estructura química estable de los geopolímeros, compuesta por una red tridimensional de aluminosilicatos, contribuye significativamente a su capacidad para resistir la disolución en medios ácidos. Además, la porosidad de los geopolímeros juega un papel crucial; una menor porosidad implica una menor infiltración del ácido, lo que a su vez reduce el riesgo de desgaste. Esto convierte a los geopolímeros en una opción preferible para aplicaciones en entornos corrosivos, donde la integridad del material es esencial (Davidovits, 1994; Provis & van Deventer, 2009).

4.5.5 10M PP + 25%PL

La gráfica a continuación ilustra el desgaste de una muestra de geopolímero expuesta a condiciones de acidez extrema. El propósito de este análisis es evaluar la durabilidad del geopolímero en un entorno altamente corrosivo y entender su comportamiento en comparación con otros materiales bajo similares condiciones.

Figura 37. Gráfica de pérdida de masa en condiciones de acidez extrema – 10M PP + 25%PL vs Tiempo



Se observa que el desgaste de la muestra en las primeras horas de exposición no supera el 97%, lo que indica una pérdida inicial de masa relativamente baja. Este comportamiento es notable en el contexto de ambientes ácidos severos, ya que sugiere que el geopolímero mantiene una buena resistencia a la corrosión en el corto plazo.

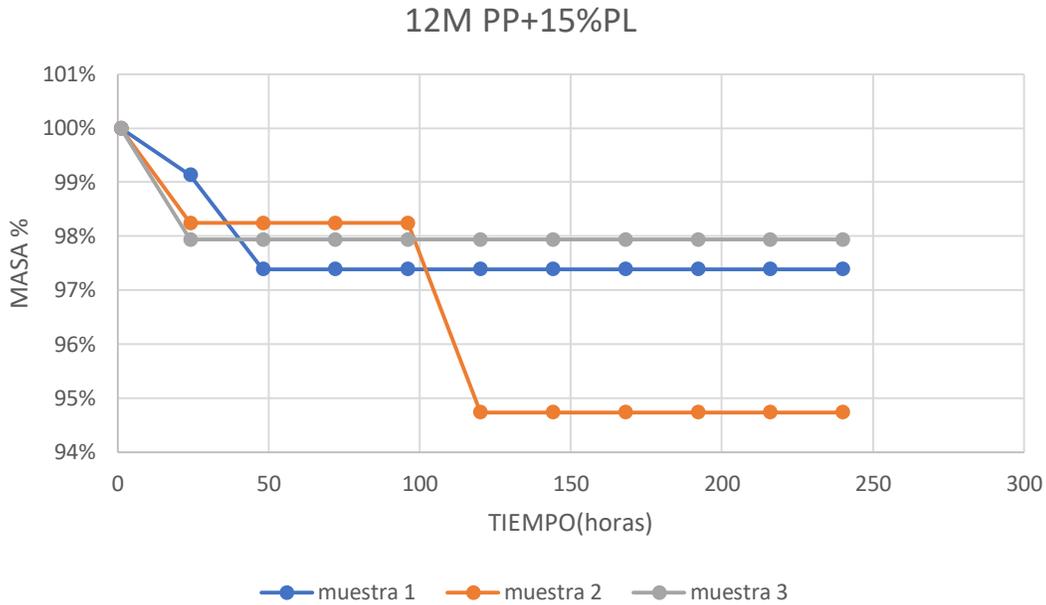
La gráfica 37, revela que, tras el período inicial de exposición, el desgaste se estabiliza y se mantiene constante. Este patrón sugiere que, después de una rápida disolución de los componentes más solubles o una reacción inicial con el ácido, el geopolímero alcanza un estado de equilibrio donde la tasa de desgaste se nivela. Esta información es valiosa para comprender la eficacia del geopolímero en mantener su integridad estructural a lo largo del tiempo en condiciones ácidas extremas. (Nguyen, T. H., & Lee, S. A. 2023).

Así mismo en la gráfica 40 se observa que la muestra 3, de color gris, presenta una pérdida de masa que no supera el 99%, lo que indica una mejor resistencia al ácido nítrico en comparación con las otras dos probetas. Además, el uso de polvo de ladrillo artesanal en la formulación de esta muestra podría haber contribuido en la variación entre probetas por lo que se presume que afectó de manera positiva para mejorar la resistencia. (Nguyen, T. H., & Lee, S. A., 2023).

4.5.6 12M PP + 15%PL

La gráfica presentada ilustra el desgaste del geopolímero bajo condiciones de acidez extrema a lo largo del tiempo. Los datos muestran que, en las primeras horas de exposición, el desgaste de masa del geopolímero no supera el 94%. Esta observación indica que el geopolímero experimenta una pérdida inicial de masa relativamente baja en comparación con otros materiales en condiciones ácidas.

Figura 38. Gráfica de pérdida de masa en condiciones de acidez extrema – 12M PP + 15%PL vs Tiempo



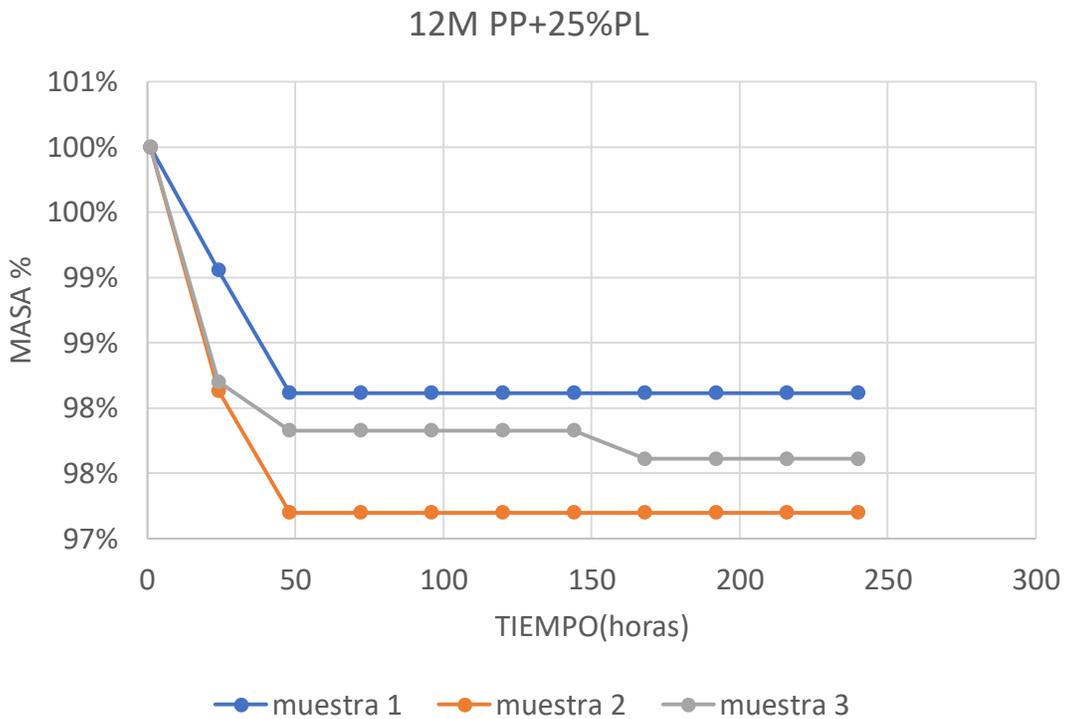
En la gráfica, se puede apreciar que el desgaste se mantiene constante después de este período inicial. Este comportamiento es particularmente interesante, ya que sugiere que, tras una fase inicial de disolución o reacción con el ácido, el geopolímero alcanza un estado de estabilidad en el cual la tasa de desgaste se nivela.

En la figura 38, se observa que la muestra 2, representada en color tomate, presenta un comportamiento distinto. Es fundamental destacar que la porosidad de esta muestra puede influir significativamente en su rendimiento. Una alta porosidad, baja densidad y el tamaño de las partículas permite una mayor infiltración del ácido, lo que acelera el desgaste en comparación con muestras menos porosas. Además, la uniformidad del polvo de ladrillo artesanal utilizado en esta muestra, por sus características, puede afectar su comportamiento, ya que una distribución homogénea de partículas contribuye a una estructura más densa, mejorando así la resistencia bajo condiciones de acidez extrema (Davidovits, 1994; Provis & van Deventer, 2009).

4.5.7 12M PP + 25%PL

La gráfica a continuación ilustra el desgaste del geopolímero cuando se expone a condiciones de acidez extrema a lo largo del tiempo. Este análisis es crucial para entender la durabilidad del geopolímero en entornos corrosivos, ya que proporciona una visión detallada de su comportamiento frente a un agente ácido.

Figura 39. Gráfica de pérdida de masa en condiciones de acidez extrema – 12M PP + 25%PL vs Tiempo



La figura 39, muestra el comportamiento del geopolímero bajo condiciones de acidez extrema en función del tiempo. Se observa que el desgaste en las primeras horas no supera el 94%, indicando una pérdida inicial de masa relativamente baja en comparación con otros materiales expuestos a condiciones similares. Este resultado sugiere que el geopolímero mantiene una notable estabilidad en el corto plazo frente al ataque ácido.

La gráfica revela que, tras el período inicial de exposición, el desgaste se mantiene constante. Esta tendencia es significativa, ya que implica que el geopolímero alcanza un estado de equilibrio donde la tasa de desgaste se estabiliza. La pérdida de masa inicial, que no supera el 97%, puede ser atribuida a la rápida disolución de los componentes más solubles del geopolímero o a la reacción inicial con el ácido.

Este comportamiento destaca la capacidad del geopolímero para resistir la corrosión ácida en comparación con otros materiales, mostrando una resistencia prolongada una vez pasada la fase de disolución inicial. La gráfica proporciona información valiosa sobre la durabilidad del geopolímero en ambientes ácidos extremos, evidenciando su potencial para aplicaciones en condiciones corrosivas severas.

4.6 Discusión

4.6.1 Comparación de los diagramas de pH combinado en matrices de cemento Portland y geopoliméricas.

A continuación, se presenta una comparación general mediante la gráfica realizada en esta investigación la cual permite tener una idea más clara del comportamiento de las probetas realizadas.

Figura 40. Comparación general de todas las gráficas resultantes en la investigación

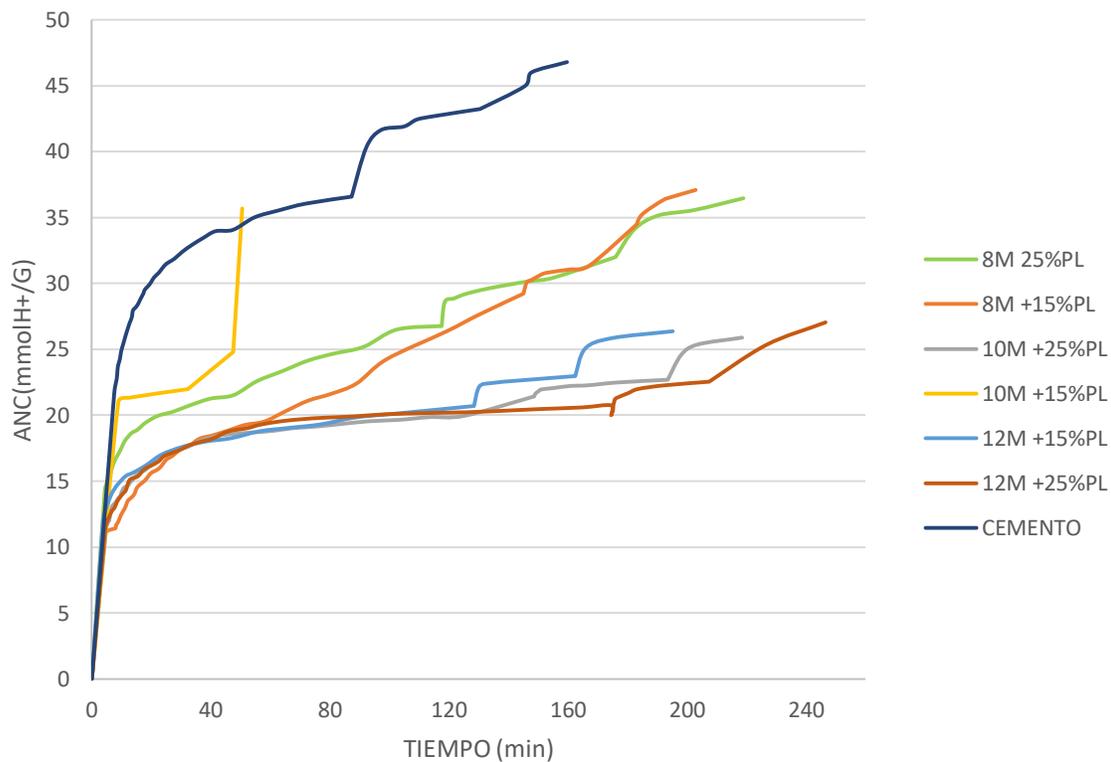


Tabla 9.*Resultados de las probetas de cemento y geopolímero*

MUESTRA	PH2			PH4			PH7		
	ANC (mmolh +/g)	PROME DIO	DESVIAC IÓN ESTAND AR	ANC (mmolh +/g)	PROME DIO	DESVIAC IÓN ESTAND AR	ANC (mmolh +/g)	PROME DIO	DESVIAC IÓN ESTAND AR
CEMENTO	44.33			40.66			33.80		
	47.37	46.81	2.25	43.49	43.25	2.47	36.94	36.59	2.64
	48.73			45.59			39.04		
8M+15% PL	36.52			33.90			28.66		
	36.68	37.06	0.81	32.50	33.92	1.44	28.82	29.20	0.81
	37.99			35.37			30.13		
8M+25% PL	35.89			31.44			26.20		
	37.0	36.44	0.61	32.65	31.98	0.61	27.41	26.74	0.61
	36.31			31.86			26.62		
10M+15 %PL	31.70			25.41			22.48		
	41.89	35.71	5.43	24.91	24.81	0.66	22.53	21.99	0.89
	33.54			24.10			20.96		
10M+25 %PL	26.25			23.06			21.80		
	24.89	25.87	0.85	21.69	22.67	0.85	20.44	21.41	0.85
	26.46			23.27			22.01		
12M+15 %PL	25.94			22.53			20.17		
	26.25	26.39	0.54	22.85	22.99	0.54	20.49	20.72	0.68
	26.99			23.85			21.48		
12M+25 %PL	27.72			24.47			22.22		
	26.20	27.06	0.78	22.39	23.30	1.06	20.13	20.75	1.27
	27.25			23.06			19.91		

Como se ve en los resultados la muestra de cemento Portland se requiere mayor cantidad de ácido nítrico para la neutralización de pH, siendo lo necesario para un pH 7 de 36.59, pH 4 43.25 y pH 2 46.81, esto podría ser debido a la cantidad de portlandita en su composición, el hidróxido de calcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) reacciona con los iones hidrógeno (H^+) del ácido, esta reacción neutraliza el efecto alcalino del hidróxido de calcio, disminuyendo el pH de la solución. Al

reaccionar con el ácido, la base fuerte se consume, lo que lleva a una reducción en la alcalinidad del sistema y, por lo tanto, a una disminución del pH, con pH 7 (neutro), se requiere una cantidad mayor de ácido para neutralizar la portlandita, ya que el pH inicial es más alto debido a la presencia de la base fuerte. Esto significa que el ácido debe neutralizar una mayor cantidad de portlandita antes de que el pH del sistema se estabilice. En contraste, en condiciones más ácidas (pH 4 y 2), la concentración de iones H^+ es mayor, lo que lleva a una reacción más rápida y a una estabilización del pH en un tiempo más corto. Mehta, P.K., & Monteiro, P.J.M. (2014).

La muestra 10M PP + 15 % PL presenta un comportamiento atípico entre los geopolímeros, mostrando valores significativamente bajos que incluso los de la muestra de cemento. Una posible causa de este rendimiento deficiente podría estar relacionada con el proceso de curado. Las muestras no fueron sometidas a un curado controlado en condiciones óptimas, ya que se utilizaron hornos convencionales de laboratorio de suelos. Esta falta de control riguroso en la temperatura y la humedad durante el curado podría haber afectado negativamente la reacción de polimerización, resultando en una microestructura menos densa y, por ende, en una menor resistencia.

Es fundamental considerar que un curado adecuado es crucial para desarrollar las propiedades mecánicas y químicas deseadas en los geopolímeros. La variabilidad en las condiciones del curado puede dar lugar a diferencias significativas en el comportamiento del material, lo que resalta la importancia de estandarizar este proceso en futuras investigaciones (Davidovits, 1994; Provis & van Deventer, 2009).

4.6.2 Comparación general de todas las gráficas de pérdida de masa con ph controlada

Las gráficas a continuación presentan los resultados del estudio sobre la resistencia de los geopolímeros al ataque ácido, ilustrando la relación entre el volumen de ácido nítrico añadido y la pérdida de masa de las probetas.

Figura 41. Comparación general de todas las gráficas resultantes en la investigación

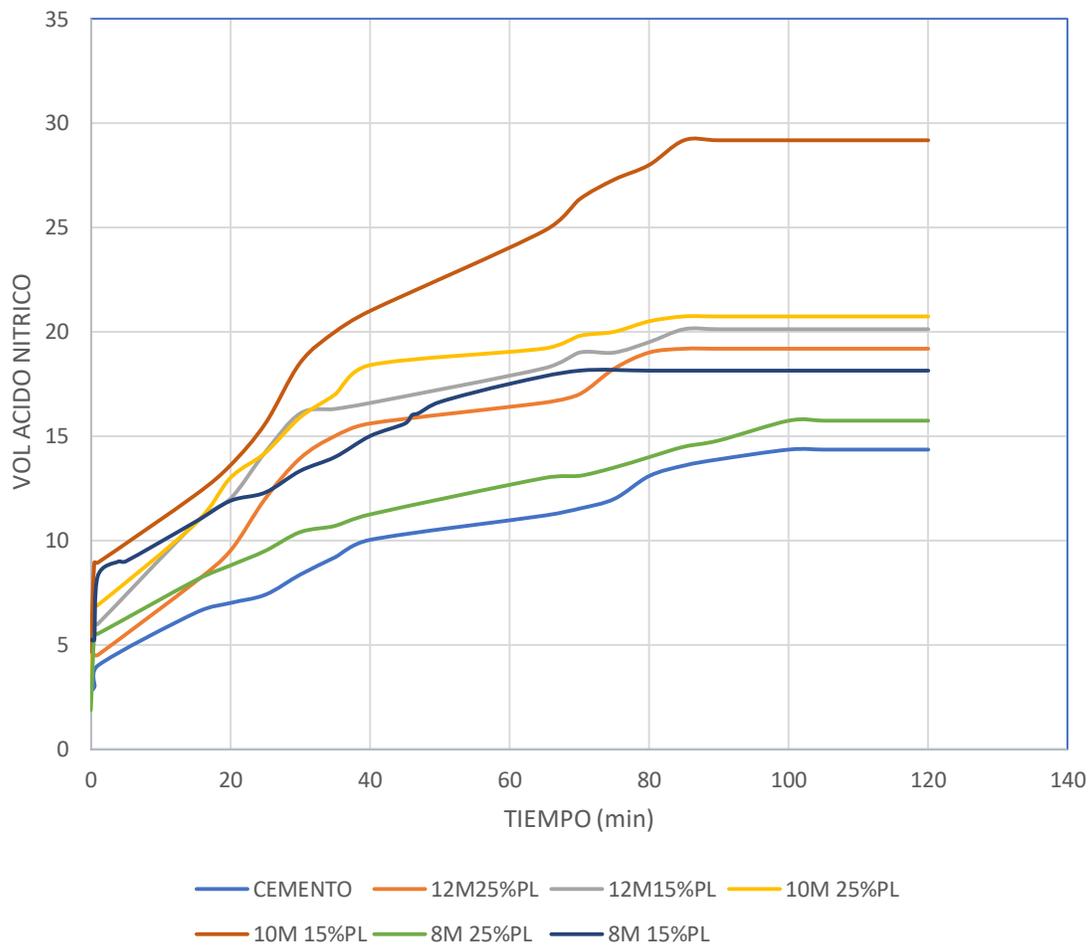
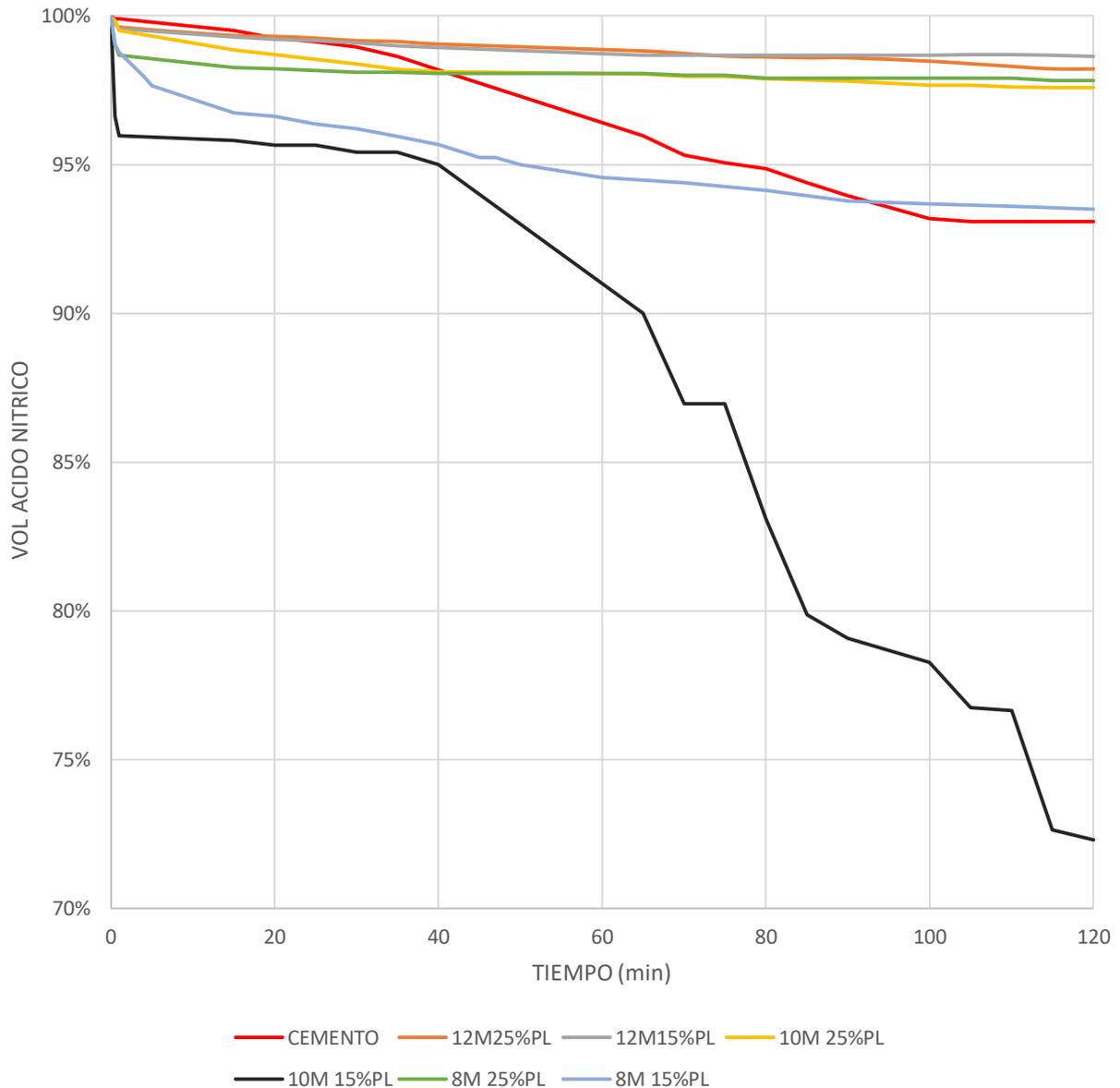


Figura 42. Comparación general de todas las gráficas resultantes en la investigación



En general, los geopolímeros tienden a mostrar una mayor resistencia al ataque ácido en comparación con el concreto de cemento Portland. Esto se debe a la naturaleza química diferente de los geopolímeros. A diferencia del cemento Portland, que está compuesto principalmente de silicato de calcio, los geopolímeros se basan en una matriz aluminosilicatada que suele ser menos susceptible a la disolución ácida. (J. Davidovits, 2008).

La muestra de geopolímero 10M PP+15%PL que muestra un comportamiento de pérdida de masa bajo ataque ácido podría ser un caso atípico. Esto sugiere que esta muestra en particular tiene características o propiedades que la hacen más vulnerable a la disolución ácida, la razón por la que esta muestra se comporta de manera inusual podría deberse a problemas durante el curado de las probetas. El curado es crucial para el desarrollo de las propiedades finales del geopolímero. Un curado inadecuado puede llevar a una formación incompleta o deficiente de la matriz geopolimérica, afectando su resistencia química. La anomalía en la muestra 10M PP+15%PL podría deberse a un cambio en las condiciones químicas o estructurales internas del geopolímero, que podría haber sido provocado por el problema en el curado. Si la estructura no se desarrolla adecuadamente, el material podría ser menos resistente a los ataques ácidos. Generalmente, los geopolímeros tienen una mejor resistencia al ataque ácido que el cemento Portland, lo que los hace más duraderos en ambientes agresivos.

Para proporcionar una perspectiva cuantitativa, estudios previos han demostrado que el cemento Portland puede perder 6.92% de su masa en condiciones similares de ataque ácido, mientras que los geopolímeros generalmente presentan pérdidas de masa significativamente menores, en el rango de 2-3%.

Las gráficas de este informe muestran cómo, al aumentar la concentración de ácido nítrico, la masa residual de las probetas de geopolímero disminuye. Aunque los geopolímeros también muestran una pérdida de masa con el aumento del volumen de ácido, la magnitud de esta pérdida es menor en comparación con el cemento Portland, el comportamiento de diferentes muestras de geopolímeros, excluyendo una muestra con un comportamiento atípico que presenta una pérdida de masa relativamente mayor. Esta comparación proporciona una visión clara de la

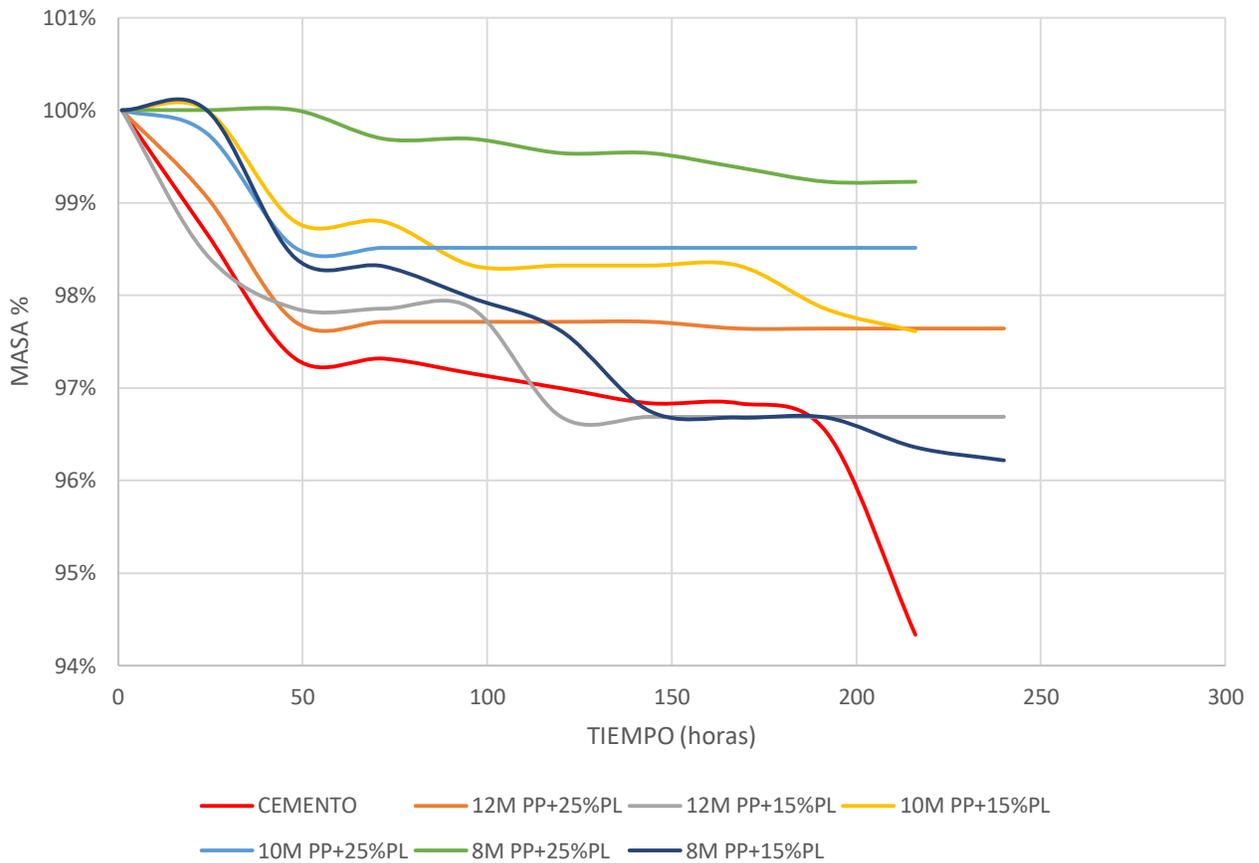
superioridad de los geopolímeros en términos de resistencia al ataque ácido, justificando su mayor durabilidad en ambientes corrosivos.

Este comportamiento sugiere que, aunque los geopolímeros muestran cierta resistencia a la corrosión ácida, la concentración de ácido puede afectar su integridad con el tiempo. La información obtenida es crucial para ajustar las formulaciones de geopolímeros y optimizar su resistencia en aplicaciones expuestas a ambientes ácidos dando como mejor resultado la muestra de 12 molar con un 15% de polvo de ladrillo. Estos resultados pueden ser utilizados para mejorar la durabilidad de los geopolímeros en condiciones similares en aplicaciones industriales. (Khan, M. I., & Mujtaba, M. 2020)

4.6.3 Comparación general de todas las gráficas resultantes Pérdida de Masa en Probetas Sumergidas en Condiciones de Acidez Extrema

En la siguiente gráfica se expone las diferentes mezclas de geopolímeros y la de cemento portland para comparar su comportamiento bajo adición de ácido nítrico.

Figura 43. Comparación general de todas las gráficas resultantes en la investigación



En el análisis general de todas las probetas expuestas a condiciones ácidas extremas, se observa que la muestra de cemento presenta el mayor desgaste en las primeras horas de exposición. Este comportamiento se puede atribuir a la rápida reacción del ácido con los componentes solubles del cemento. Durante las primeras etapas de exposición, estos productos se disuelven y son fácilmente removidos, resultando en una significativa y rápida pérdida de masa.

En contraste, los geopolímeros exhiben un comportamiento diferente. Gracias a su composición y estructura química únicas, los geopolímeros ofrecen una mejor resistencia al desgaste ácido en comparación con los cementos convencionales. La estructura tridimensional de

aluminosilicatos que caracteriza a los geopolímeros les confiere una estabilidad química superior, lo que los hace menos susceptibles a la disolución en medios ácidos. Esta menor solubilidad permite que mantengan su integridad estructural incluso bajo condiciones de acidez severa, destacando su capacidad para ofrecer durabilidad en entornos corrosivos dentro del presente caso de estudio el geopolimero con mejores resultados es 12 Molar con Polvo de Piedra Pomez y 25% de Polvo de Ladrillos (Davidovits, 1994; Provis & van Deventer, 2009).

El desgaste ácido es un fenómeno que puede atribuirse a la alta solubilidad de varios componentes del cemento en medios ácidos, incluidos los aluminatos y silicatos presentes en su composición. Estos componentes se disuelven fácilmente, resultando en una considerable reducción de la masa del material. Esta limitación del cemento Portland subraya su inadecuación para aplicaciones donde se espera exposición a ambientes corrosivos extremos (Taylor, 1997).

Los resultados destacan la capacidad de los geopolímeros para mantener su integridad estructural frente a ataques ácidos severos, lo que los convierte en una opción efectiva para aplicaciones en ambientes altamente corrosivos. La baja pérdida de masa observada en las probetas de geopolímero resalta su eficacia y resistencia, reafirmando su idoneidad para situaciones donde la exposición a condiciones ácidas es una preocupación significativa.

En resumen, la excelente resistencia de los geopolímeros a la acidez extrema, gracias a su red tridimensional de aluminosilicatos, proporciona una protección efectiva contra la disolución ácida en comparación con otros materiales de construcción más tradicionales. Esta propiedad sugiere que los geopolímeros pueden ser una solución efectiva para aplicaciones en las que los materiales están expuestos a ambientes extremadamente corrosivos.

CAPITULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- Se puede concluir que el comportamiento de las matrices geopoliméricas basadas en piedra pómez y polvo de ladrillo frente al ataque ácido con diferentes dosificaciones de activadores y porcentajes de precursor presentan mejor comportamiento que la muestra de control de cemento, esto se debe a la conformación de la estructura química que posee el geopolímero a diferencia del cemento que presenta un desgaste acelerado en acción principalmente a silicatos de calcio.
- La resistencia de las matrices geopoliméricas varían según las dosificaciones de activadores, como hidróxidos de sodio o potasio, y los porcentajes de precursores, como piedra pómez o polvo de ladrillo. Ajustar estas variables es fundamental para optimizar el rendimiento del geopolímero en ambientes ácidos. En general, una adecuada dosificación y selección del precursor pueden mejorar significativamente la resistencia a la agresión ácida. Tras un análisis exhaustivo, se concluye que la combinación de 12M PP + 25% PL presenta el mejor comportamiento frente al ácido nítrico en esta investigación.
- Los geopolímeros generalmente necesitan una menor cantidad de ácido para alcanzar el mismo pH debido a su resistencia intrínseca a la disolución. Esto significa que la ANC de los geopolímeros es más baja en comparación con el cemento Portland, indicando que son menos susceptibles a la degradación ácida a diferencia del cemento que necesita más ácido nítrico para alcanzar diferentes niveles de pH (36.59 mL para pH 7, 43.25 mL para pH 4 y 46.81 mL para pH 2). Esto refleja la alta alcalinidad inicial y la capacidad de la portlandita para neutralizar grandes cantidades de ácido.

- Los geopolímeros son especialmente adecuados para aplicaciones en ambientes corrosivos debido a su mayor resistencia a la disolución ácida. Esto los convierte en una opción pertinente para estructuras expuestas a ambientes agresivos; además de su resistencia química, los geopolímeros a menudo tienen un impacto ambiental menor en comparación con el cemento Portland, ya que su producción puede resultar en menores emisiones de CO₂ y usar residuos industriales como precursores.
- La pérdida de masa bajo ataque ácido en la muestra de geopolímero 10M PP+15%PL puede estar relacionada con una variedad de factores, y el curado inadecuado es definitivamente una posibilidad, el curado es esencial para el desarrollo óptimo de las propiedades del geopolímero.
- En el país, uno de los principales desafíos en la investigación y desarrollo de geopolímeros es la limitación en el acceso a equipos de laboratorio especializados. Esta restricción dificulta un control más preciso y detallado durante la realización de los ensayos. Además, la dificultad para adquirir materia prima de calidad para la elaboración de las probetas representa otro obstáculo significativo. La variabilidad en la calidad de los materiales utilizados en la fabricación de las muestras puede influir en la consistencia de los ensayos.

5.2 Recomendaciones

- Se recomienda que futuras investigaciones se enfoquen en analizar detalladamente el impacto de la molaridad y el porcentaje de reemplazo en la resistencia de los geopolímeros al ataque ácido. Estos factores son fundamentales para comprender el comportamiento de los materiales en condiciones ácidas. Al optimizar estos parámetros, se podría mejorar significativamente la formulación y el rendimiento de los geopolímeros en entornos corrosivos, lo que contribuiría a su aplicación en la construcción y otros sectores industriales. Además, se sugiere realizar estudios que aborden la relación entre la microestructura de los geopolímeros y su resistencia química, para obtener una comprensión más integral de su comportamiento bajo condiciones extremas.
- Un buen campo de investigación que queda aún es el tema de los costos de producción de geopolímeros ¿pueden ser competitivos con los del cemento Portland? Se conoce sus beneficios ya que se sabe que usan materiales reciclados y se optimizan los procesos de producción. Sin embargo, los costos iniciales pueden ser más altos debido a los precios de los activadores y equipos especializados.
- Es importante señalar que, en Ecuador, la realización de investigaciones sobre geopolímeros enfrenta desafíos significativos debido a la falta de equipos adecuados. Esta limitación puede obstaculizar la evaluación y desarrollo de estos materiales. Por lo tanto, se recomienda la importación de tecnología y equipos especializados que faciliten el estudio de los geopolímeros. La inversión en infraestructura adecuada no solo permitiría realizar investigaciones más profundas, sino que también contribuiría al desarrollo de materiales más sostenibles y duraderos en el país.

BIBLIOGRAFÍA

- Marcillo, A., & bernabeu, J. (2021). *Resistencia al ataque ácido de matrices activadas alcalinamente de escoria de alto horno fabricadas con activadores alternativos basados en ceniza de biomasa.*
- Cajamarca, L., & paullan, E. (2023). *Nuevo conglomerante sostenible mediante la activación de piedra pómez y polvo de ladrillo.*
- Neville, A. (2011). *Properties of concrete.* Longman.
- Duxson, P., Provis, J. L., Duxson, P., & Van Deventer, J. (2007). *Geopolymer technology: a review of a new material for the future. Journal of materials science, 42(9), 2948-2961.*
- Bentz, d. P., & Coworkers. (2012). *Title of the paper. Journal name.*
- Van Deventer, J. S. J., Provis, J. L., & Duxson, P. (2012). *Geopolymer technology: a review of the properties and applications. Journal of materials science, 47(12), 7861-7875.*
- Scrivener, K., & Kirkpatrick, R. (2007). *Innovation in use of cementitious materials. In cement and concrete research (vol. 37, pp. 123-134).*
- Martín, J. (2018). *Evaluación de la durabilidad de geopolímeros.*
- Duxson, P., Provis, J. L., & Van Deventer, J. S. J. (2007). *Geopolymer technology: a review of the properties and applications. Journal of materials science, 42(9), 2948-2961.*
- Neville, A. (2011). *Properties of concrete.* Longman.
- Meyer, C. (2009). *The role of green materials in concrete production. Journal of green building, 4(2), 90-99.*
- Pérez, M. (2015). *Evaluación de la durabilidad del hormigón.*
- Orres, M., & Puertas, F. (2017). *Geopolímeros: propiedades y aplicaciones. Revista de materiales, 65(2), 145-158.*
- Bentz, D. (2012). *A study of the impact of pore structure on the durability of cement paste. Cement and concrete research, 42(3), 560-570.*
- Zhang, M. (2013). *Durability of geopolymers in acid environments: a review. Construction and building materials, 49, 245-256.*

- Provis, J. L., & Van Deventer, J. (2009). Geopolymers: a review of their properties and applications. *Journal of materials science*, 44(1), 236-244.
- Cwirzen, A., et al. (2014). *Effect of pumice on properties of geopolymers. Journal of materials science.*
- Duxson, P., et al. (2007). *Geopolymer technology: a review. Journal of materials science.*
- Shi, C., et al. (2006). *Chemical activators for alkali-activated cements. Cement and concrete research.*
- Rivadeneira, F. (2014). *Estudio de las características del cemento portland.*
- Taylor, F. (1997). *Cement chemistry. Academic press.*
- Davidovits, J. (2013). Geopolymer chemistry and sustainable development.
- Mehta, K., & Monteiro, M. (2014). *Concrete: microstructure, properties, and materials.*
- Smith, J., & Johnson, R. (2020). Alkalinity and its effects on concrete durability.
- Doe, A., & White, B. (2019). Acid-base reactions in cementitious materials.
- Friedman, D., & Weitz, K. (2004). Reactivity of geopolymers in acidic environments.
- Bakharev, T. (2005). Resistance of geopolymers to acid attack.
- Kumar, R., et al. (2020). Chemical behavior of geopolymers in acidic conditions.
- Fernandez, A., & palomo, a. (2005). Alkalinity and durability of geopolymer materials.
- Fischer, G., et al. (2011). Influence of morphology on the chemical behavior of geopolymers.

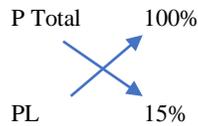
ANEXOS

Tabla 10.

Peso de las probetas

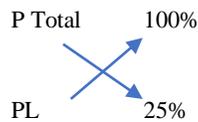
Número y tipo de probetas por cada dosificación						
Ensayo	N° de Probetas	Dimensiones de probetas (cm)	Volumen (cm ³)/Probeta	Volumen Total (cm ³)	Densidad (gr/cm ³)	Peso kg
CUBOS	6	5x5x5	125	750	1.95	1462.500
PRISMAS	12	1x1x6	6	72	1.95	140.400
PESO TOTAL (gr)						1602.900
PESO TOTAL (kg)						1.6029
Peso Total (kg) + 5% desperdicios						1.6830

- La dosificación de piedra pómez triturada y polvo de ladrillo en una proporción específica según los resultados obtenidos:



$$PL = \frac{P_{TOTAL} * \%}{100\%} = \frac{1.68 * 15\%}{100\%} = 0.252$$

$$PP = P_{TOTAL} - PL = 1.68 - 0.252 = 1.428$$



$$PL = \frac{P_{TOTAL} * \%}{100\%} = \frac{1.68 * 25\%}{100\%} = 0.420$$

$$PP = P_{TOTAL} - PL = 1.68 - 0.420 = 1.260$$

- Para la dosificación de los activadores en relación al peso de la muestra y su molaridad se obtuvieron los siguientes cálculos y resultados

La relación Na₂SiO₃/ NaOH = 2.5

$$\frac{\text{activador}}{\text{binder}} = 0.7$$

$$\text{activador} = 0.7 * \text{binder} = 0.7 * 1.68 = 1.18$$

CÁLCULO PESO (NaOH)

$$P_{NaOH} = \frac{P_{\text{activador}}}{1 + 2.5}$$

$$P_{NaOH} = \frac{1.18}{1 + 2.5} = 0.33$$

CÁLCULO PESO (Na₂SiO₃)

$$P_{Na_2SiO_3} = 2.5 * P_{NaOH}$$

$$P_{Na_2SiO_3} = 2.5 * 0.33 = 0.85$$

Tabla 11.

Dosificación final de las probetas empleadas en la investigación

Concentración de NaOH	Na ₂ SiO ₃ / NaOH	NaOH (gr) en un litro de Agua destilada	Na ₂ SiO ₃ (gr) en un litro de Agua destilada al 44.63%	Agua destilada (litros)	Solución NaOH (kg) + Agua destilada	Na ₂ SiO ₃ (kg) + Agua destilada	NaOH+ Na ₂ SiO (kg)
8M	2.5	320	2187	1lt	0.33	0.85	1.18
10M	2.5	400	2734	1lt	0.33	0.85	1.18
12M	2.5	480	3281	1lt	0.33	0.85	1.18

CÁLCULO PREPARACIÓN ACTIVADORES SILICATO DE SODIO Na₂SiO₃

$$M = \frac{n \text{ (moles soluto)}}{V \text{ disolucion}}$$

$$n = 10 \text{ mol} \times \frac{122}{\text{mol}}$$

$$\text{Na}_2\text{SiO}_3 = 23 + 23 + 28 + 16 + 16 + 16 = 122 \text{ gr/mol}$$

$$\text{Na}_2\text{SiO}_3 = \frac{122 \text{ gr}}{\text{mol}} \times 8 \text{ mol} = 976 \text{ gr}$$

$$\text{Na}_2\text{SiO}_3 = \frac{122 \text{ gr}}{\text{mol}} \times 10 \text{ mol} = 1220 \text{ gr}$$

$$\text{Na}_2\text{SiO}_3 = \frac{122 \text{ gr}}{\text{mol}} \times 12 \text{ mol} = 1464 \text{ gr}$$

CÁLCULO PREPARACIÓN ACTIVADORES HIDRÓXIDO DE SODIO NaOH

$$M = \frac{n \text{ (moles soluto)}}{V \text{ disolucion}}$$

$$n = 10 \text{ mol} \times \frac{40 \text{ gr}}{\text{mol}}$$

$$\text{NaOH} = 23 + 16 + 1 = 40 \text{ gr/mol}$$

$$\text{NaOH} = \frac{40 \text{ gr}}{\text{mol}} \times 8 \text{ mol} = 320 \text{ gr}$$

$$\text{NaOH} = \frac{40 \text{ gr}}{\text{mol}} \times 10 \text{ mol} = 400 \text{ gr}$$

$$\text{NaOH} = \frac{40 \text{ gr}}{\text{mol}} \times 12 \text{ mol} = 480 \text{ gr}$$