



UNIVERSIDAD RICARDO PALMA

FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL

Hormigón con polímeros inorgánicos de tipo mineral como ceniza para resistir mayores temperaturas y disminuir la permeabilidad

TESIS

Para optar el título profesional de Ingeniero Civil

AUTORES

Aliaga Davila, Cristopher Oswaldo

ORCID: 0009-0005-0254-6271

Ramirez Flores, Juan Manuel

ORCID: 0009-0000-8534-1610

ASESOR

Chavarría Reyes, Liliana Janet

ORCID: 0000-0002-1759-2132

Lima, Perú

2023

METADATOS COMPLEMENTARIOS

Datos de los autores

Aliaga Davila, Cristopher Oswaldo

DNI: 77021190

Ramirez Flores, Juan Manuel

DNI: 47101144

Datos de asesor

Chavarría Reyes, Liliana Janet

DNI: 25481792

Datos del jurado

JURADO 1

Pereyra Salardi, Enriqueta

DNI: 06743824

ORCID: 0000-0003-2527-3665

JURADO 2

Torres Chung, Cesar Roberto

DNI: 41182279

ORCID: 0000-0002-3212-2817

JURADO 3

Chavarry Vallejos, Carlos Magno

DNI: 07410234

ORCID: 0000-0003-0512-8954

Datos de la investigación

Campo del conocimiento OCDE: 2.01.01

Código del Programa: 732016

DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD

Nosotros, Aliaga Davila, Cristopher Oswaldo , con código de estudiante N° 201610334, con DNI N° 77021190 , con domicilio en Paseo de la República s/n Edif. 4 Dpto. 101 Villa Militar de Matellini , distrito Chorrillos , provincia y departamento de Lima , y Ramirez Flores, Juan Manuel , con código de estudiante N° 201611210 , con DNI N° 47101144 , con domicilio en Av. 2 de Mayo 1254 – Nueva Esperanza , distrito Villa María del Triunfo , provincia y departamento de Lima , en nuestra condición de bachilleres en Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería, declaramos bajo juramento que:

La presente tesis titulada: “ Hormigón con polímeros inorgánicos de tipo mineral como ceniza para resistir mayores temperaturas y disminuir la permeabilidad ” es de nuestra única autoría, bajo el asesoramiento del docente Chavarría Reyes, Liliana Janet , y no existe plagio y/o copia de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación presentado por cualquier persona natural o jurídica ante cualquier institución académica o de investigación, universidad, etc.; la cual ha sido sometida al antiplagio Turnitin y tiene el 21 % de similitud final.

Dejamos constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en la tesis, el contenido de estas corresponde a las opiniones de ellos, y por las cuales no asumimos responsabilidad, ya sean de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o de internet.

Asimismo, ratificamos plenamente que el contenido íntegro de la tesis es de nuestro conocimiento y autoría. Por tal motivo, asumimos toda la responsabilidad de cualquier error u omisión en la tesis y somos conscientes de las connotaciones éticas y legales involucradas.

En caso de falsa declaración, nos sometemos a lo dispuesto en las normas de la Universidad Ricardo Palma y a los dispositivos legales nacionales vigentes.

Surco, 21 de octubre de 2023



(Aliaga Davila, Cristopher Oswaldo)

DNI N° 77021190



(Ramirez Flores, Juan Manuel)

DNI N°47101144

INFORME DE ORIGINALIDAD – TURNITIN

Hormigón con polímeros inorgánicos de tipo mineral como ceniza para resistir mayores temperaturas y disminuir la permeabilidad
TURNITIN 001

INFORME DE ORIGINALIDAD

21 %	19 %	7 %	6 %
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	repositorio.urp.edu.pe Fuente de Internet	5 %
2	hdl.handle.net Fuente de Internet	4 %
3	tesis.pucp.edu.pe Fuente de Internet	2 %
4	Submitted to Universidad Ricardo Palma Trabajo del estudiante	1 %
5	repositorio.uprit.edu.pe Fuente de Internet	1 %
6	eprints.uanl.mx Fuente de Internet	<1 %
7	Ahmet Özbayrak, Hurmet Kucukgoncu, Huseyin Hilmi Aslanbay, Yuksel Gul Aslanbay, Oguzhan Atas. "Comprehensive experimental analysis of the effects of elevated temperatures in geopolymer concretes with variable alkali activator ratios", Journal of Building Engineering, 2023	<1 %


Dra. Vargas Chang Esther Joni

DEDICATORIA

A Dios por la sabiduría y salud otorgada a lo largo del desarrollo de mi carrera profesional.

A mis padres, por su apoyo constante, su cariño incondicional y ser la inspiración para seguir logrando mis objetivos.

Aliaga Davila, Cristopher Oswaldo

A mis padres por ser la razón de todos mis logros, por darme las mejores oportunidades y permitirme alcanzar las metas trazadas a lo largo de este tiempo.

Ramirez Flores, Juan Manuel

AGRADECIMIENTO

A nuestra casa de estudios, la Universidad Ricardo Palma y a sus docentes por nuestra formación como profesionales.

A nuestros asesores, la Mg. Ing. Chavarría Reyes Liliana Janet y el Dr. Ing. Chavarry Vallejos Carlos Magno por su asistencia y soporte en el trayecto del desarrollo nuestra investigación.

Aliaga Davila, Cristopher Oswaldo y
Ramirez Flores, Juan Manuel

ÍNDICE GENERAL

METADATOS COMPLEMENTARIOS	ii
DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD	iii
INFORME DE ORIGINALIDAD – TURNITIN	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vi
ÍNDICE GENERAL	vii
ÍNDICE FIGURAS	xi
ÍNDICE DE TABLAS	xiv
RESUMEN	xvi
ABSTRACT.....	xvii
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO Y DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA	3
1.1 Descripción de la realidad problemática	3
1.1.1 Problema e importancia.....	3
1.1.2 Árbol del problema (causas – problema – consecuencias).....	4
1.2 Formulación del problema.....	5
1.2.1 Problema general	5
1.2.2 Problemas específicos	5
1.3 Objetivos de la investigación	5
1.3.1 Objetivo general	5
1.3.2 Objetivos específicos.....	5
1.4 Delimitación de la investigación	5
1.4.1 Geográfica	5
1.4.2 Temporal	5
1.4.3 Temática	6
1.4.4 Muestral.....	6
1.5 Justificación del estudio	6
1.5.1 Conveniencia	6
1.5.2 Relevancia social	6
1.5.3 Aplicaciones prácticas	6
1.5.4 Utilidad metodológica	7
1.5.5 Valor teórico.....	7

1.6	Importancia del estudio	7
1.6.1	Nuevos conocimientos	7
1.6.2	Aporte.....	8
1.7	Limitaciones del estudio.....	8
1.7.1	Falta de estudios previos de investigación	8
1.7.2	Metodológicos o prácticos.....	8
1.7.3	Medidas para la recolección de los datos	8
1.7.4	Obstáculos en la investigación	8
1.8	Alcance.....	8
1.9	Viabilidad del estudio.....	9
CAPÍTULO II: MARCO HISTÓRICO		10
2.1	Marco histórico.....	10
2.2	Investigaciones relacionadas con el tema.....	11
2.2.1	Artículos relacionados con el tema	11
2.3	Estructura teórica y científica que sustenta el estudio.....	50
2.3.1	Fundamentación teórica	50
2.3.2	Geopolímero (polímero inorgánico).....	50
2.3.3	Proceso de geopolimerización.....	51
2.3.4	Ceniza volante	51
2.3.5	Ceniza volante (material precursor)	53
2.3.6	Solución Activadora Alcalina (SAA).....	53
2.3.7	Relación SS/SH (Silicato de Sodio / Hidróxido de Sodio)	55
2.3.8	Relación SAA/FA (Solución Activadora Alcalina / Cenizas Volantes)	56
2.3.9	Preparación del geopolímero.....	56
2.3.10	Curado del hormigón geopolimérico	56
2.3.11	Tiempo de curado del hormigón geopolimérico	57
2.3.12	Estructuras de hormigón geopolimérico	57
2.3.13	Propiedades del hormigón.....	58
2.3.14	Normas técnicas y ensayos	60
2.4	Definición de términos básicos	61
2.5	Fundamentos teóricos que sustentan las hipótesis	62
CAPÍTULO III: SISTEMA DE HIPÓTESIS		63
3.1	Hipótesis.....	63
3.1.1	Hipótesis general	63

3.1.2 Hipótesis específicas	63
3.2 Sistema de variables	63
3.2.1 Variable independiente	63
3.2.2 Variable dependiente	63
3.3 Definición conceptual y operacional	63
3.3.1 Definición conceptual.....	63
3.3.2 Definición operacional	63
3.3.3 Operacionalización de las variables	65
CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA.....	66
4.1 Método de la investigación.....	66
4.2 Tipo de la investigación	67
4.3 Nivel de investigación	67
4.4 Diseño de la investigación.....	67
4.5 Población y muestra	67
4.5.1 Población	67
4.5.2 Muestra.....	67
4.6 Técnicas e instrumentación de recolección de datos.....	68
4.6.1 Instrumento de recolección de datos	68
4.6.2 Métodos y técnicas	68
4.7 Descripción de procesamientos de análisis	68
CAPÍTULO V: PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA	
INVESTIGACIÓN.....	69
5.1 Resultado de la investigación	69
5.1.1 Relaciones de SAA/FA para incrementar el asentamiento del hormigón	69
5.1.2 Relaciones de SAA/FA para reducir la permeabilidad del hormigón	73
5.1.3 Relaciones de SAA/FA para incrementar la f^c del hormigón.....	78
5.1.4 Relaciones de SAA/FA para la reducir la pérdida de masa del hormigón	87
5.2 Contrastación de hipótesis.....	97
5.2.1 Contrastación de la primera hipótesis	97
5.2.2 Contrastación de la segunda hipótesis.....	100
5.2.3 Contrastación de la tercera hipótesis	102
5.2.4 Contrastación de la cuarta hipótesis	105
DISCUSIÓN	108
CONCLUSIONES	110

RECOMENDACIONES.....	113
REFERENCIAS.....	114
ANEXOS	121
Anexo A: Matriz de consistencia.....	122
Anexo B: Matriz de artículos internacionales.....	123

ÍNDICE FIGURAS

Figura 1	Árbol del problema.....	4
Figura 2	Asentamiento con molaridad =14	14
Figura 3	Asentamiento según la molaridad (Ms)	14
Figura 4	Resistencia a la compresión según la molaridad (Ms)	14
Figura 5	Resistencia a la compresión según la temperatura de curado.....	15
Figura 6	Prueba de profundidad de penetración del agua (mm).....	15
Figura 7	Resultado de absorción de agua (%)	16
Figura 8	Resultado de profundidad de penetración del agua (mm).....	16
Figura 9	Resultados del asentamiento (mm).....	19
Figura 10	Resultado de resistencia a la compresión (MPa).....	19
Figura 11	Patrón grietas del hormigón GPC y OPC a temperatura elevada	21
Figura 12	Pérdida de masa (%) de GPC y OPC expuestos a altas temperaturas.....	22
Figura 13	Cambios en la superficie de las probetas F-GPC y C-GPC	23
Figura 14	Pérdida de masa (%) de F-GPC y C-GPC	24
Figura 15	Curva tiempo – temperatura	26
Figura 16	Calentamiento de muestras de GPC (Geopolymer Concrete)	26
Figura 17	Cambios en la superficie de muestras de GPC	27
Figura 18	Porcentaje de pérdida de masa (%).....	27
Figura 19	Muestras en estado fresco y endurecido	31
Figura 20	Resultados de la absorción de agua (kg/m ³).....	32
Figura 21	Porcentaje de absorción de agua (%).....	33
Figura 22	Relación entre valores de resistencia a la compresión y flexión	35
Figura 23	Efectos térmicos sobre la resistencia a la compresión (MPa).....	36
Figura 24	Efecto de SAA/FA y SS/SH a diferentes temperaturas sobre el f'c (MPa).....	37
Figura 25	Resistencia de compresión y tracción de hormigón geopolimérico GC50	44
Figura 26	Comparación de absorción de agua acumulada de GPC y OPC	44
Figura 27	Régimen de calentamiento	46
Figura 28	Curva de régimen de calentamiento.....	48
Figura 29	Superficie del hormigón geopolimérico a diferentes temperaturas	48
Figura 30	Pérdida de masa (%) del GP a temperaturas elevadas	49
Figura 31	Composición del hormigón geopolimérico	50
Figura 32	Características físicas de la ceniza volante clase F	52

Figura 33 <i>Ceniza volante</i>	52
Figura 34 <i>Perlas de hidróxido de sodio (SH)</i>	54
Figura 35 <i>Silicato de Sodio (SS)</i>	55
Figura 36 <i>Componentes del Hormigón Geopolimérico (GPC)</i>	55
Figura 37 <i>Edificio Global Change Institute</i>	58
Figura 38 <i>Aeropuerto Brisbane West Wellcamp</i>	58
Figura 39 <i>Fundamentación teórica del hormigón geopolimérico</i>	62
Figura 40 <i>Flujo de asentamiento</i>	70
Figura 41 <i>Flujo de asentamiento</i>	71
Figura 42 <i>Trabajabilidad de mezclas de GPC</i>	72
Figura 43 <i>Resultados de ensayo de hormigón geopolímero activador alcalino al 5%</i> ..	73
Figura 44 <i>Absorción de Agua (%) de Mezclas</i>	75
Figura 45 <i>Resultado de Absorción de Agua (%)</i>	76
Figura 46 <i>Resultado de Absorción de Agua (%)</i>	77
Figura 47 <i>Resistencia residual a la compresión (MPa) de FAGC bajos en calcio</i>	80
Figura 48 <i>Resistencia residual a compresión de probetas de hormigón</i>	81
Figura 49 <i>F'c (Mpa) inicial y residual de las probetas GP</i>	83
Figura 50 <i>Resistencia residual a la compresión a diferentes temperaturas elevadas</i>	84
Figura 51 <i>Resistencia residual a la compresión a diferentes temperaturas elevadas</i>	85
Figura 52 <i>Resistencia a la compresión (Mpa) a después de exposición al calor</i>	86
Figura 53 <i>Resistencia a la Compresión (MPa) GPC y OPC</i>	87
Figura 54 <i>Pérdida de Masa (%) del GPC a 821°C, 925°C, 986°C y 1029°C</i>	90
Figura 55 <i>Pérdida de Masa (%) del GPC a 100°C hasta los 1000°C</i>	91
Figura 56 <i>Pérdida de Masa (%) del GPC y OPC a 200°C, 400°C, 600°C y 800°C</i>	92
Figura 57 <i>Pérdida de Masa (%) del GPC y OPC a 300°C hasta los 1200°C</i>	93
Figura 58 <i>Pérdida de Masa (%) del GPC y OPC a 100°C hasta los 800°C</i>	95
Figura 59 <i>Pérdida de Masa (%) del GPC y OPC a 400°C, 600°C y 800°C</i>	96
Figura 60 <i>Pérdida de masa (%) del GPC y OPC a 500°C y 1200°C</i>	97
Figura 61 <i>Flujo de asentamiento (mm) – Relación de solución activadora alcalina (SS/SH) vs Relación de Solución Activadora Alcalina/Cenizas Volantes (SS/FA)</i>	98
Figura 62 <i>Porcentaje de Absorción de Agua (%) – Relación de Solución Activadora Alcalina (SS/SH) vs Relación de Solución Activadora Alcalina/Cenizas Volantes (SAA/FA)</i>	101

Figura 63 <i>Resistencia a la compresión del hormigón con geopolímeros – Relación de Solución Activadora Alcalina (SS/SH) vs Relación de Solución Activadora Alcalina/Cenizas Volantes (SS/FA).....</i>	103
Figura 64 <i>Pérdida de Masa (%) del Hormigón Geopolimérico – Usando Relación de Solución Activadora Alcalina/Cenizas Volantes (SAA/FA) = 0.45.....</i>	106

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Parámetros de diseño</i>	13
Tabla 2 <i>Detalle de mezclas</i>	13
Tabla 3 <i>Composición de mezclas de hormigón geopolimérico</i>	16
Tabla 4 <i>Materiales de mezcla de hormigón geopolimérico</i>	18
Tabla 5 <i>Pesos promedio de asentamiento y volumen</i>	18
Tabla 6 <i>Combinación de mezclas de hormigón GPC y OPC (kg/m³)</i>	21
Tabla 7 <i>Pérdida de masa (%) de GPC y OPC expuestos a altas temperaturas</i>	22
Tabla 8 <i>Proporciones de mezclas de especímenes de geopolímero</i>	24
Tabla 9 <i>Diseño de mezclas (kg/m³)</i>	27
Tabla 10 <i>Porcentaje de pérdida de masa (%)</i>	28
Tabla 11 <i>Diseños de mezcla relacionados con la absorción de agua (kg/m³)</i>	31
Tabla 12 <i>Resultados de la absorción de agua (kg/m³)</i>	31
Tabla 13 <i>Mezclas de hormigón geopolimérico</i>	33
Tabla 14 <i>Proporciones de mezcla del hormigón geopolimérico</i>	34
Tabla 15 <i>Mezcla de hormigón geopolimérico (kg/m³) para f'c = 20, 40 y 60 Mpa</i>	40
Tabla 16 <i>Mezcla de hormigón ordinario (kg/m³) para f'c = 20, 40 y 60 Mpa</i>	40
Tabla 17 <i>Pérdida de masa (%) OPC vs GPC</i>	40
Tabla 18 <i>Composición química de MK, FA y SF (% en peso)</i>	43
Tabla 19 <i>Mezcla de hormigones geopolímeros (kg/m³) y f'c (MPa)</i>	43
Tabla 20 <i>Mezcla de hormigones OPC (kg/m³) y f'c (MPa)</i>	43
Tabla 21 <i>Diseño de mezcla (kg/m³)</i>	46
Tabla 22 <i>Pérdida de masa (%) de GPC con adición de 0%, 5% y 10% de cemento</i>	46
Tabla 23 <i>Diseño de mezcla del hormigón (kg/m³)</i>	47
Tabla 24 <i>Pérdida de masa (%) del hormigón geopolimérico a temperaturas elevadas</i>	49
Tabla 25 <i>Porcentaje de la composición referencial de óxidos de la ceniza volante</i>	53
Tabla 26 <i>Operacionalización de variables</i>	65
Tabla 27 <i>Matriz de autores para estudio del asentamiento del GPC</i>	69
Tabla 28 <i>Flujo de asentamiento</i>	70
Tabla 29 <i>Flujo de asentamiento</i>	71
Tabla 30 <i>Trabajabilidad de mezclas de GPC hechas con diferentes SAA/FA</i>	72
Tabla 31 <i>Resultados de ensayo de hormigón geopolímero activador alcalino al 5% ...</i>	73
Tabla 32 <i>Matriz de autores para estudio de la permeabilidad del GPC</i>	74

Tabla 33 <i>Resultados de la absorción de agua (kg/m³)</i>	74
Tabla 34 <i>Resultado de absorción de agua (%)</i>	75
Tabla 35 <i>Resultado de absorción de agua (%)</i>	76
Tabla 36 <i>Matriz de autores para estudio de resistencia a la compresión del GPC</i>	78
Tabla 37 <i>Diseño de mezcla FAGC (kg/m³)</i>	79
Tabla 38 <i>Resistencia residual a la compresión (MPa) de FAGC bajos en calcio</i>	79
Tabla 39 <i>Proporciones de la mezcla de hormigón a base de OPC</i>	80
Tabla 40 <i>Proporciones de la mezcla de hormigón geopolimérico</i>	81
Tabla 41 <i>Resistencia residual a compresión (%) de probetas de hormigón</i>	81
Tabla 42 <i>Resistencias a la compresión (MPa) inicial y residual de las probetas GP</i> ...	82
Tabla 43 <i>F'c Resistencia (MPa) a diferentes temperaturas elevadas</i>	84
Tabla 44 <i>Resistencia residual a la compresión a diferentes temperaturas elevadas</i>	85
Tabla 45 <i>Resistencia a la compresión (Mpa) después de la exposición al calor</i>	86
Tabla 46 <i>Resistencia a la compresión (MPa) GPC y OPC</i>	87
Tabla 47 <i>Matriz de autores para estudio de pérdida de masa del GPC</i>	88
Tabla 48 <i>Porcentaje de pérdida de masa (%) – GPC-NO</i>	89
Tabla 49 <i>Porcentaje de pérdida de masa (%) - GPN-H</i>	91
Tabla 50 <i>Pérdida de masa (%) de GPC y OPC a temperaturas elevadas</i>	92
Tabla 51 <i>Porcentaje de pérdida de masa (%)</i>	93
Tabla 52 <i>Porcentaje de pérdida de masa del hormigón geopolimérico</i>	94
Tabla 53 <i>Porcentaje de pérdida de masa del hormigón geopolimérico (%)</i>	96
Tabla 54 <i>Porcentaje de pérdida de masa de hormigón OPC y GPC</i>	97

RESUMEN

La presente tesis tuvo como objetivo general determinar los polímeros inorgánicos de tipo mineral como ceniza para mejorar las propiedades físico-mecánicas del hormigón. El método para el estudio fue deductivo, de orientación aplicada, enfoque cuantitativo, con recolección de datos de carácter retrolectivo, de tipo descriptivo, explicativo y correlacional. El nivel de investigación fue descriptivo. El diseño fue no experimental, retrospectivo, longitudinal y de causa - efecto. Los polímeros inorgánicos redujeron la permeabilidad y la pérdida de masa e incrementaron el asentamiento y resistencia a la compresión del hormigón. El asentamiento incrementó entre un 10% a 400% con una SS/SH (relación Silicato de Sodio/Hidróxido de Sodio) en un rango de 1.5 a 2.5 y una SAA/FA (relación de Solución Activadora Alcalina/Ceniza Volante) en un rango de 0.40 a 0.90. La permeabilidad se redujo en un 50% con una SS/SH de 1.5 y una SAA/FA de 0.40. La resistencia a la compresión aumentó entre un 29% a 82% con una SS/SH en un rango de 1.75 a 2.5 y una SAA/FA en un rango de 0.40 a 0.45 y la pérdida de masa se redujo entre un 40% a 60% con una SS/SH de 1.75 y una SAA/FA de 0.45. Finalmente se concluye que los polímeros inorgánicos mejoran las propiedades físico-mecánicas del hormigón sometido a elevadas temperaturas.

Palabras Claves: Geopolímero, solución activadora alcalina, cenizas volantes, asentamiento, permeabilidad, resistencia a la compresión, pérdida de masa.

ABSTRACT

The general objective of this thesis was to determine the mineral-type inorganic polymers such as ash to improve the physical-mechanical properties of concrete. The method for the study was deductive, applied orientation, quantitative approach, with data collection of a retrospective, descriptive, explanatory and correlational nature. The level of research was descriptive. The design was non-experimental, retrospective, longitudinal and cause-effect. Inorganic polymers reduced permeability and mass loss and increased concrete slump and compressive strength. Slump increased between 10% to 400% with a SS/SH (Sodium Silicate/Sodium Hydroxide ratio) in a range of 1.5 to 2.5 and a SAA/FA (Alkaline Activating Solution/Fly Ash ratio) in a range from 0.40 to 0.90. Permeability was reduced by 50% with an SS/SH of 1.5 and a SAA/FA of 0.40. Compressive strength increased by 29% to 82% with SS/SH ranging from 1.75 to 2.5 and SAA/FA ranging from 0.40 to 0.45 and mass loss was reduced by 40% to 60 % with a SS/SH of 1.75 and a SAA/FA of 0.45. Finally, it is concluded that inorganic polymers improve the physical-mechanical properties of concrete subjected to high temperatures.

Keywords: Geopolymer, alkaline solution, fly ash, settlement, permeability, compressive strength, mass loss.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo económico de un país depende de su infraestructura, lo que aumenta la demanda de materiales de construcción. El material de construcción más importante es el hormigón, el cual cada día aumenta su demanda, debido a sus características especiales. El ligante tradicional y más común utilizado para la producción de hormigón es el cemento Portland ordinario, sin embargo, su producción causa contaminación ambiental y conduce al calentamiento global. Se estima que una tonelada de producción de cemento libera una tonelada de dióxido de carbono (CO_2) en la atmósfera. Por lo tanto, para reducir el calentamiento global, es esencial el uso alternativo de nuevos materiales cementosos. Por otro lado, el fuego es una de las condiciones más graves que pone en peligro la vida humana y las estructuras civiles. El daño sufrido por los edificios de hormigón en un incendio está determinado por el aumento de la temperatura y la duración de la exposición al fuego. El hormigón es generalmente resistente al fuego; sin embargo, la exposición prolongada al fuego a altas temperaturas puede reducir la durabilidad, haciendo que la estructura pierda integridad y estabilidad, lo que puede provocar un colapso catastrófico. Por ello, el Geopolímero se propone como un futuro ligante de hormigón sin cemento, ya que emite menos CO_2 y consume menos energía en su fabricación. Las propiedades físicas-mecánicas de los hormigones geopoliméricos son comparables o incluso mejores que las del hormigón ordinario. Los geopolímeros tienen una alta resistencia al fuego debido a su base inorgánica. En caso de incendio o exposición prolongada a altas temperaturas, la resistencia del hormigón geopolimérico puede mejorar como resultado del proceso de geopolimerización.

Por lo tanto, el geopolímero, se encuentra como la alternativa más adecuada para el reemplazo del cemento, ya que utiliza subproductos industriales como materia prima activados por soluciones alcalinas. La producción de GPC (Hormigón Geopolimérico) elimina por completo el uso de cemento y emplea materiales aglutinantes ecológicos, como cenizas volantes (FA). La literatura reciente establece que GPC reduce el 70% de las emisiones de dióxido de carbono (CO_2).

La motivación de la presente investigación es que se analiza un hormigón innovador con mejores propiedades físico-mecánicas que el hormigón convencional y que tiene potencial para afrontar problemas medioambientales. El GPC no utiliza cemento, usa geopolímeros y para la formación de este, se utiliza cenizas volantes que es un subproducto recuperado de los trabajos de quema de carbón de centrales eléctricas, esto

contribuye a la sostenibilidad ambiental ya que habría una reducción: de residuos en procesos industriales, en el uso de recursos naturales para la fabricación del cemento y en la huella de carbono. Estos hechos pueden generar conciencia de la importancia de la sostenibilidad en las industrias y gobiernos para que surjan regulaciones o estándares que apoyan el uso de materiales sostenibles.

El objetivo de la presente investigación es mejorar las propiedades físico – mecánicas del hormigón convencional, sustituyendo totalmente el cemento por geopolímeros, para lograr una mezcla de mejor calidad y ecológica. Se determina la relación óptima de Solución Activadora Alcalina / Cenizas Volantes (SAA/FA) del Hormigón Geopolimérico (GPC) para incrementar el asentamiento, reducir la permeabilidad, mejorar la resistencia a la compresión y reducir la pérdida de masa, estos dos últimos después de la exposición a altas temperaturas.

Esta investigación consta de cinco capítulos, el capítulo I define el planteamiento del problema, objetivos, delimitaciones, justificaciones, importancias, limitaciones, alcance y viabilidad del estudio. El capítulo II abarca el marco histórico, las investigaciones relacionadas con el tema, estructura teórica y científica, definición de términos básicos y fundamento teóricos. El capítulo III, se enfoca en las hipótesis, variables y su operacionalización. El capítulo IV, describe la metodología, tipo, nivel, diseño, población, muestra, técnicas e instrumentos de recolección de datos y la descripción de procesamientos de análisis empleada para la investigación. En el capítulo V se muestra los resultados de la investigación y la contrastación de hipótesis. Por último, se presenta la discusión, conclusiones y recomendaciones.

CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO Y DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA

1.1 Descripción de la realidad problemática

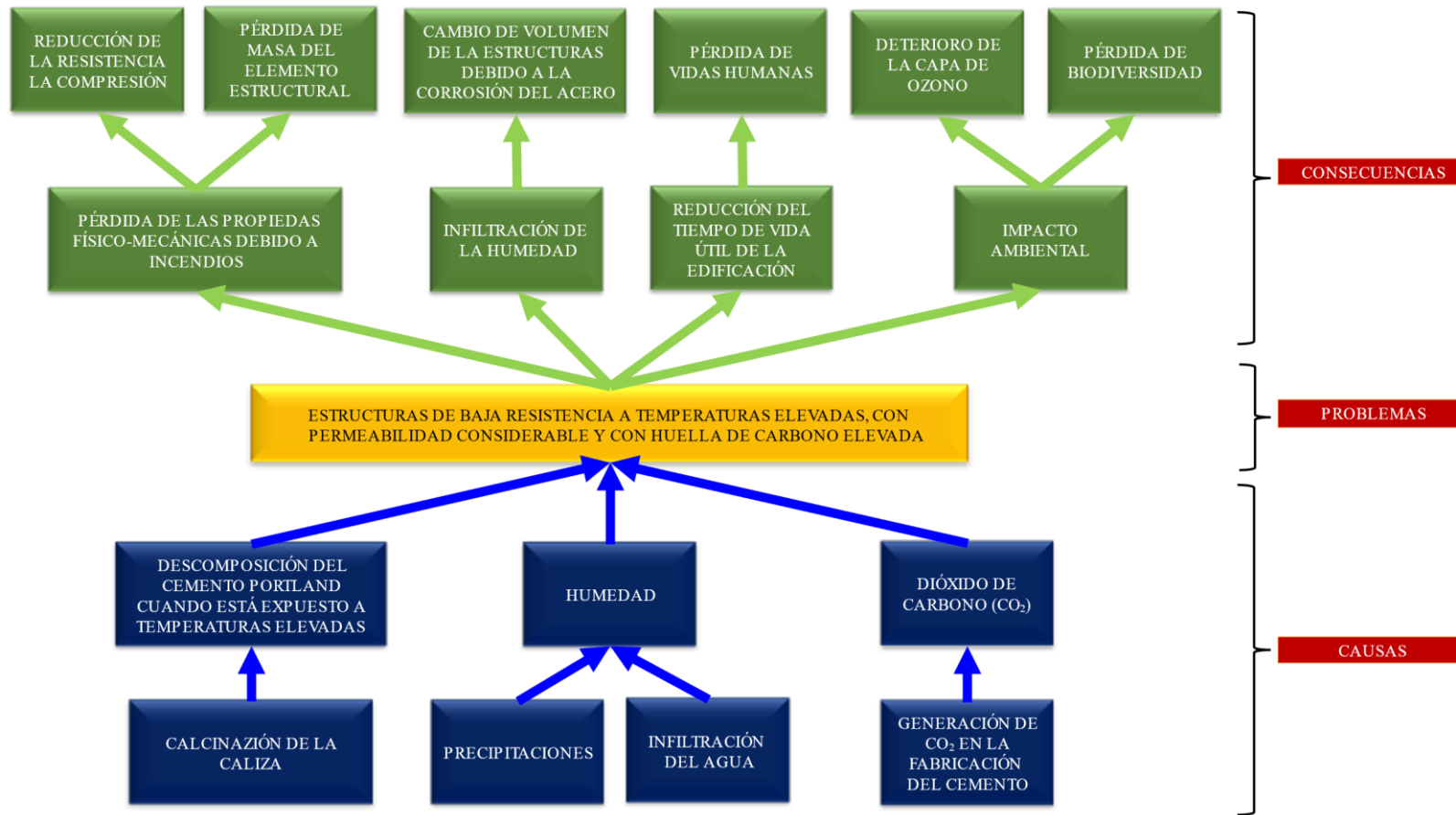
1.1.1 Problema e importancia

Uno de los grandes problemas que afecta hoy en día al material más dominante en la construcción, el cual es el hormigón, es su producción y esto viene de la mano con el crecimiento urbano, para esto existe la búsqueda de materiales que sean reutilizables, cumplan con los reglamentos y normativas que regulan las propiedades físico - mecánicas, además se busca materiales que sean eco-amigables para reducir la huella ambiental que deja producir los componentes del cemento para obtener el hormigón convencional. Por otro lado, el hormigón requiere mejorar propiedades como la resistencia a altas temperaturas ya sea para las estructuras donde se requiere realizar trabajos a altas temperaturas o como medida de seguridad en estructuras que tengan riesgo de incendios. La exposición a altas temperaturas del hormigón genera deterioro en la masa y consecutivamente esto afecta en la geometría de la sección de las estructuras, lo cual puede generar deformación del elemento y/o desprendimiento del material y por consiguiente genera un deficiente comportamiento estructural en las propiedades mecánicas del hormigón. Otro punto de estudio frente a los problemas que sufre el hormigón armado es la permeabilidad que puede tener la estructura lo cual puede resultar en la corrosión del acero que consecuentemente debilita la estructura y disminuirá significativamente la resistencia a la flexión y tracción. Una alta permeabilidad del hormigón aumenta los problemas estructurales en lugares con altos índices de humedad los cuales son frecuentes en obras hidráulicas o edificaciones frente al mar. En adición a todo esto, el principal material utilizado en la preparación del hormigón es el cemento, un material el cual se consume en enormes cantidades debido a la alta demanda que existe y la cual es inevitable, “sin embargo alrededor de una tonelada de CO₂ se genera en consecuencia de producir una tonelada de cemento, es decir, 0.55 toneladas debido al proceso de calcinación de la cal y 0.40 tonelada debido al consumo de combustible que impacta grande y negativamente en el medio ambiente” (Chandrakanth & Srikanth Koniki, 2020). Es por ello que la presente investigación pretende estudiar materiales alternativos y reutilizables como subproductos o residuos industriales como es el caso de los polímeros inorgánicos “geopolímeros” en forma de cenizas, los cuales hoy en día presentan un problema ambiental en gran medida debido a su alto uso y poca reutilización ecológica.

1.1.2 Árbol del problema (causas – problema – consecuencias)

Figura 1

Árbol del problema



Nota. Elaboración Propia

1.2 Formulación del problema

1.2.1 Problema general

¿En qué medida los polímeros inorgánicos de tipo mineral como ceniza influyen en las propiedades físico-mecánicas del hormigón?

1.2.2 Problemas específicos

- a) ¿En qué medida la relación solución activadora alcalina/ceniza volante influyen en el asentamiento del hormigón?
- b) ¿En qué medida la relación solución activadora alcalina/ceniza volante influyen en la permeabilidad del hormigón?
- c) ¿En qué medida la relación solución activadora alcalina/ceniza volante influyen en la resistencia a la compresión del hormigón después de ensayos a altas temperaturas?
- d) ¿En qué medida la relación solución activadora alcalina/ceniza volante influye en la pérdida de masa del hormigón después de ensayos a altas temperaturas?

1.3 Objetivos de la investigación

1.3.1 Objetivo general

Determinar los polímeros inorgánicos de tipo mineral como ceniza para mejorar las propiedades físico-mecánicas del hormigón.

1.3.2 Objetivos específicos

- a) Determinar la relación solución activadora alcalina/ceniza volante para incrementar el asentamiento del hormigón.
- b) Determinar la relación solución activadora alcalina/ceniza volante para reducir la permeabilidad del hormigón.
- c) Determinar la relación solución activadora alcalina/ceniza volante para mejorar la resistencia a la compresión del hormigón después de ensayos a altas temperaturas
- d) Determinar la relación solución activadora alcalina/ceniza volante para reducir la pérdida de masa del hormigón después de ensayos a altas temperaturas.

1.4 Delimitación de la investigación

1.4.1 Geográfica

De acuerdo a la investigación bibliográfica, la delimitación geográfica no está restringida a una región específica, va a depender de las necesidades y preferencias de construcción de los ejecutores.

1.4.2 Temporal

El desarrollo inició desde el mes de mayo 2023 con fecha de culminación en el mes de octubre del año 2023.

1.4.3 Temática

La presente investigación tiene como temática principal resaltar el uso de polímeros inorgánicos de tipo mineral como ceniza, para mejorar principalmente las propiedades mecánicas a altas temperaturas y disminuir la permeabilidad.

- Campo: Polímeros inorgánicos de tipo mineral como ceniza en el hormigón estructural
- Área académica: Tecnología del concreto
- Línea de investigación: Tecnología del concreto
- Sublínea de investigación: Diseño

1.4.4 Muestral

De las muestras se analiza la relación en peso entre la solución activadora alcalina y las cenizas volantes (SAA/FA) que forman el polímero inorgánico (geopolímero). Examinando resultados de diversos autores acerca del asentamiento, la permeabilidad, la resistencia a la compresión y pérdida de masa, estos dos últimos ensayados a temperaturas elevadas.

1.5 Justificación del estudio

1.5.1 Conveniencia

La presente investigación analiza el uso de polímeros inorgánicos tipo mineral como ceniza, el cual consideramos conveniente ya que busca reutilizar los desechos de industrias y mineras para la elaboración de un hormigón más sostenible, además de mejorar las propiedades físico-mecánicas.

1.5.2 Relevancia social

A consecuencia de las investigaciones que se han desarrollado hasta la actualidad concluyen que se puede preparar un hormigón con polímeros inorgánicos que cumple con todos los niveles de sostenibilidad además de mejorar propiedades físico-mecánicas del hormigón. Por consiguiente, la presente investigación se elabora porque el sector construcción necesita mejorar las propiedades físico-mecánicas del hormigón frente a diversas situaciones dentro de las cuales una de ellas son los incendios que generan temperaturas muy elevadas y afectan la integridad de las estructuras, y a su vez aminorar el impacto ambiental que este puede generar, por ello la finalidad es utilizar un hormigón más sostenible a base de la reutilización de residuos de actividades mineras o industriales.

1.5.3 Aplicaciones prácticas

La presente investigación busca la reutilización de residuos (cenizas volantes) de industrias y mineras, reemplazar totalmente el cemento por polímeros inorgánicos de tipo

mineral en la elaboración del hormigón y concluir si esta mejora las propiedades físico-mecánicas como el asentamiento, la permeabilidad, la resistencia a la compresión y pérdida de masa (estos dos últimos cuando el hormigón está expuesto a temperaturas elevadas).

1.5.4 Utilidad metodológica

El estudio realizado aporta valor teórico respecto al uso de polímeros inorgánicos de tipo mineral como ceniza para mejorar la resistencia de compresión a altas temperaturas y reducir la permeabilidad del hormigón. A partir de ello, consideramos que esta investigación puede ser de utilidad como antecedente para posteriores investigaciones que busquen mejorar las propiedades físico-mecánicas del hormigón con el uso de polímeros inorgánicos.

1.5.5 Valor teórico

En la presente investigación, se discutirá cómo las soluciones activadoras alcalinas en conjunto con las cenizas volantes las cuales forman polímeros inorgánicos de tipo mineral, mejoran las propiedades físico-mecánicas del hormigón frente a elevadas temperaturas, con la finalidad de usar los polímeros inorgánicos en reemplazo del cemento en la mezcla del hormigón, y así reforzar investigaciones pasadas de otros autores y servir como antecedente para investigaciones futuras.

1.6 Importancia del estudio

1.6.1 Nuevos conocimientos

El presente trabajo de investigación busca innovar en la rama de la construcción específicamente en el campo del hormigón, aprovechando materiales alternativos y reutilizables como son los polímeros inorgánicos “geopolímeros”.

La investigación de estos materiales innovadores es importante para reducir la contaminación producto de la preparación del hormigón, esto se presenta como una solución para la sustitución del cemento por los polímeros inorgánicos como materia prima.

Para ratificar el aporte e innovación nos basamos en artículos científicos, investigaciones y tesis, a manera de ratificar el uso de polímeros inorgánicos como sustituto de materia prima base para la preparación del hormigón.

Las investigaciones estudiadas son de carácter práctico por lo cual se puede validar el uso de polímeros inorgánicos en forma de cenizas para mejorar las propiedades físico-mecánicas del hormigón.

1.6.2 Aporte

La investigación del tema presentado planea generar un aporte determinando la relación óptima en peso entre la solución activadora alcalina y las cenizas volantes (SAA/FA) para la formación del polímero inorgánico, que sustituirá al cemento en la preparación del hormigón y con ello lograr mejoras en sus propiedades físico-mecánicas frente a temperaturas elevadas. Esta relación óptima de solución activadora alcalina con ceniza volante (SAA/FA) dejará un precedente de estudio en la rama del hormigón para futuras investigaciones que planeen implementar el uso de materiales alternativos como materia prima, ya sea para estudios descriptivos, así como aplicaciones prácticas.

1.7 Limitaciones del estudio

1.7.1 Falta de estudios previos de investigación

En nuestro país, este es un nuevo y novedoso tema en investigación, por lo que no hay referencias bibliográficas nacionales que realicen los ensayos al hormigón con polímeros inorgánicos, por lo tanto, se tomó referencias bibliográficas internacionales tanto actuales como previas al año de estudio, en las cuales encontramos suficiente información con datos prácticos para llevar a cabo el presente trabajo de investigación.

1.7.2 Metodológicos o prácticos

El método es descriptivo o documentado en función a referencias bibliográficas internacionales por lo que no existen restricciones o limitaciones respecto al método de estudio.

1.7.3 Medidas para la recolección de los datos

La recolección de datos fue por medio de artículos internacionales que investigan las propiedades físico-mecánicas del hormigón con polímeros inorgánicos.

1.7.4 Obstáculos en la investigación

Los obstáculos más resaltantes que se encuentran para esta investigación son los equipos necesarios para realizar los ensayos de resistencia a la compresión del hormigón expuesto a temperaturas elevadas, su pérdida de masa y el estudio de su permeabilidad. Es por ello que se opta por un estudio documentado con el cual, si se tiene acceso a datos prácticos ya estudiados y corroborados, por lo cual mediante este método de estudio no encontramos ningún obstáculo.

1.8 Alcance

Esta investigación tiene como alcance determinar la viabilidad del uso de polímeros inorgánicos para la producción de hormigón con mejora en sus propiedades físico-mecánicas a elevadas temperaturas. El área de investigación del presente estudio

documentado, es tecnología del concreto por causa de que se observó la influencia de polímeros inorgánicos como sustitución del cemento en el hormigón, resultando como fundamento para posteriores investigaciones sobre materiales cementantes suplementarios.

1.9 Viabilidad del estudio

Se determinó la viabilidad del tema de investigación, en virtud de que contamos con una amplia variedad de fuentes de información en la base de datos académica de la Universidad Ricardo Palma. Estas facilitaron los artículos internacionales. Al ser una investigación del tipo documental, se recopiló una serie de artículos vinculados con el tema para posteriormente realizar el análisis de datos.

CAPÍTULO II: MARCO HISTÓRICO

2.1 Marco histórico

En el siglo XVIII, se descubrió el favorable desempeño hidráulico de la combinación de arcilla y cal resistente a la actividad del agua de mar, posteriormente a esto se enfatiza en la búsqueda de un material con la propiedad de fortalecer abajo del agua en sustitución del mortero de endurecimiento lento. Es por ello que se profundizó en el estudio del desempeño de la combinación de piedra caliza con arcilla, llegando así a la conclusión que las propiedades hidráulicas provenían del efecto de calcinar la cal y arcilla. En 1824 se produce un cemento con una rigidez como la piedra de Portland, más tarde se le atribuye el nombre de cemento Portland, fue producto de una combinación de clinker molido alcanzado por la cocción de alrededor de los 1400 °C con un cierto aumento de yeso, “esta mezcla de materia calcárea-arcillosa convenientemente tratada se conoce como clinker, y su proceso como "clinkerización", que no es más que la cristalización del cemento” (Carles Romea, 2014, p.7).

Desde su aparición, el uso del Cemento Portland tal es su expansión que en pocos años se posiciona como un material de importancia vital en todo tipo de edificaciones. El año 1910 se establece como el final de la época, de esta fecha en adelante se ingresa en el llamado periodo clásico del hormigón armado. Una característica resaltante del hormigón, es la capacidad de soportar cargas a compresión; pero a pesar de tener esta resaltante propiedad, tiene grandes limitaciones ante la resistencia a la tracción. “Los valores y las direcciones de las tensiones son hoy previsibles por su diseño y cálculo. No obstante, es necesario compensar los esfuerzos destructores colocando –allí donde hay– piezas de un material que sea resistente a la tracción” (Carles Romea, 2014, p.7). En 1853 se construyó la primera edificación con armadura de hormigón armado con barras de hierro. En los años subsiguientes se definen diversos procedimientos como: hormigón plástico y hormigón hidráulico. El concepto de hormigón pretensado, se presenta a fines del siglo XIX, cuando se comprende el funcionamiento del hormigón armado, el cual sufre fisuras producto de la propiedad de la tracción. A finales de los 1930 se establece una técnica de aplicación que superaría al hormigón armado la cual sería el hormigón pretensado, este nuevo material impulsará el sector construcción. Lo que resalta este ciclo es la aprobación de esta nueva alternativa como un componente constructivo de uso principal en todo tipo de construcciones. “Su primera aplicación, con un éxito notable, la pudo aplicar en la consolidación de las cimentaciones profundas de la terminal de Le Havre del transatlántico Normandie” (Carles Romea, 2014, p.13). Desde inicios del siglo XX hacia

el ingreso de 1980, el uso del hormigón ha tenido cierta similitud en diversas partes. Ciertamente se presentan pequeñas variaciones en las dosificaciones, sin embargo, las características esenciales del hormigón aplicado en la construcción fueron similares y sobre todo ininterrumpidas. Existen cuatro parámetros sobre los cuales se puede actuar y conforman las principales características de un hormigón: “la consistencia y la trabajabilidad, la durabilidad, sus propiedades mecánicas y finalmente su aspecto exterior” (Carles Romea, 2014, p.13). Mediante el uso de fluidificantes es que se puede obtener una gran fluidez en hormigones autocompactantes y de alta resistencia, así mismo debido a su fragua acelerada se pueden minimizar notablemente las etapas constructivas, esto hace entrever un acontecer favorable para el hormigón prefabricado. Materiales nuevos conllevan al uso de nueva tecnología es así que, a manera de ejemplo, en pretensado convencional, el entubado de los cables lleva a magnitudes transversales importantes. “Esto se debe en parte a que los hormigones clásicos superan con dificultad los 40 MPa. Con el pretensado exterior, existe la posibilidad de bajar de forma drástica los espesores de las secciones, y más si se utilizan hormigones de más alta resistencia” (Carles Romea, 2014, p.14). Dentro de las innovaciones para hormigones se puede resaltar, por sus elevadas cualidades, las fibras utilizadas en hormigones. Existen diversos tipos de fibras: las más utilizadas son las fibras metálicas, sin embargo, además existen las de fibra de vidrio o polipropileno, y demás. Así mismo resalta el uso de polímeros inorgánicos o geopolímeros, de manera simple se puede indicar, que el hormigón geopolimérico se trata de un hormigón armado en un rango específico. Las características de este nuevo material serán determinadas por el uso o técnicas de aplicación de los polímeros, que inicialmente dependerá de diversos criterios en base a la dosificación o colocación en obra. En la actualidad existen formas de modelar nuevos materiales en función al desempeño de sus propiedades mecánicas, y, en función a las exigencias requeridas, modelar un material que satisfaga los requerimientos impuestos (Carles Romea, 2014).

2.2 Investigaciones relacionadas con el tema

2.2.1 Artículos relacionados con el tema

Ahmed et al. (2023) estudió al hormigón con geopolímeros de ultra alta resistencia con una solución activadora alcalina a base de hidróxido de potasio y silicato sódico, la solución activadora alcalina se compone de dióxido de silicio con un 29.2 %, óxido de sodio con 8.1 % y agua 62.7 %. Se realizaron muestras patrón en base a cenizas volantes, escoria granulada y humo de sílice, las cuales fueron sometidas a una temperatura elevada

iniciando con una temperatura ambiente de 27° llegando hasta los 800°C. Los resultados de resistencia residual a la edad de 56 días muestran que a una temperatura ambiente el hormigón con geopolímeros obtiene una resistencia de 137 MPa, el resultado más óptimo se obtuvo a la temperatura de 200°C con una resistencia de 164 MPa es decir un aumento del 20% de resistencia respecto a temperatura ambiente, mientras que el resultado más desfavorable sucedió a los 800°C con una resistencia de 38 MPa es decir un 64% menor a la resistencia inicial a temperatura ambiente.

Al-Bayati et al. (2022) determinaron la óptima relación de ceniza volante (FA) y escoria de alto horno (GGBFS) para mejorar las propiedades físico-mecánicas de un hormigón con geopolímeros autocompactante. Para los ensayos se realizaron 3 tipos de muestras 0FA-100GGBFS, 50FA-50GGBFS y 100FA-0GGBFS. La solución activadora está compuesta de Na_2SiO_3 (Na_2O :13.7 %, SiO_2 :33% y H_2O :53.3%). Los ensayos de asentamiento dieron como resultado 720 mm, 685 mm y 665 mm, mientras que la resistencia a la compresión para un hormigón con curado a 28 días y una temperatura al horno resulto en 34.3 MPa, 46.38 MPa y 49.44 MPa para las muestras 0FA-100GGBFS, 50FA-50GGBFS y 100FA-0GGBFS respectivamente. Los investigadores concluyen que el resultado óptimo para la resistencia a la compresión en un hormigón con geopolímeros se da con el 100% de escoria de alto horno en reemplazo del cemento tradicional logrando una resistencia de 49.44 Mpa para un hormigón autocompactante.

Aliabdo et al. (2018) investigan la permeabilidad del hormigón geopolimérico, para 3 diseños de mezcla, los resultados obtenidos son por medio del ensayo de porcentaje de absorción del agua. Para el hormigón geopolimérico la relación de SAA/FA (Solución Activadora Alcalina / Cenizas Volantes) tiene valor de 0.30, 0.40 y 0.45 para cada uno de los diseños. Los resultados mostraron que el GPC (Hormigón Geopolimérico) tiene una menor permeabilidad baja para los 02 primeros diseños que tienen un SAA/FA de 0.30 y 0.40, ya que tienen un porcentaje de absorción de 5.70% y 5.06% a comparación del tercer diseño con SAA/FA de 0.45, cuyo porcentaje de absorción sobrepasa el 6%, indicando que esta muestra ya no es considerada de baja permeabilidad

Anne & Chand (2023) usan cenizas volantes de clase F como material precursor, una relación $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ de 1.25 como puede observarse en la Tabla 1, una (SAA/FA) relación de solución activadora alcalina/cenizas volantes de 0.45 y realizó ensayos con molaridades de NaOH de 12, 14 y 16 como se observa en la Tabla 2. En la investigación se mostró que las mezclas con una molaridad de 14, que incluyen superplastificante tienen mayores valores de asentamiento los cuales se muestran Figura 2 y 3. Además, los

mejores resultados de compresión y tracción se mostraron para la mezcla Nro. 13, con el uso de una molaridad de 14, los resultados se observan en la Figura 4 y 5.

Tabla 1

Parámetros de diseño

Característica	Descripción
Agua/aglutinante	0.3
Na ₂ SiO ₃ /NaOH	1.25
Solución/FA	0.45
Tiempo curado	24hrs
Concentración de NaOH (Ms)	12, 14 y 16 Ms
Temperatura de curado	30 °C, 60 °C y 90 °C
Superplastificante de naftaleno	1, 1, 5, 2, 3% de masa de cenizas volantes

Nota. Anne & Chand (2023)

Tabla 2

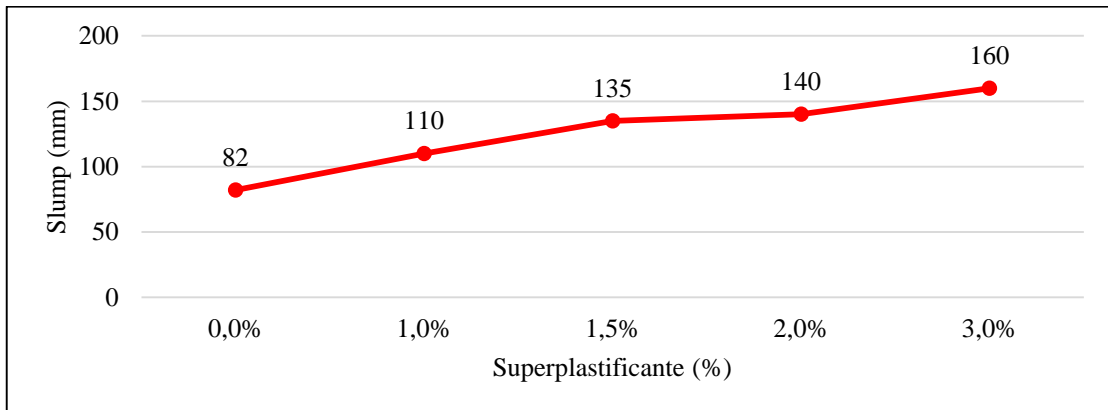
Detalle de mezclas

ID	Molaridad (Ms)	Edad de prueba	Temp. Curado (°c)	f'c (MPa)	SP (%)	Slump (mm)
1	8	7	60	20.45	0	100
2	8	28	60	39.1	0	100
3	10	7	60	26	0	90
4	10	28	60	42.7	0	90
5	12	7	30	28.85	0	85
6	12	28	30	39.8	0	85
7	12	7	60	37.3	0	85
8	12	28	60	55.5	0	85
9	12	7	90	39.1	0	85
10	12	28	90	64	0	85
11	14	7	30	30	0	82
12	14	7	60	44	0	82
13	14	28	60	66.7	0	82
14	14	7	90	46.5	0	82
15	14	28	90	68.3	0	82
16	16	7	30	26	0	80
17	16	28	30	38.5	0	80
18	16	7	60	36.5	0	80
19	16	28	60	53	0	80
20	16	7	90	39	0	80
21	16	28	90	62.7	0	80
22	14	7	90	45	1%	110
23	14	28	90	67.8	1%	110
24	14	7	90	48.6	1.50%	135
25	14	28	90	68.05	1.50%	135
26	14	7	90	47	2%	140
27	14	28	90	67.9	2%	140
28	14	7	90	44.3	3%	160
29	14	28	90	64.9	3%	160

Nota. Anne & Chand (2023)

Figura 2

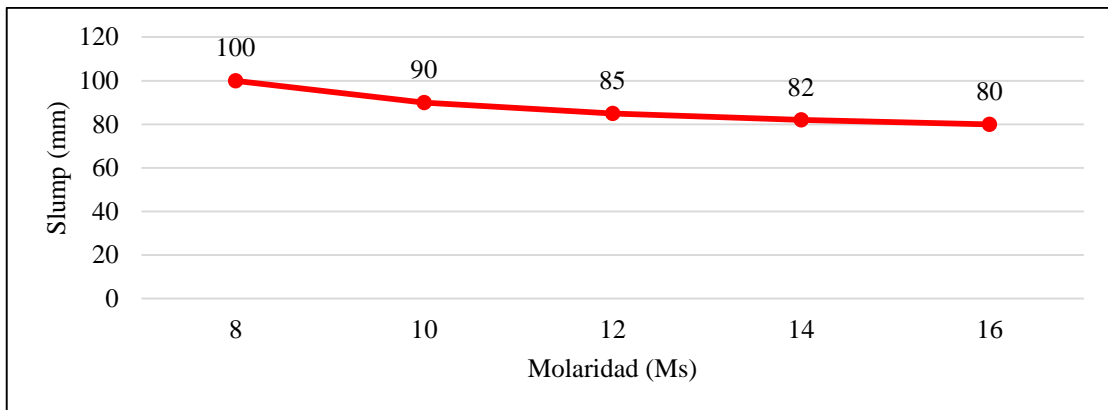
Asentamiento con molaridad =14



Nota. Anne & Chand (2023)

Figura 3

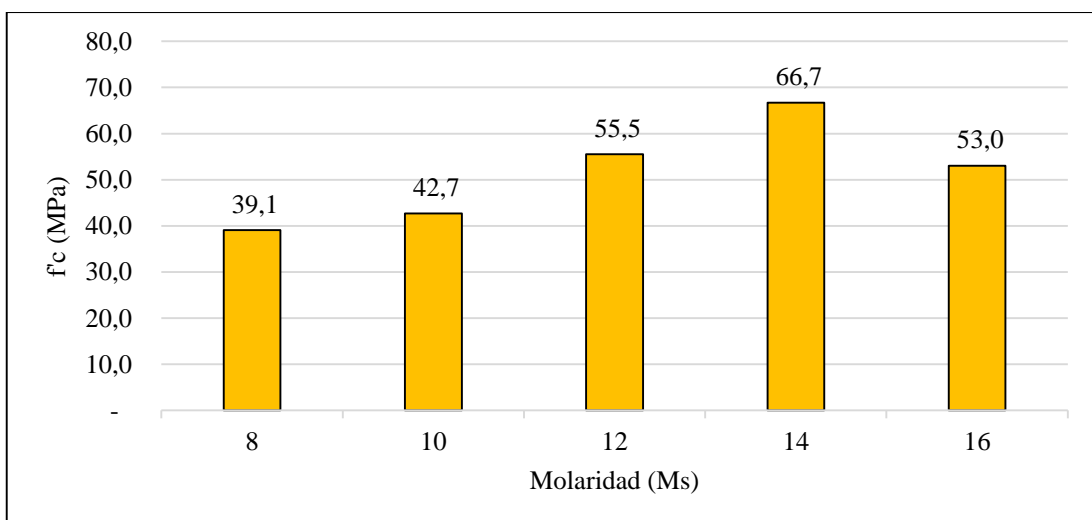
Asentamiento según la molaridad (Ms)



Nota. Anne & Chand (2023)

Figura 4

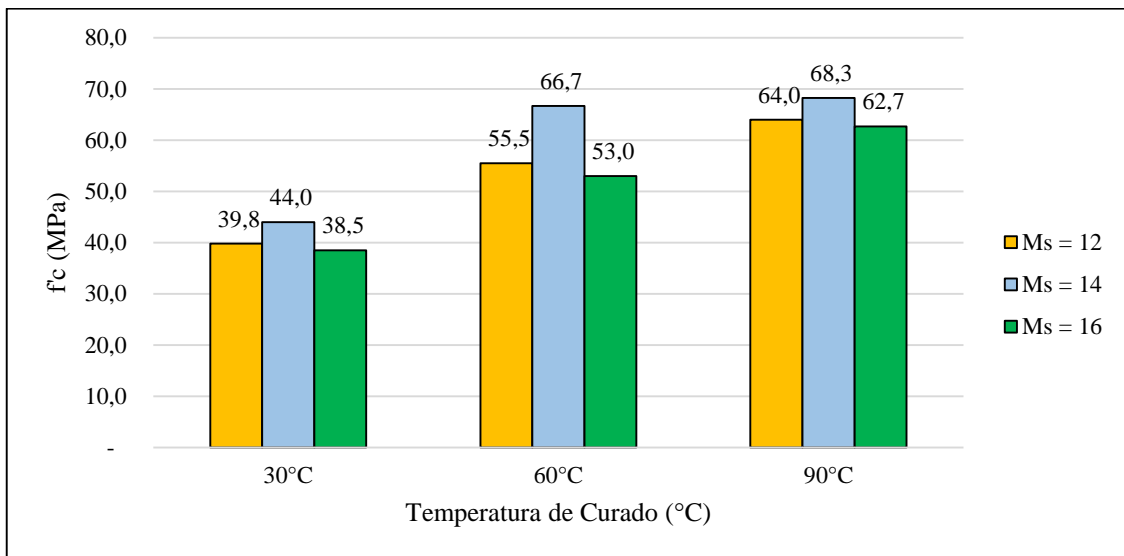
Resistencia a la compresión según la molaridad (Ms)



Nota. Anne & Chand (2023)

Figura 5

Resistencia a la compresión según la temperatura de curado



Nota. Anne & Chand (2023)

Atabey et al. (2020) realizaron 4 diseños de mezclas de GPC los cuales pueden observarse en la Tabla 3, todos los diseños tienen una relación SS/SH = 1.5 y las relaciones de SAA/FA son 0.15, 0.20, 0.30 y 0.40 para las mezclas N°1, N°2, N°3 y N°4 respectivamente. En la Figura 6 se observan las muestras de los diseños de mezclas se realizaron los ensayos de porcentaje de absorción de agua (%) y profundidad de penetración del agua (mm). Los autores concluyeron que la baja permeabilidad se debe al aumento de la relación de SAA/FA, a medida que aumenta esta relación, los valores de permeabilidad disminuyen, los resultados se observan en la Figura 7 y 8.

Figura 6

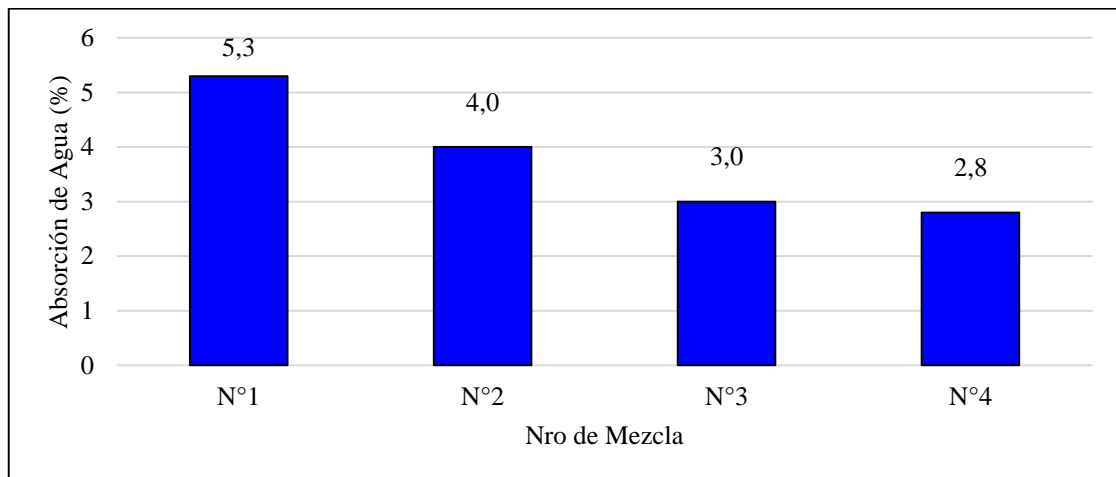
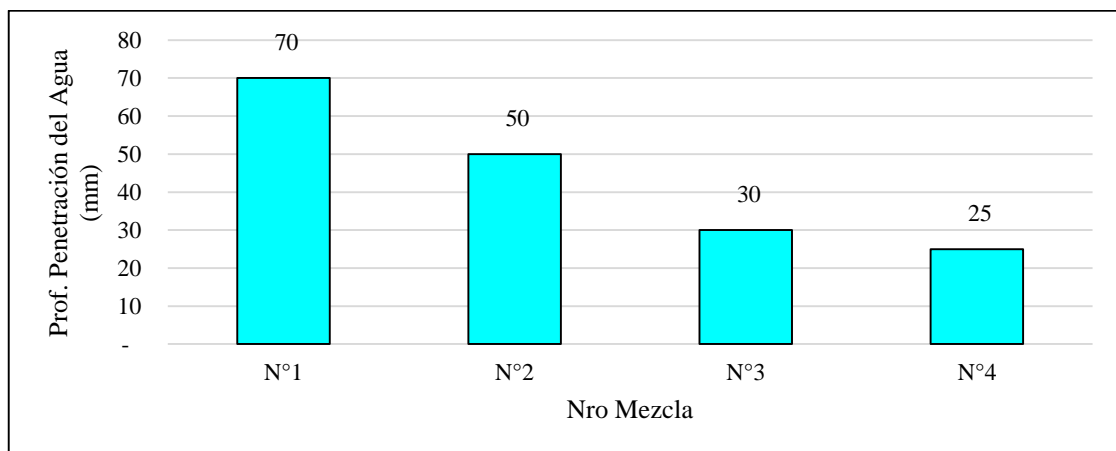
Prueba de profundidad de penetración del agua (mm)



Nota. Atabey et al. (2020)

Tabla 3*Composición de mezclas de hormigón geopolimérico*

Nro Mezcla	Ceniza Volante (gr)	Agregados (gr)	Agua (gr)	Na ₂ SiO ₃ (gr)	NaOH (gr)	SAA/FA	SS/SH
1	450.00	1350.00	135.00	42.16	28.27	0.15	1.50
2	450.00	1350.00	135.00	63.25	42.40	0.20	1.50
3	450.00	1350.00	135.00	84.33	56.53	0.30	1.50
4	450.00	1350.00	135.00	105.41	70.66	0.40	1.50

*Nota. Atabey et al. (2020)***Figura 7***Resultado de absorción de agua (%)**Nota. Atabey et al. (2020)***Figura 8***Resultado de profundidad de penetración del agua (mm)**Nota. Atabey et al. (2020)*

Balaji et al. (2021) investigan la permeabilidad del hormigón convencional y del hormigón geopolimérico. Los resultados obtenidos son por medio del ensayo de porcentaje de absorción del agua. Para el hormigón geopolimérico la relación de SS/SH (Silicato de Sodio / Hidróxido de Sodio) es igual a 6 y la relación de SAA/FA (Solución Activadora Alcalina / Cenizas Volantes) tiene valor de 0.40. La relación a/c (agua / cemento) del hormigón convencional es de 0.40. Los resultados para ambos casos, mostraron que el GPC (Hormigón Geopolimérico) tiene una menor permeabilidad que el hormigón convencional. Los resultados obtenidos del porcentaje de absorción de agua para el GPC y OPC son de 1% y 4% respectivamente.

Bellum et al. (2020) determinaron el efecto de las escorias de alto horno (GGBFS) a las cenizas volantes (FA) en el desempeño del hormigón con geopolímeros. En los ensayos utilizaron una concentración de 8 Moles para la solución activadora (Na_2O :14.50%, SiO_2 :29.60% y H_2O :55.90%), para la relación de solución activadora/ceniza volante (SAA/FA) el valor fue de 0.4 mientras que la relación de solución alcalina fue de 2.5. Los ensayos de asentamiento dieron como resultado para el uso de cenizas volantes (FA) sin adición de escorias de alto horno (GGBFS) un valor de 82 mm, mientras que al adicionar GGBFS se redujo los valores del asentamiento resultando en su valor más desfavorable con 53 mm al adicionarle un 60% de GGBFS respecto a las cenizas volante. Para el caso de la resistencia a la compresión ocurre lo contrario, el 100% de ceniza volante en la mezcla obtuvo la resistencia inicial más baja con un valor de 21.41 MPa curado ambiente a 28 días, mientras que al adicionar una 60% de GGBFS respecto a la ceniza volante se obtuvo el valor más favorable para la resistencia con un valor de 55.63 MPa superando también a una muestra patrón de hormigón con cemento tradicional; lo mismo sucede con los valores de la resistencia a la flexión, para un 100% de ceniza volante en la mezcla se obtuvo un valor de 3.2 MPa, mientras que al adicionar un 60% de GGBFS respecto a la ceniza volante se logró el valor óptimo de 8.61 MPa a un curado de 28 días superando los resultados de todos los especímenes ensayados e inclusive la muestra patrón de hormigón con cemento tradicional (OPC).

Çelik et al. (2022) usan cenizas volantes de clase F como material precursor y usó una molaridad de 14 NaOH para preparar la solución activadora alcalina junto con Na_2SiO_3 , la composición se observa en la Tabla 4 y 5. Se hicieron ensayos con valores de (SAA/FA) relación solución activadora alcalina/ceniza volante de 0.60 y 0.85. Se evidencia que el asentamiento es mayor en las mezclas que incluyen superplastificante. Se concluye que la mejor dosificación es para una relación SAA/FA de 0.60, incluyendo

superplastificante, donde se logra obtener resistencia a la compresión de 42 MPa como se observa en la Figura 10 y un asentamiento de 21 cm cuyo resultado se muestra en la Figura 9. Superando a la muestra patrón de hormigón convencional diseñado a 40 MPa.

Tabla 4

Materiales de mezcla de hormigón geopolimérico

Grupo	Ceniza	NaOH	Na ₂ SiO ₃	SS/SH	SAA / FA	Agregado (gr)		Plastificante (gr)
	volante FA (gr)	SH (gr)	SS (gr)			Fino	Grueso	
GPC1	2200	528	792	1.5	0.60	3485	6471	0
GPC2	2200	528	1320	2.5	0.85	3485	6471	0
GPC3	2200	378	943	2.5	0.60	3485	6471	0
GPC4	2200	528	792	1.5	0.60	3485	6471	0
GPC5	2200	528	792	1.5	0.60	3485	6471	33
GPC6	2200	748	1122	1.5	0.85	3485	6471	0
GPC7	2200	748	1122	1.5	0.85	3485	6471	33
OPC8	OPC (Ordinary Portland Cement) se produce en una planta de hormigón con una resistencia de 40MPa							

Nota. Çelik et al. (2022)

Tabla 5

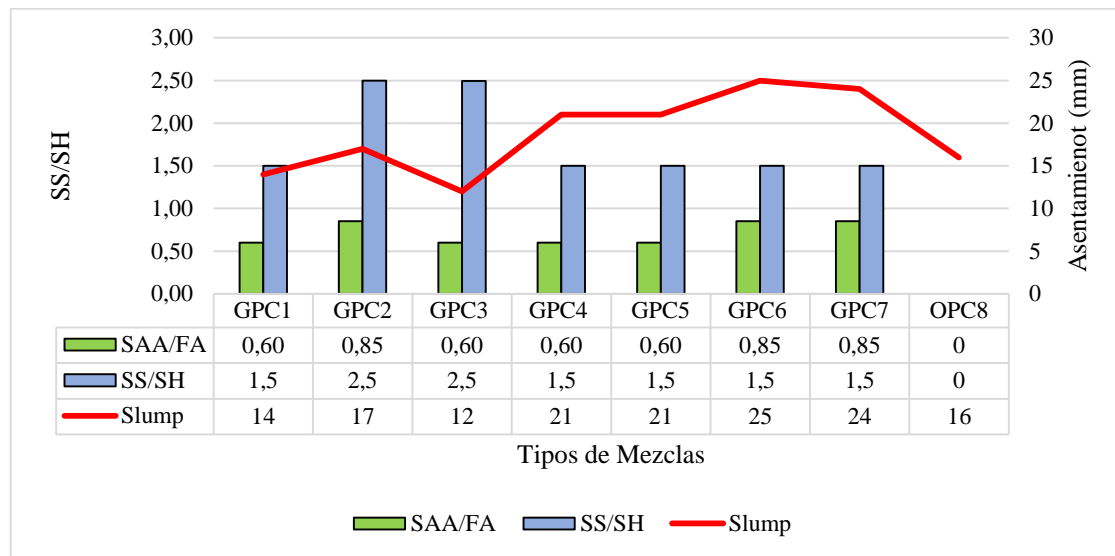
Pesos promedio de asentamiento y volumen

Nombre de grupo	Asentamiento (cm)	Resistencia compresión (MPa)
GPC1	14	35
GPC2	17	30
GPC3	12	37.5
GPC4	21	40
GPC5	21	42
GPC6	25	34
GPC7	24	25
OPC8	16	40

Nota. Çelik et al. (2022)

Figura 9

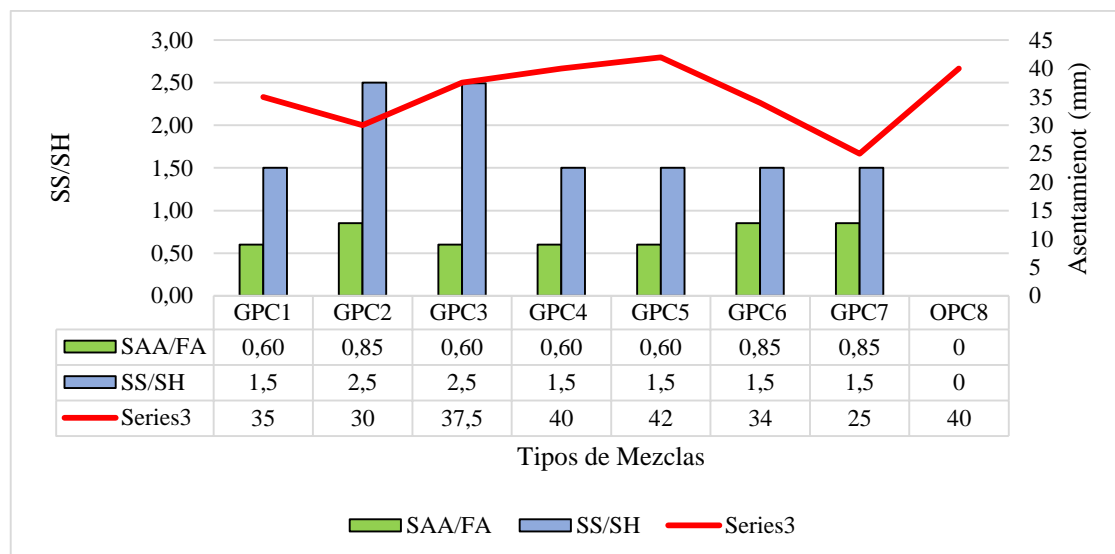
Resultados del asentamiento (mm)



Nota. Çelik et al. (2022)

Figura 10

Resultado de resistencia a la compresión (MPa)



Nota. Çelik et al. (2022)

Dissanayake et al. (2022) investigan los resultados de resistencia a la compresión del hormigón geopolimérico a temperatura ambiente. El tipo de curado que utilizan es al horno. El curado al horno a 28 días a una temperatura de 28°C resulta un $f^c = 31.21$ MPa, el curado 28 días a una temperatura de 40°C resulta un $f^c = 32.29$ MPa, el curado 28 días a una temperatura de 60°C resulta un $f^c = 57.34$ MPa y el curado 28 días a una temperatura de 80°C resulta un $f^c = 48.90$ MPa. Hay un punto de inflexión cuando la

temperatura de curado sobrepasa los 60°C, lo que afecta la resistencia a la compresión final.

Farida et al. (2023) investigan los resultados de resistencia a la compresión del hormigón geopolimérico a temperatura ambiente. Para comprobar qué tipo de curado resulta mejor para el GPC, el curado se realiza con agua y en el horno. Luego del curado al agua se ensayó la muestra de GPC y se obtuvo una resistencia a la compresión de 16.26 MPa. Para la muestra de GPC curado al horno a una temperatura de entre 60°C-90°C, la resistencia a la compresión fue de 18.12 MPa. Recomendando así que estos tipos de hormigones se curen al horno para lograr mayores resistencias de compresión.

Hardjasaputra et al. (2019) determinaron ensayos en hormigón con geopolímeros en función a valores de molaridades siendo estos 2 M, 4 M, 6 M, 8 M, 12 M y 16 M, con la finalidad de determinar el incremento en la resistencia a la compresión del hormigón. Para los ensayos se utilizó una relación de solución activadora alcalina/ceniza volante (SAA/FA) de 0.50. Los resultados de resistencia a la compresión arrojaron valores en un rango de 27 MPa hasta 67 MPa dependiente el tipo de curado y la molaridad utilizada; el valor más bajo resultó para una molaridad de 2 M con curado al horno resultando en 27 MPa, mientras que con una molaridad de 16 M y un curado al vapor se obtuvo un resultado de concreto de alta resistencia con 67 MPa.

Hassan et al. (2020) realizaron 3 diseños de mezclas los cuales se muestran en la Tabla 6, GPC-H, GPC-A y OPC-T donde GPC significa Hormigón Geopolimérico, -H significa curado del horno, -A significa curado al ambiente y OPC-T significa Hormigón Portland Ordinario curado en agua. La velocidad de calentamiento fue de 5°C/min, luego del ensayo las muestras se sacaron del horno y se enfriaron a temperatura ambiente. Las muestras curadas al horno estuvieron allí a 75°C por 24 horas, mientras que las muestras curadas a temperatura ambiente se mantuvieron así hasta el momento del ensayo.

Los investigadores indican las grietas en la superficie de las muestras de GPC y OPC, se debe a la diferencia de temperatura entre el centro y la superficie de las muestras, las grietas son mucho más notorias en las muestras de OPC más allá de los 400°C, lo que se atribuye a la rápida condición de absorber y retener la humedad. A los 600°C la variación de temperatura entre la superficie y el centro de las muestras es tan alta que desarrolla una tensión diferencial considerable entre las muestras, esta deformación diferencial aumenta el agrietamiento de la superficie, esto se observa en la Figura 11. En el caso de las muestras de GPC el agrietamiento fue menor a comparación de las muestras de OPC.

A los 800°C las grietas eran más pequeñas y difíciles de notas en las muestras de GPC en comparación con las de OPC.

Por lo tanto, el agrietamiento extenso del hormigón OPC indica que puede reducirse su área transversal efectiva cuando se expone a altas temperaturas y tal reducción puede eventualmente reducir la capacidad de sus propiedades mecánicas como se observa en la Tabla 7. El agrietamiento relativamente menor del hormigón geopolimérico indica su mejor resistencia al fuego, esto puede observarse en la Figura 12).

Para las muestras ensayadas GPC-H y GPC-A se usó una relación de SS/SH (Silicato de Sodio / Hidróxido de Sodio) de 1.75 y una relación de solución SAA/FA (activadora alcalina/cenizas volantes) de 0.45.

Se indica que OPC-T: Hormigón Ordinario Portland, GCT-H: GPC Curado al Horno, GCT-A: GPC Curado al Ambiente, FA: Cenizas Volantes, SS: Silicato de Sodio, SH: Hidróxido de Sodio.

Tabla 6

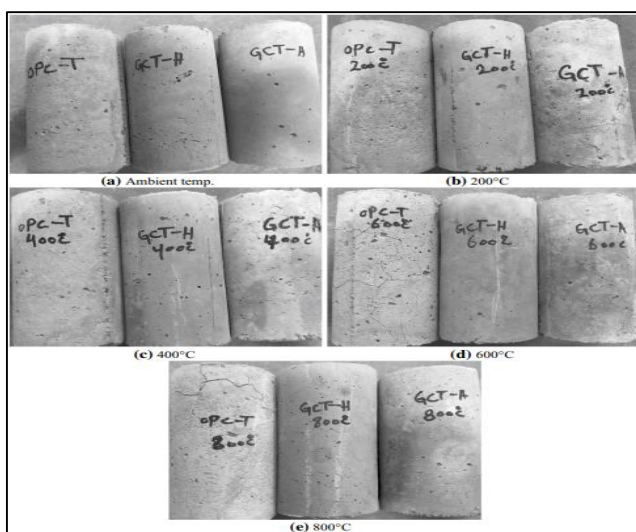
Combinación de mezclas de hormigón GPC y OPC (kg/m³)

Mezcla nro.	Etiqueta	OPC	Ag. Grueso	Ag. Fino	FA	SS	SH	Agua	Curado
1	GPC-H	0	1044.4	530.6	410	117.4	67.1	79.2	75°C
2	GPC-A	0	1044.4	530.6	410	117.4	67.1	79.2	Ambiente
3	OPC-T	400	1072	622	0	0	0	190	Agua

Nota. Hassan et al. (2020)

Figura 11

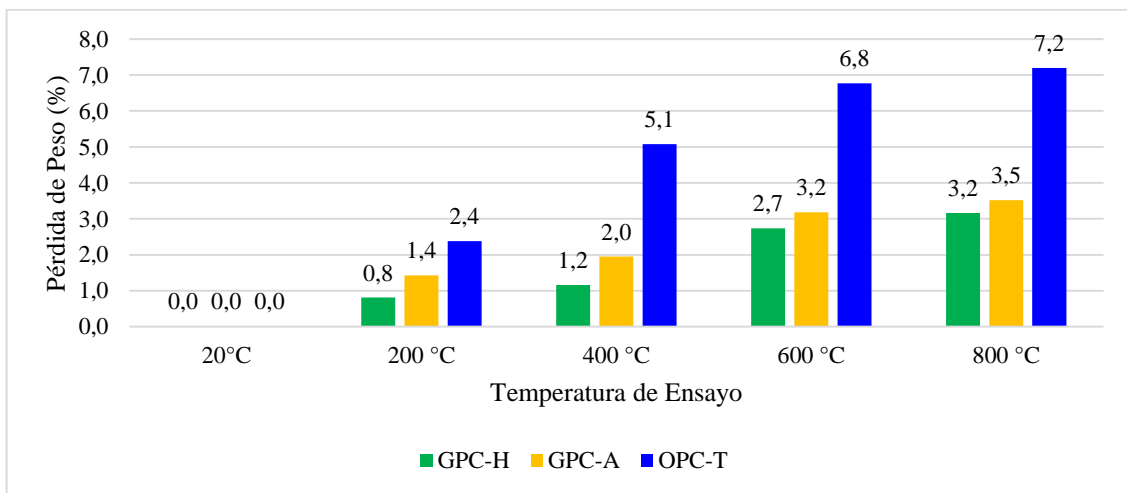
Patrón grietas del hormigón GPC y OPC a temperatura elevada



Nota. Hassan et al. (2020)

Tabla 7*Pérdida de masa (%) de GPC y OPC expuestos a altas temperaturas*

Temperatura (°C)	Pérdida de masa (%)		
	GPC-H	GPC-A	OPC-T
20°C	0.0	0.0	0.0
200 °C	0.8	1.4	2.4
400 °C	1.2	2.0	5.1
600 °C	2.7	3.2	6.8
800 °C	3.2	3.5	7.2

Nota. Hassan et al. (2020)**Figura 12***Pérdida de masa (%) de GPC y OPC expuestos a altas temperaturas**Nota.* Hassan et al. (2020)

Ibrahim et al. (2019) tuvieron como objetivo reducir la densidad de un hormigón con geopolímeros y un agente espumante (polioxietilen alquiléter sulfato) esto mediante la exposición a elevadas temperaturas, se utilizó una relación de solución activadora alcalina/ceniza volante de 2.5 y una relación de ceniza volante/solución activadora alcalina de 2, así mismo para el agente espumante se usó una relación 1/10. La resistencia inicial del hormigón con geopolímeros sin exponer a temperatura ambiente y sin agente espumante fue de 47 MPa, los resultados de los ensayos muestran una disminución en el hormigón con geopolímeros y agente espumante a medida que aumenta la temperatura a 200°C, 400°C, 600°C y 800°C con resistencias de 33.26 MPa, 27.72 MPa, 19.40 MPa y 18.62 MPa respectivamente, sin embargo la densidad a temperatura ambiente del hormigón con geopolímero resultó de 1813,79 kg/cm³ la cual se redujo al aumentar la

temperatura a 200°C, 400°C, 600°C y 800°C dando resultados de 1493.65 kg/cm³, 1418.56 kg/cm³, 1314.35 kg/cm³ y 1294 kg/cm³ respectivamente. Los autores concluyen que a una temperatura de 400°C el hormigón con geopolímeros y agente espumante reduce favorablemente la densidad del material respecto al hormigón convencional.

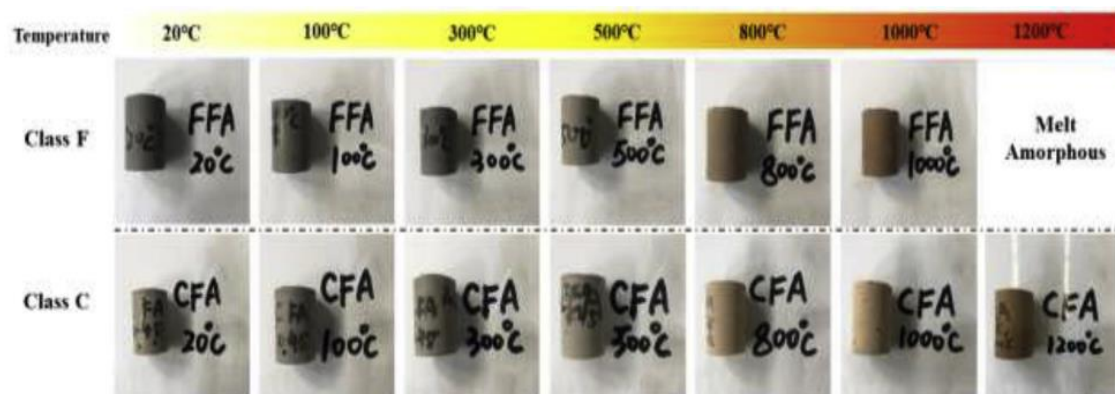
Jiang et al. (2020) realizaron 2 diseños de mezclas los cuales se observan en la Tabla 8, F-GPC y C-GPC, donde GPC significa Hormigón Geopolimérico, F y C es la clase de ceniza volante usada. Todas las muestras fueron curadas en horno a una temperatura de 60°C durante 24 horas y posteriormente se retiraron del horno para dejarlas enfriar a temperatura ambiente. Todas las muestras se curaron a temperatura constante de 20°C y 95% de humedad por un total de 28 días, los especímenes se muestran en la Figura 13.

La pérdida de masa de las muestras a una temperatura entre 20°C y 100°C se debió a la evaporación del agua físicamente unida contenida en el GPC, cuando la temperatura sobrepasó los 300°C se produjo la deshidroxilación de los grupos OH y después de sobrepasar los 800°C la pérdida de masa se atribuyó a la descomposición de compuestos en la matriz del geopolímero, los resultados se observan en la Figura 14.

Para las muestras ensayadas F-GPC y C-GPC se usó una relación de SS/SH (Silicato de Sodio / Hidróxido de Sodio) de 2.00 y una relación de solución activadora alcalina/cenizas volantes de 0.45.

Figura 13

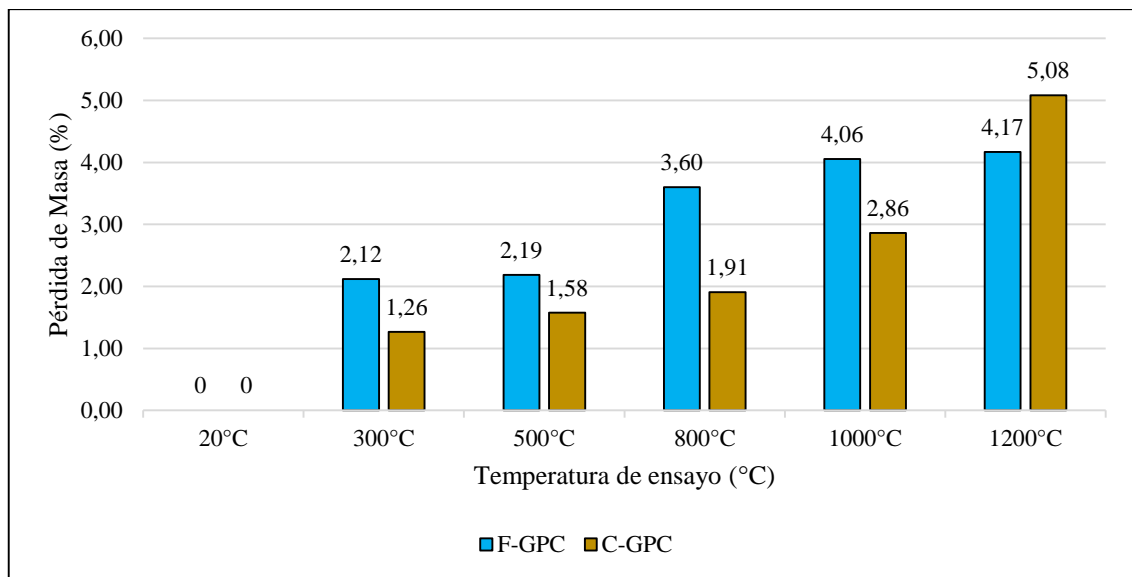
Cambios en la superficie de las probetas F-GPC y C-GPC



Nota. Jiang et al. (2020)

Tabla 8*Proporciones de mezclas de especímenes de geopolímero*

Especímenes	FA Clase	FA Clase	Solución	Solución	Relación AA/FA
	C (gr)	F (gr)	NaOH (gr)	Na ₂ SiO ₃ (gr)	
F-GPC	0	1000	150	300	0.45
C-GPC	1000	0	150	300	0.45

Nota. Jiang et al. (2020)**Figura 14***Pérdida de masa (%) de F-GPC y C-GPC**Nota.* Jiang et al. (2020)

Jindal et al. (2018) buscaban medir permeabilidad del hormigón geopolimérico, para esto elaboraron 2 diseños de mezclas, en todos los casos la relación de SS/SH (Silicato de Sodio / Hidróxido de Sodio) es igual a 2.5 y la relación de SAA/FA (Solución Activadora Alcalina / Cenizas Volantes) tiene valores de 0.40 y 0.45 para cada una de los diseños. La permeabilidad de las muestras de hormigón geopolimérico se midió con el ensayo de profundidad de penetración del agua. Los resultados indican que hay una menor penetración del agua en la mezcla donde se utiliza una relación SAA/FA de 0.45. Los resultados para el primer y segundo diseño de mezcla muestran resultados de 27 mm y 22 mm respectivamente.

Junaid et al. (2017) estudiaron las propiedades de resistencia a la compresión y pérdida de masa, ambos sometidos a diversas temperaturas. La mezcla de solución alcalina se basó en silicato de sodio con una solución de 12 Moles con un ratio de solución de 2.5 y un factor para solución y ceniza volante de 0.50, asimismo se utilizaron 3 tipos

de muestras con resistencia de 40 MPa, 50 MPa y 60 MPa como resistencia inicial. Las temperaturas para someter las muestras fueron de 100°C, 200°C, 300°C, 400°C y 800°C. Como resultado de los ensayos se concluye que en el rango de temperatura ambiente a los 200°C las muestras disminuyen la resistencia a la compresión, así mismo se observa pérdida de masa; mientras que para el rango de 200°C y 400°C los autores recalcan que en este rango se obtiene el mayor aumento en la resistencia a la compresión para el hormigón geopolimérico; finalmente para una temperatura de 800°C todas las muestras resultan en una reducción a la resistencia a la compresión.

Kanagaraj et al. (2022) realizaron 4 diseños de mezclas los cuales se observan en la Tabla 9, GPC-NA, GPC-NO, GPC-HA, GPC-HO, donde GPC significa Hormigón Geopolimérico, N significa de resistencia normal, H significa de alta resistencia, O significa curado al horno y ha curado al ambiente. Del total 180 muestras un juego se curaron en el horno a una temperatura de 60°C por un tiempo de 24 horas, otro juego se curó a temperatura ambiente y un tercer juego se curó a temperatura ambiente hasta el día de la prueba, los especímenes se muestran en la Figura 15. Los porcentajes de pérdida de masa se determinaron midiendo la diferencia de peso antes y después de exponerlas a temperaturas elevadas. Las muestras fueron expuestas a altas temperaturas luego de los 28 días de curado. Las temperaturas de ensayo fueron 821°C (30 minutos de duración), 925°C (60 minutos de duración), 986°C (90 minutos de duración) y 1029°C (120 minutos de duración) desde una temperatura ambiente (Etapa I) siguiendo la curva de fuego del estándar ISO 834, luego las muestras se mantuvieron a la temperatura máxima por 1 hora para lograr una temperatura uniforme en toda la muestra (Etapa II) y finalmente las muestras se dejaron dentro del horno para que se enfriarán naturalmente hasta llegar a una temperatura ambiente (Etapa III) los datos se observan en la Figura 16. En la Tabla 9 se muestra que para las muestras ensayadas se usó una relación de SS/SH (Silicato de Sodio / Hidróxido de Sodio) de 1.5 y una relación de solución activadora alcalina/cenizas volantes de 0.45.

Como se puede ver en la Figura 17 y Tabla 10, la menor pérdida de masa se halló en la muestra de GPC-NO, pero es muy parecida a los valores de las demás muestras, además se desarrollaron grietas más finas en las muestras de GPC a la temperatura de 821°C y a partir de allí se ensancharon a medida que aumenta el tiempo de calentamiento y la temperatura como se puede ver en los testigos de la Figura 18. El autor menciona que las fallas de las muestras pueden atribuirse a formación de grietas en la superficie caliente y al desarrollo de la presión interna del agua intersticial (agua atrapada dentro de los poros

y vacíos entre las partículas de los materiales que componen el hormigón), la variación de la temperatura en la superficie y en el núcleo de la probeta del hormigón provoca la rotura.

Los resultados concluyen mostrando que, para las muestras, a los 821°C la f'_{cr} (resistencia a la compresión residual) se encuentra entre el 70-75%, a los 925°C la f'_{cr} se encuentra entre 30-35%, a los 986°C la f'_{cr} se encuentra entre 25-35% y a los 1029°C se encuentra entre 20-25% de la f'_{cr} inicial que se encontraba a 30°C con un valor de 42 Mpa. De la tabla 9, SH: Hidróxido de Sodio, SS: Silicato de Sodio y de la tabla 10, GPC: Hormigón Geopolimérico, H: Alta Resistencia, N: Resistencia Normal, A: Curado al Ambiente, O: Curado al Horno.

Figura 15

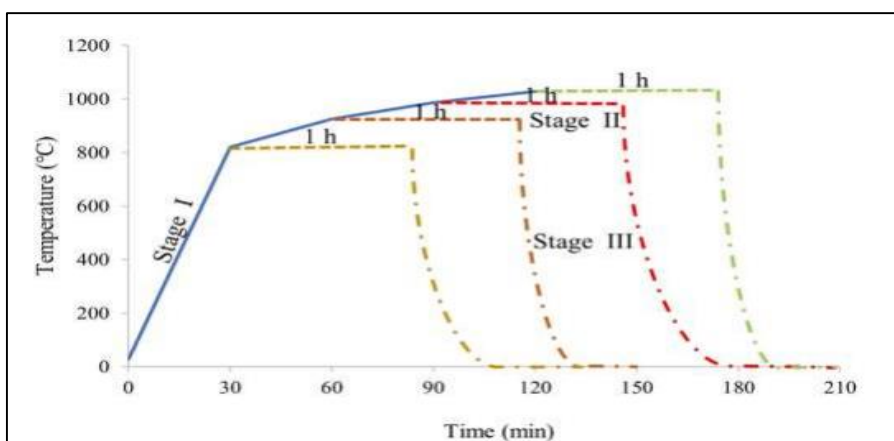
Calentamiento de muestras de GPC (Geopolymer Concrete)



Nota. Kanagaraj et al. (2022)

Figura 16

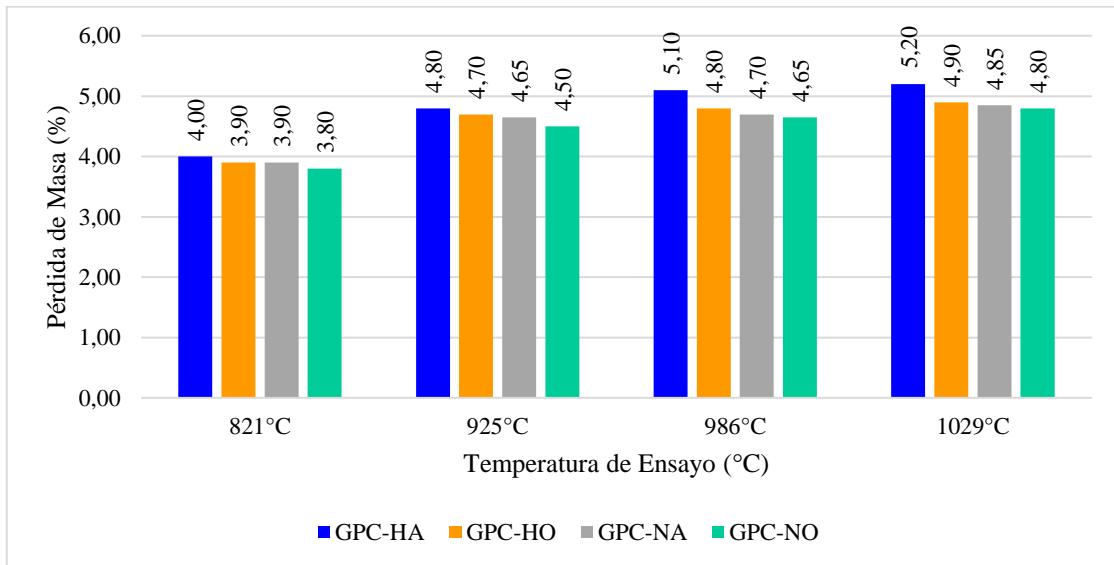
Curva tiempo – temperatura



Nota. Kanagaraj et al. (2022, p.4)

Figura 17

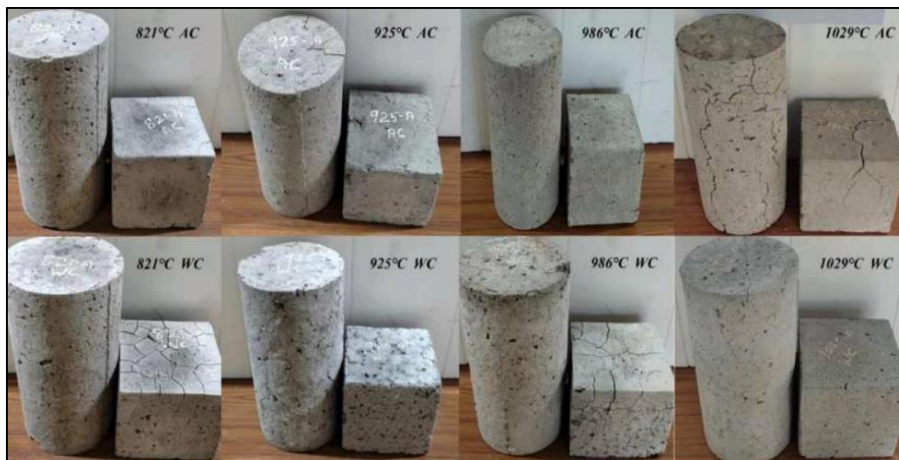
Porcentaje de pérdida de masa (%)



Nota. Kanagaraj et al. (2022)

Figura 18

Cambios en la superficie de muestras de GPC



Nota. Kanagaraj et al. (2022)

Tabla 9

Diseño de mezclas (kg/m^3)

ID Mezcla	Cenizas Volantes	Ag. Fino	Ag. Grueso	SH	SS
GPC-NA	500	650	1250	88.32	132.48
GPC-NO	500	650	1250	88.32	132.48
GPC-HA	500	650	1250	88.32	132.48
GPC-HO	500	650	1250	88.32	132.48

Nota. Kanagaraj et al. (2022)

Tabla 10*Porcentaje de pérdida de masa (%)*

Temperatura de Ensayo (°C)	GPC-HA	GPC-HO	GPC-NA	GPC-NO
821°C	4.00	3.90	3.90	3.80
925°C	4.80	4.70	4.65	4.50
986°C	5.10	4.80	4.70	4.65
1029°C	5.20	4.90	4.85	4.80

Nota. Kanagaraj et al. (2022)

Kannangara et al. (2021) estudiaron las propiedades físico-mecánicas del hormigón con geopolímeros y el hormigón RPC; para el estudio se realizaron muestras cúbicas, se utilizó hidróxido de sodio y silicato de sodio con molaridad de 8M, la composición de la solución se determinó en porcentajes de 26.2% para el Na₂O y 73.8% para el agua. Para el diseño de mezcla se utilizaron dos ratios de 0.4 y 0.57 para la SAA/FA (solución activadora alcalina/Ceniza Volante), mientras que para el caso de la solución SS/SH (Silicato de sodio/Hidróxido de sodio) se utilizaron ratios de 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 y 2.5. Como parte de los resultados iniciales para la trabajabilidad de la mezcla, se determinó que para un ratio de 0.4 los resultados eran inferiores que para 0.57, esto determina que a mayor SAA/FA se obtiene una mejor trabajabilidad de la mezcla, dentro de los resultados se obtuvo que el menor valor para la trabajabilidad fue de 280 mm y el mayor fue de 335 mm. Respecto a la resistencia a la compresión a elevadas temperaturas los autores concluyen que todas las muestras con ratio 0.4 obtuvieron mayores resistencias iniciales, esto puede ser debido a la densa microestructura que se produce al uso de una menor SAA/FA, dando lugar a menor porosidad, adicionalmente se vio un crecimiento constante a medida del aumento del ratio SS/SH, esto debido a que el aumento del silicato de sodio potencia la reacción de geopolimerización dando una mayor resistencia. Respecto a la resistencia a la compresión, el mayor valor a temperatura ambiente se dio para el GP05 con casi 75 MPa y el menor valor para el GP06 con un poco más de 20 MPa, mientras que a temperatura de 400°C para el GP04 se obtuvo un valor casi similar superando los 70 MPa y el valor más desfavorable en GP06 con un poco menos de 20 MPa, finalmente sometiendo las muestras a 800°C se obtuvo el mayor valor para GP03 llegando casi a los 50 MPa y el menor valor para GP07 con un valor menor a los 10 MPa.

Kavipriya et al. (2023) examinaron las propiedades de resistencia a la compresión, capacidad de absorción y porosidad del hormigón geopolimérico. Utilizaron 12 mezclas donde, las cenizas volantes son de clase F, con proporciones de 350 kg/m³, 450 kg/m³ y 550 kg/m³. La relación de SS/SH (Silicato de sodio/Hidróxido de Sodio) usada fue de 2.0, 2.5, 3 y 3.5. La SAA/FA (relación solución activadora alcalina/cenizas volantes) en todas las mezclas fue de 0.8. La molaridad de NaOH para todas las mezclas fue de 16.

Los ensayos usados son según las normas ASTM C138, ASTM C830, ASTM D7063, ASTM C39. Todos los especímenes que fueron sometidos al ensayo de absorción, primeramente, se sumergieron en agua durante 24 horas y se pesaron (w1), luego se mantuvieron en horno durante 24 horas a 60°C para también ser pesadas (w2). Para el ensayo a compresión, solamente fueron curados al horno por 24 horas a 60°C.

Los resultados muestran que, con una relación de NaOH/Na₂SiO₃ entre 2.0 y 2.5 los porcentajes de absorción se encuentran entre el 0% y 3%, mientras que para las mezclas que tiene una relación de NaOH/Na₂SiO₃ entre 3.0 y 3.5 los porcentajes de absorción se encuentran entre el 3% y 6%.

Con respecto a los resultados de resistencia a la compresión, se muestran mejores valores para las muestras que tienen un menor porcentaje de absorción, es decir las muestras que tienen una relación de NaOH/Na₂SiO₃ entre 2.0 y 2.5. Los valores de f'c para estas mezclas se encuentran entre 35 Mpa hasta 47 MPa, mientras que para las mezclas con mayor porcentaje de absorción están entre 30-35 MPa.

Los autores concluyen que para su estudio que, una mayor cantidad de cenizas volantes (kg/m³), aumenta la resistencia a la compresión y que el aumento de la relación NaOH/Na₂SiO₃ aumenta el porcentaje de absorción y porosidad, pero reduce la resistencia a la compresión.

Ketana et al. (2021) realizaron ensayos en función a la molaridad de los geopolímeros para analizar las propiedades del asentamiento y resistencia a la compresión. Se utilizó una SAA/FA (relación de solución activadora alcalina/solución alcalina) de 2.5 para todos los ensayos; como solución activadora alcalina se usó el silicato de sodio, el hidróxido de sodio y el hidróxido de potasio. Inicialmente los ensayos dieron como resultado para el silicato de sodio una resistencia a la compresión de 47.92 MPa mientras que el silicato de potasio resultó con 29.65 MPa. Para el presente estudio se utilizaron cenizas de clase F y clase C de lo cual los ensayos resultaron con mejores resultados para la ceniza de clase C. Para el análisis del asentamiento se determinó que a un mayor aumento de la molaridad reduce esta propiedad debido a que el resultado inicial

con 8 Moles resultó en un asentamiento de 205 mm mientras que para 18 Moles de solución el asentamiento disminuyó a 54 mm. Así mismo utilizando diferentes proporciones de cenizas volantes se mejoró el asentamiento, iniciando con 300 kg/m^3 obteniendo 50 mm con una resistencia a la compresión de 51.02 MPa mientras que al usar 550 kg/m^3 se obtuvo un asentamiento de 166 mm y una resistencia a la compresión de 31.25 MPa. Finalmente, la relación de (SAA/FA) de 0.4 resultó en 88 mm. Mientras que el valor óptimo para el asentamiento fue de 0.9 con 234 mm.

Luhar et al. (2021) investigan la permeabilidad del hormigón convencional y del hormigón geopolimérico. Los resultados obtenidos son por medio del ensayo de profundidad de penetración del agua en la muestra de hormigón. Para el hormigón geopolimérico la relación de SS/SH (Silicato de Sodio / Hidróxido de Sodio) es igual a 2.5 y la relación de SAA/FA (Solución Activadora Alcalina / Ceniza Volante) tiene valor de 0.40. La relación a/c (agua / cemento) del hormigón convencional es de 0.40. Los resultados para ambos casos, mostraron que el GPC (Hormigón Geopolimérico) tiene una menor permeabilidad que el hormigón convencional, esto debido a su matriz química que con los polímeros inorgánicos genera una menor porosidad. Los resultados obtenidos son de una profundidad de penetración del agua para el GPC y OPC son de 31 mm y 38 mm respectivamente.

Mahmoud et al. (2017) investigan la permeabilidad del hormigón convencional y del hormigón geopolimérico. Los resultados obtenidos son por medio del ensayo de profundidad de penetración del agua en la muestra de hormigón. Para el hormigón geopolimérico la relación de SS/SH (Silicato de Sodio / Hidróxido de Sodio) es igual a 2.5 y la relación de SAA/FA (Solución Activadora Alcalina / Cenizas Volantes) tiene valor de 0.35. La relación a/c (agua / cemento) del hormigón convencional es de 0.35. Los resultados para ambos casos, mostraron que el GPC (Hormigón Geopolimérico) tiene una menor permeabilidad que el hormigón convencional, la profundidad de penetración del agua para el GPC y OPC son de 115 mm y 40 mm respectivamente.

Moradikhou, S. & Moradikhou, A. (2021) usaron cenizas volantes de clase C, la proporción de SS/SH (Silicato de Sodio / Hidróxido de Sodio) fue de 1.5 y utilizaron una SAA/FA (relación Solución Alcalina / Cenizas Volantes) de 0.50, el diseño puede observarse en la Tabla 11. Determinaron que la menor permeabilidad se da para la ID Mezcla "N", que relaciona directamente al Hidróxido de Sodio (NaOH) y al Silicato de Sodio (Na_2SiO_3), a comparación de las ID Mezclas "NaK" y "K" que incorporan en sus diseños Silicato de Potasio (K_2SiO_3) e Hidróxido de Potasio (KOH), los testigos de GPC

pueden observarse en la Figura 19. Para todas las muestras se muestra que el hormigón con cenizas volantes tiene un porcentaje de absorción menor al 5% como puede verse en la Tabla 12 y Figura 20, lo que indica que es un hormigón con baja permeabilidad. Los autores concluyen que para las muestras es de suma importancia el curado al horno a temperaturas 40°C-90°C por un periodo de 24hrs, ya que este da como resultado una mayor resistencia a la compresión y una menor permeabilidad a comparación de mezclas de hormigón ordinario. Para el ensayo de absorción de agua se colocaron las muestras inicialmente en un horno a 105°C, luego se sumergieron en un estanque de agua por 3 días y luego fueron ensayadas según los procedimientos de la norma ASTM C642.

Tabla 11

Diseños de mezcla relacionados con la absorción de agua (kg/m³)

ID	Ceniza (FA)	NaOH (10M)	KOH (10M)	Na ₂ SiO ₃	K ₂ SiO ₃	Ag. Fino	Ag. Grueso	Super Plastifi-cante	Agua Extra
N	400	80	-	120	-	860	860	6	10
NaK	400	40	40	120	-	860	860	6	10
K	400	-	80	-	120	860	860	6	10

Nota. Moradikhou, S. & Moradikhou, A. (2021)

Figura 19

Muestras en estado fresco y endurecido



Nota. Moradikhou, S. & Moradikhou, A. (2021)

Tabla 12

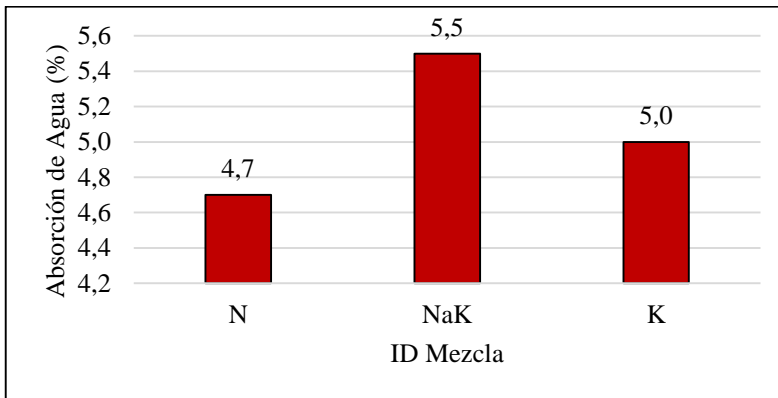
Resultados de la absorción de agua (kg/m³)

ID Mezcla	Absorción de Agua (%)
N	3.3%
NaK	4.0%
K	3.7%

Nota. Moradikhou, S. & Moradikhou, A. (2021)

Figura 20

Resultados de la absorción de agua (kg/m^3)



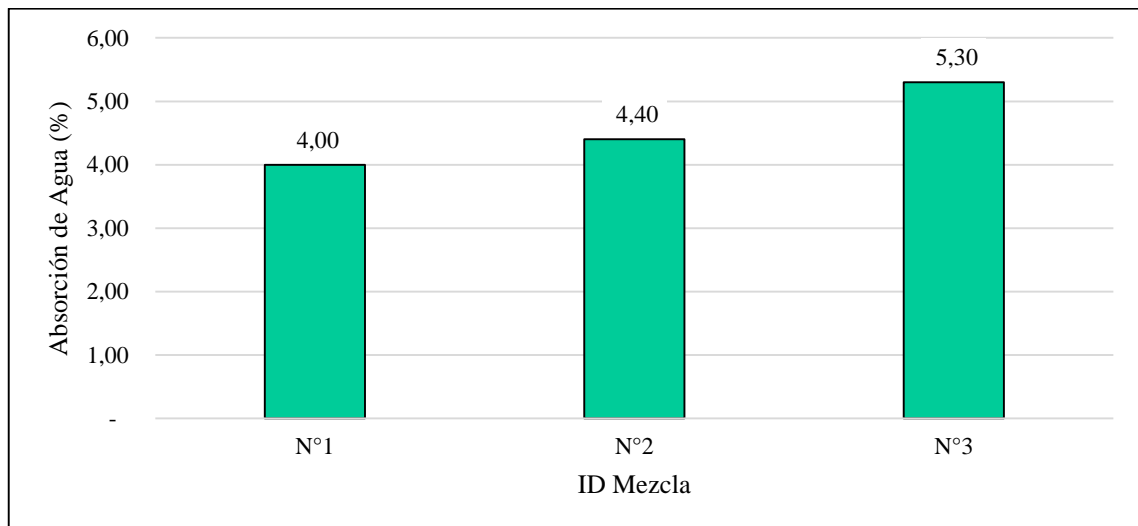
Nota. Moradikhou, S. & Moradikhou, A. (2021)

Mortar et al. (2020) analizaron diversos valores para la molaridad de la solución alcalina, así como la relación de aglutinante (ceniza volante) y agregado en la mezcla. Los diseños de mezclas se realizaron en función a 10 M, 12 M, 14 M y 16 Moles, se determinaron 4 tipos de especímenes siendo estos B25A75, B30A70, B35A65 y B40A60. Los resultados de los ensayos demostraron un incremento en la resistencia a la compresión con valores en un rango de 45 MPa a 82 Mpa, el resultado óptimo se dio en el espécimen B35A65 con una relación de aglutinante-agregado de 35%:65% con una molaridad de 14 M resultando en 82 MPa, mientras que el valor más bajo se registró con 10 M resultando en 56 MPa, estos resultados se obtuvieron para un hormigón de alta resistencia con geopolímeros a un curado de 28 días.

Naghizadeh et al. (2023) buscaron determinar la permeabilidad de especímenes de hormigón geopolimérico, primero estos fueron vaciados y curados en horno a 60°C por 24 horas, luego tuvieron su curado a temperatura ambiente por 28 días. Los autores utilizan en 3 diseños con la misma relación de SS/SH (silicato de sodio/hidróxido de sodio), pero variando el peso de la solución activadora alcalina SAA (SS + SH) provocando que se obtengan distintos valores de la relación de SAA/FA (solución activadora alcalina/ceniza volante), los diseños de mezcla se observan en la Tabla 13. Se concluyó que a medida que se aumentaba el peso del activador alcalino, que vendría a ser la sumatoria de los pesos del silicato de sodio y el hidróxido de sodio, la relación de SAA/FA aumentaba y a mayor valor de este, el porcentaje de absorción de agua era más alto como demuestran los resultados en la Figura 21, lo que provoca que aumente la permeabilidad del hormigón. De la tabla 13, SAA: Solución activadora alcalina, SS: Silicato de sodio, SH: Hidróxido de sodio, FA: Ceniza volante.

Tabla 13*Mezclas de hormigón geopolimérico*

ID	Cenizas Volantes (kg)	Arena (kg)	Ag. Grueso (kg)	SAA (kg)	SS/SH	SAA/FA	Absorción de Agua (%)
N°1	4.00	5.09	10.50	1.96	1.50	0.50	4.00%
N°2	4.00	5.09	10.50	2.28	1.50	0.60	4.40%
N°3	4.00	5.09	10.50	2.60	1.50	0.65	5.30%

Nota. Naghizadeh et al. (2023)**Figura 21***Porcentaje de absorción de agua (%)**Nota.* Naghizadeh et al. (2023)

Nurruddin et al., (2018) recopilaron una serie de información acerca de los métodos de curado del hormigón geopolimérico. Patankar et al., (2013, como se citó en Nurruddin et al., 2018), indica que el GPC se endurece por el calor en un rango de entre 60°C y 90°C. Fernández et al. (2006, como se citó en Nurruddin et al., 2018), menciona que la f'_c alcanza aproximadamente 40 N/mm² con un curado a temperatura entre 80°C y 90°C durante 24 hrs, lo que generaría resistencias iniciales grandes. Singh et al. (2015, como se citó en Nurruddin et al., 2018), menciona que la temperatura de curado es sumamente importante para lograr mayores resistencias. Nurruddin et al. (2016, como se citó en Nurruddin et al., 2018), menciona que un mayor tiempo de curado genera una mejor resistencia en el GPC, pero el aumento de resistencia es insignificante cuando el tiempo de curado se extiende por encima de las 24 horas. Yewale et al. (2016, como se citó en Nurruddin et al., 2018), menciona que a sus mezclas de diseño fueron curadas al

horno, vapor, con agua y a temperatura ambiente. Para el curado al horno la temperatura de curado varió desde los 40°C hasta los 140°C durante 24 horas y se ensayaron a los 7 y 28 días. Las mezclas curadas al vapor se curaron a 60°C y 110°C por 18 horas, las mezclas curadas al agua y temperatura ambiente fueron curando el método convencional del OPC. Concluye que la resistencia de las muestras ensayadas es mejor cuando son curadas al horno a una temperatura óptima de 60°C. Kumaravel (2014, como se citó en Nurrudin et al., 2018), también menciona que la f'c del GPC curado al horno es mejor que la de curado al ambiente, cuya resistencia óptima se encuentra a un curado de 60°C por 24 hrs. Vijai et al., (2010, como se citó en Nurrudin et al., 2018), menciona la mejora en la f'c del GPC a una temperatura óptima de 60°C luego de 1 día curado al horno, además que este desarrolla su resistencia a temprana edad, pero resalta que este método es difícil de conseguir para aplicaciones de colado in situ.

Ozbayrak et al., (2023) aplicaron como solución activadora alcalina al hidróxido de sodio y silicato de sodio, aplicado sobre cenizas volantes para la explicación y análisis respecto a las propiedades mecánicas del hormigón, bajo compresión y flexión, antes y después de someter las muestras a elevadas temperaturas. Para la investigación se utilizaron las cantidades indicadas de las cuales se obtuvieron las relaciones o proporciones de soluciones y cenizas las cuales se observan en la Tabla 14, SS: Silicato de Sodio, SH: Hidróxido de Sodio, AA: Solución Activadora.

Tabla 14

Proporciones de mezcla del hormigón geopolimérico

Nº de muestra	Nombre de la muestra	SS/SH	AA/FA	Na ₂ O/SiO ₂	SiO ₂ /Al ₂ O ₃	W/FA
1	A1.5W0.5	1.50	0.50	0.22	3.12	0.30
2	A1.5W0.6	1.50	0.60	0.25	3.20	0.36
3	A1.5W0.7	1.50	0.70	0.28	3.29	0.42
4	A2.5W0.5	2.50	0.50	0.19	3.20	0.30
5	A2.5W0.6	2.50	0.60	0.22	3.30	0.36
6	A2.5W0.7	2.50	0.70	0.24	3.40	0.42
7	A3.5W0.5	3.50	0.50	0.17	3.25	0.30
8	A3.5W0.6	3.50	0.60	0.20	3.36	0.36
9	A3.5W0.7	3.50	0.70	0.22	3.47	0.42

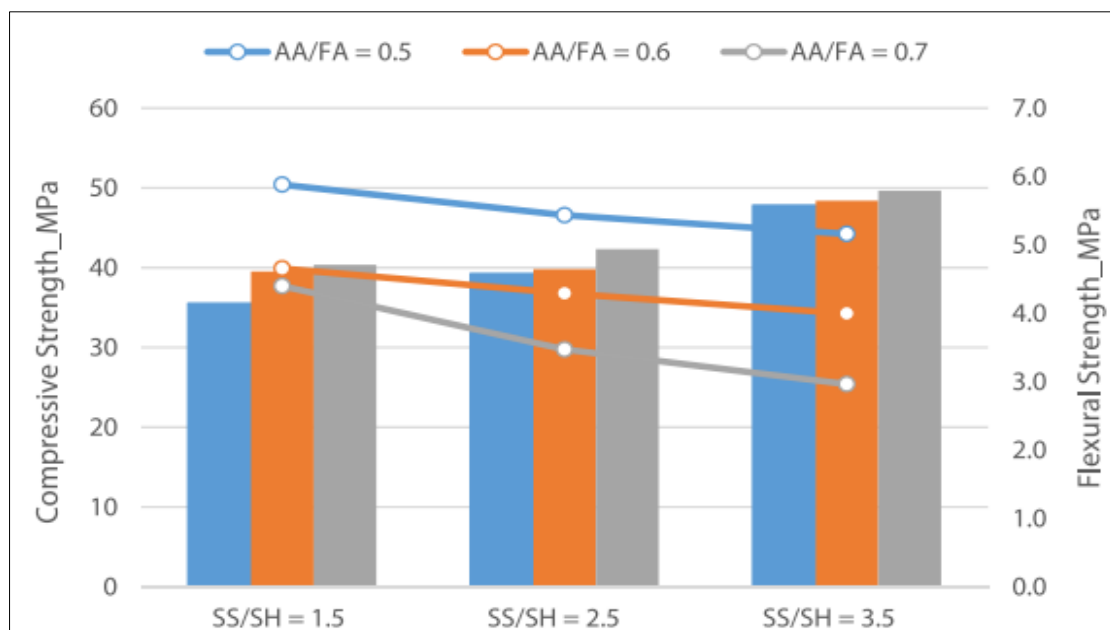
Nota. Ozbayrak et al. (2023)

Después de determinar las proporciones de mezcla, se realizaron los ensayos a compresión al hormigón y flexión con polímeros inorgánicos en muestras de 15cmx15cmx75cm para la flexión y 15cmx15cmx15cm para la compresión, dando como resultado que el mayor valor para la resistencia a la compresión se obtuvo para la muestra A3.5W0.7 y la más baja fue A1.5W0.5, de igual forma para la flexión el mayor valor se obtuvo de la muestra A1.5W0.5 y la más baja A3.5W0.7, así mismo en referencia a la resistencia a la compresión y mediante la ecuación que propone el ACI 318-14 se realizó un cálculo de la flexión mediante fórmula, los resultados pueden observarse en la.

Una vez se obtuvo los resultados de la resistencia a la compresión, así como la resistencia a la flexión se plasmó los resultados en un gráfico para observar la relación que existe entre los valores. De la figura 22, 23 y 24, SS: Silicato de Sodio, SH: Hidróxido de Sodio, AA: Solución Activadora

Figura 22

Relación entre valores de resistencia a la compresión y flexión



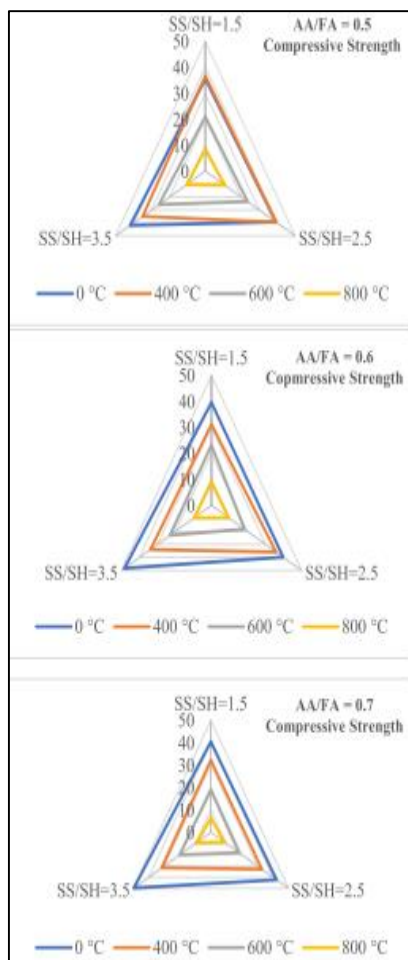
Nota. Ozbayrak et al. (2023)

Después de haber estudiado y realizado ensayos en el hormigón con polímeros inorgánicos a temperatura ambiente, se procedió a realizar ensayos a elevadas temperaturas en las muestras restantes para precisar las variaciones en la resistencia a la compresión, de lo cual se pudo determinar que la mayor disminución en los valores se observó para la relación 0.7 de AA/FA se obtuvieron como un promedio en reducción de 26% a 400°C, 57% a 600°C, y 82% a 800°C respecto a la muestra a temperatura ambiente. Para el caso de la relación SS/HH se tomó el valor 3.5 como el más desfavorable con una

disminución del 31% en la resistencia a la compresión para 400°C, 53% para 600°C y 80% para 800°C. Los investigadores concluyeron que para un hormigón con polímeros inorgánicos expuestos a temperatura ambiente los valores más elevados de la resistencia a la compresión se dan inversamente para la flexión en función a las muestras, la resistencia a la compresión más alta y la resistencia a la flexión más baja se obtuvieron de la muestra A3.5W0.7, así mismo la resistencia a la compresión más baja y la resistencia a la flexión más alta se obtuvieron de la muestra A1.5W0.5 es decir que la resistencia a la compresión incrementó con el aumento de la relación AA/FA (0.5 a 0.7). Mientras que para las muestras ensayadas a elevadas temperaturas se concluye que el aumento de la relación SS/SH (1.5 a 3.5) a cada temperatura elevada resultó en un incremento en la resistencia a la compresión como en las muestras que no fueron expuestas a alta temperatura.

Figura 23

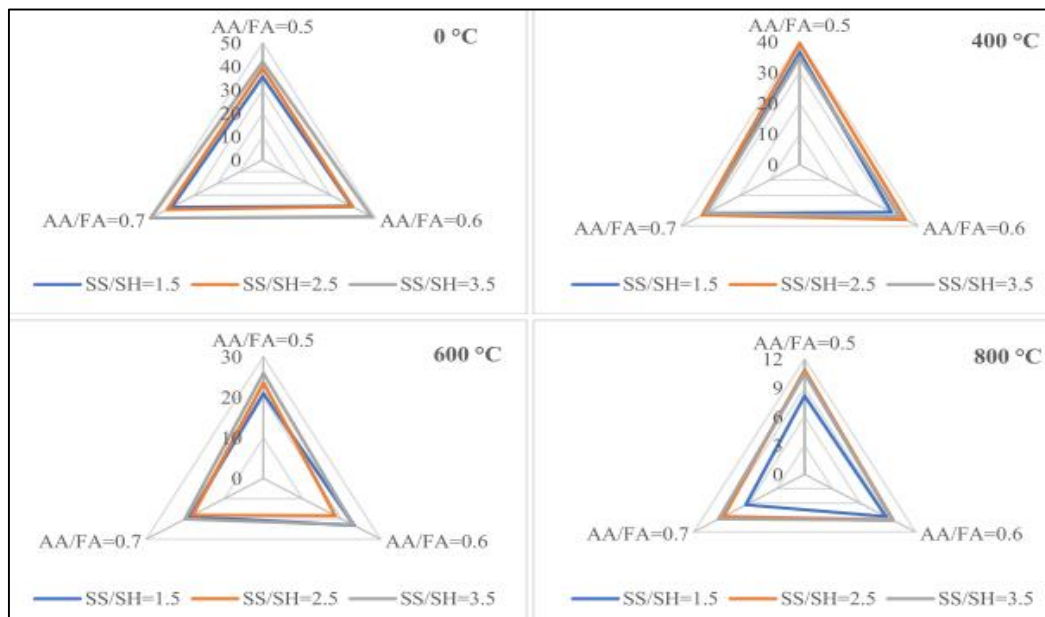
Efectos térmicos sobre la resistencia a la compresión (MPa)



Nota. Ozbayrak et al. (2023)

Figura 24

Efecto de SAA/FA y SS/SH a diferentes temperaturas sobre el f'_c (MPa)



Nota. Ozbayrak et al. (2023)

Pane et al. (2022) investigan los resultados de resistencia a la compresión del hormigón geopolimérico a temperatura ambiente. Realizan 3 tipos de mezclas, donde la variable es la cantidad de Hidróxido de Sodio, se utiliza una molaridad de 10, 12 y 14 para cada uno de los 3 diseños. El máximo valor de resistencia a la compresión se obtuvo a los 28 días para la mezcla de $M=14$, donde $f'_c = 29.34$ MPa, para $M=12$ la $f'_c = 25$ MPa y para $M=10$ la $f'_c = 17$ MPa. Cabe resaltar que este tipo de hormigones tienen una alta resistencia inicial, a los 7 días lograron una resistencia entre 13 MPa – 17 MPa.

Paunescu et al. (2022) utilizaron cenizas volantes y escorias de alto horno en reemplazo del cemento tradicional para la realización de hormigón con geopolímeros, así mismo utilizaron como solución activadora el silicato de sodio. Se consideró una relación de solución activadora alcalina/ceniza volante (SAA/FA) de 0.45. Se trabajaron 3 tipos de proporciones para el uso de cenizas volantes y escorias de alto horno siendo Espécimen 1 - 85:15, Espécimen 2 - 80:20 y Espécimen 3 - 75:25. Los resultados de los ensayos determinaron resultados para el asentamiento de 70 mm, 58 mm y 45 mm para el espécimen 1, espécimen 2 y espécimen 3 respectivamente; así mismo los resultados para la resistencia a la compresión indicaron que el resultado óptimo se da para una proporción de 80 % ceniza volante y 20 % escoria de alto horno, obteniendo una resistencia a la compresión de 53.5 MPa.

Rahmadina, A. & Ekaputri, J. (2017) estudiaron las propiedades físico-mecánicas del hormigón con geopolímeros y el hormigón OPC (tradicional); para el estudio se realizaron muestras cilíndricas con medidas para el diámetro de 100 mm y una altura de 200 mm, como solución activadora alcalina se utilizó hidróxido de sodio y silicato de sodio con molaridad de 8 M, la composición de esta solución se determinó en porcentajes de 18.5% para el Na_2O , 36.4% para el SiO_2 y 45.1% para el agua. Como resistencia inicial tanto para el hormigón con geopolímero como para el hormigón OPC se determinó a un curado de 28 días una resistencia de 56.4 MPa, así mismo las temperaturas de estudio fueron de 0° a 800°C. Los autores determinaron que la resistencia a la compresión el hormigón con geopolímeros demuestra una mejor resistencia a elevadas temperaturas, tal es el caso que a los 400°C aumentó su resistencia a la compresión en un 16.7% respecto a la inicial, posterior a esta temperatura disminuye la resistencia, sin embargo en comparación con el hormigón OPC demuestra valores más altos, en los resultados de ensayos a 800°C el hormigón con geopolímeros mantiene una resistencia mayor al 50% mientras que el OPC es lo contrario resultando valores menores al 50%. Para el caso de la resistencia a la tracción se observó que el hormigón geopolimérico disminuye su resistencia a medida que la temperatura se sigue elevando. Finalmente, para los resultados de la porosidad se concluye que la menor porosidad resulta a los 400°C con un valor de 6.3%, menor a la porosidad a temperatura ambiente que oscila entre el 10% y 15%, y el caso más desfavorable se da a los 800°C con una porosidad de 14.3%.

Razak et al. (2022) estudiaron el hormigón geopolimérico con una solución activadora alcalina de silicato de sodio, una molaridad de 10 Moles y un ratio de 2.5 para SS/SH (Silicato de sodio/Hidróxido de sodio), así mismo se usó un factor de 0.40 para la SAA/FA (relación de solución alcalina/cenizas volantes). Se ensayaron 3 tipos de muestras tanto para el cemento tradicional con OPC20, OPC40 y OPC60, así como para el geopolímero con GEO20, GEO40 y GEO60 con resistencias iniciales de 20 MPa, 40 MPa y 60 MPa respectivamente. Las muestras se sometieron a temperatura ambiente y temperaturas elevadas de 500°C y 1200°C. Los resultados demostraron que para el caso de un hormigón OPC para todos los grados tanto de 20, 40 y 60 MPa sufrieron una reducción en la resistencia residual a la compresión al someter a temperaturas elevadas, mientras que para el caso de hormigón con geopolímeros se observó que el GEO20 a los 500°C obtuvo un aumento en la resistencia residual del 50% respecto al curado a temperatura ambiente, al someter la muestra a los 1200°C no hubo variación respecto a la resistencia inicial; así mismo para la muestra GEO40 al cabo de los 500°C se logró un

aumento porcentual de 10% respecto a la muestra patrón, para el caso de la muestra GEO60 al someterlo a elevadas temperaturas se redujo la resistencia a la compresión. Para el caso de la pérdida de masa en las muestras OPC sufrieron una mayor disminución, tal es el caso que el espécimen OPC40 sufrió una pérdida de 5.33% de masa, mientras que el GEO40 tuvo una reducción de 1.61% de masa esto al someter las muestras a los 500°C. Al someter las muestras a los 1200°C los especímenes GEO20 y GEO40 sufrieron pérdidas de 2.86% y 2.72% respectivamente, la mayor pérdida se dio en GEO60 con un 4%, mientras que para el OPC20 y OPC40 sufrieron pérdidas de masa de 6.80% y 8.76% respectivamente, el espécimen OPC60 sufrió alteraciones considerables en la masa del espécimen por lo cual no se consideró para este ensayo. Después de observar los resultados se puede concluir que el hormigón con geopolímeros tiene una mayor resistencia a la compresión sometido a elevadas temperaturas; de igual forma para el caso de la pérdida de masa el hormigón geopolimérico tiene una menor pérdida respecto al hormigón OPC (cemento tradicional), lo cual hace al hormigón geopolimérico un material de gran resistencia para elevadas temperaturas.

Razak et al. (2021) realizaron 3 diseños de mezclas de hormigón geopolimérico los cuales se observan en la Tabla 15 y 3 diseños de mezcla de Hormigón Portland Ordinario los cuales se muestran en la Tabla 16. Para ambos tipos de hormigón, las muestras fueron diseñadas para resistencias de 20, 40 y 60 Mpa. Las cenizas volantes utilizadas fueron clase F, que cumplió con la norma ASTM C618. Las muestras de OPC se dejaron curar a temperatura ambiente por 24 horas y luego pasaron a ser curadas en un tanque de agua por 28 días, mientras que las muestras de OPC fueron curadas durante 24 horas en un horno a 60°C y luego se mantuvieron a temperatura ambiente durante 28 días. Todas las muestras pasaron por el ensayo de prueba de fuego por un tiempo de 2 horas y cada 30 minutos se tomaron datos de cambio de color, agrietamiento y desprendimiento. Los resultados indican un mejor comportamiento del GPC a comparación del OPC, este último sufrió un notorio agrietamiento y desconchado, por lo que sus propiedades mecánicas se vieron afectadas perjudicialmente esto se observa en la Tabla 17.

Para las muestras ensayadas GPC se usó una relación de SS/SH (Silicato de Sodio/Hidróxido de Sodio) de 2.50 y una SAA/FA (relación de solución activadora alcalina/cenizas volantes) de 0.50, 0.38 y 0.40 para los diseños de 20 MPa, 40 MPa y 60 MPa respectivamente.

Tabla 15*Mezcla de hormigón geopolimérico (kg/m³) para f'c = 20, 40 y 60 Mpa*

ID Mezcla	Ceniza Volante	Ag. Grueso	Ag. Fino	NaOH	Na ₂ SiO ₃
GEO-G20	400	950	850	57	143
GEO-G40	400	1000	640	44	109
GEO-G60	460	1050	700	46	138

Nota. Razak et al. (2021)**Tabla 16***Mezcla de hormigón ordinario (kg/m³) para f'c = 20, 40 y 60 Mpa*

ID Mezcla	Cemento	Agua	Ag. Grueso	A. Fino	Super Plastificante
OPC G20	342	205	1211	652	0
OPC G40	405	190	1193	642	0
OPC G60	600	190	1162	498	4

Nota. Razak et al. (2021)**Tabla 17***Pérdida de masa (%) OPC vs GPC*

Temp. Ensayo	Pérdida de masa (%) del OPC			Pérdida de masa (%) del GEO		
	OPC-G20	OPC-G40	OPC-G60	GEO-G20	GEO-G40	GEO-G60
500°C	5.24	5.33	4.45	1.76	1.61	1.96
1200°C	6.80	8.76	7.45	2.89	2.72	4.00

Nota. Razak et al. (2021)

Ren et al. (2017) estudiaron la resistencia a la tracción y compresión en vigas de hormigón con geopolímeros. Se utilizó como solución activadora el silicato de sodio con una composición de óxido de silicio en 25.72%, óxido de sodio en 8.48% y agua un 65.8%, se utilizó como material precursor las cenizas volantes y escorias granuladas, las muestras se sometieron a temperaturas elevadas de 400°C y 600°C. Los resultados de los ensayos demostraron que a diferencia del hormigón tradicional (OPC), el hormigón geopolimérico incrementó alrededor de un 7% en su resistencia a la temperatura de 400°C, mientras que el hormigón OPC sometido a altas temperaturas redujo constantemente su resistencia. Respecto a la deflexión de la viga, el hormigón geopolimérico obtuvo una mayor deflexión para todos los ensayos a comparación del hormigón OPC que obtuvo menores valores en la deflexión del elemento.

Reddy et al. (2021) determinaron el aumento de la resistencia a la compresión en función a la variación de la molaridad del hidróxido de sodio (NaOH) con valores de 8 M, 10 M, 12 M, 14 M y 16 M. La relación de Silicato de sodio/Hidróxido de sodio (SS/SH) las cuales se ensayaron fue de 2, 2.5 y 3; así mismo se utilizó una relación de $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ en un rango de 1.5 a 3. Luego de realizado los ensayos se determinó que para una relación de solución activadora alcalina/ceniza volante (SSA/FA) de 0.5, y una relación de silicato de sodio/hidróxido de sodio (SS/SH) de 2, se logra un aumento en la resistencia a la compresión entre un rango de valores para $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ de 2 a 2.4 obteniendo valores para la resistencia entre 20 a 40 MPa, siendo el valor más alto de 39 MPa.

Rhomadon et al. (2023) analizaron la influencia de un activador de 5 % con baja alcalinidad, utilizando relaciones de SAA/FA (solución activadora alcalina/ceniza volante) de 0.35, 0.40, 0.50 y 0.60. Se utilizó una relación SS/SH (silicato de sodio/hidróxido de sodio) en proporciones de 86 kg/m^3 y 34 kg/m^3 respectivamente. Los ensayos dieron como resultado un aumento en el asentamiento del hormigón con geopolímeros a medida que se aumentaba la SAA/FA iniciando con un valor de 0.35 para un asentamiento de 25 mm y llegando hasta 125 mm con un valor de 0.6 para SAA/FA, logrando un aumento del 500 % respecto al valor inicial.

Saxena et al. (2021) determinaron la influencia del granito reciclado como reemplazo del agregado fino en proporciones de 0 a 20 % en el hormigón con geopolímeros. Para los ensayos se utilizó una relación de hidróxido de sodio/silicato de sodio (SH/SS) de 0.4, así mismo se utilizó una relación de solución activadora alcalina/ceniza volante (SAA/FA) de 0.45, para la solución activadora ($\text{Na}_2\text{O}:16.20\%$, $\text{SiO}_2:34.72\%$ y $\text{H}_2\text{O}:49.08\%$) se consideró una concentración de 10 Moles. De acuerdo a los ensayos realizados para el asentamiento del hormigón se determinó un resultado óptimo al considerar un 0 % de adición de granito reciclado se obtiene un valor de 96 mm, mientras que el valor más desfavorable resultado de agregar un 20% de granito resultando en 31 mm. Se determinó que el óptimo valor para la resistencia inicial a la compresión se da al adicionar un 10 % de granito reciclado obteniendo un resultado de 28 MPa, mientras que al considerar una adición de 0% o 20 % el resultado de estos no difiere por mucho. Los investigadores concluyen que la adición de granito reciclado en reemplazo parcial del agregado fino favorece a las propiedades físico-mecánicas del hormigón con geopolímeros, esto resulta de las partículas de desechos de granito muy

finas, que pueden haber proporcionado una superficie específica más grande para el proceso de polimerización en el hormigón.

Shinde et al. (2018) determinaron la influencia de diferentes cantidades de ceniza volantes en la mezcla de hormigón con geopolímeros para incrementar sus propiedades físico-mecánicas; las cantidades de ceniza volante ensayadas fueron 364 kg/cm², 442 kg/cm² y 610 kg/cm². Se analizaron 4 tipos de relaciones de silicato de sodio/hidróxido de sodio (SS/SH) siendo estas 1.5, 2, 2.5 y 3. Los resultados indican un aumento en el asentamiento del hormigón a medida que se aumenta la cantidad de cenizas volantes resultando valores de 64 mm, 73 mm y 89 mm, así mismo la resistencia a la compresión resultó en 21 MPa, 29.70 MPa y 42.30 MPa para las cantidades de ceniza volante 364 kg/cm², 442 kg/cm² y 610 kg/cm² respectivamente. Al analizar el asentamiento en función a la relación alcalina los resultados indican valores de 67 mm, 73 mm, 78 mm, 81 mm y 83 mm, mientras que para la resistencia a la compresión resultó en 29.70 MPa, 38.82 MPa, 38.30 MPa, 33.41 MPa y 31.04 MPa para relación de solución alcalina de 1.5, 2, 2.5 y 3 respectivamente. Los resultados demostraron un incremento en el asentamiento y en la resistencia a la compresión del hormigón con geopolímeros.

Younis et al. (2021) determinaron la influencia de la molaridad y la relación la solución activadora sobre las propiedades físico-mecánicas de un hormigón con geopolímeros autocompactante. Para los ensayos se utilizaron diversas relaciones de silicato de sodio/hidróxido de sodio (SS/SH) (1.5, 2, 2.5 y 3), así mismo los valores para la molaridad de la solución alcalina fueron 8 M, 10 M y 12 M. Los ensayos realizados demuestran que para el asentamiento del hormigón el resultados más óptimo se obtuvo con una molaridad de 8 M y una relación (SS/SH) de 1.5 resultando en un slump de 752 mm, mientras que el resultado más desfavorable se dio para una molaridad de 12 M y una relación (SS/SH) de 3 resultando en un slump de 672 mm. Al registrar los ensayos de resistencia a la compresión se observó que la óptima relación resultó de una molaridad de 12 M y una relación (SS/SH) de 2.5 resultando en 35.8 MPa, mientras que el resultado más desfavorable se dio para una molaridad de 8 M y una relación (SS/SH) de 1.5. Los autores concluyen que tanto la molaridad como la relación de la solución activadora influyen positivamente en las propiedades físico-mecánicas del hormigón con geopolímeros autocompactante.

Zhang et al. (2020) estudiaron las propiedades físico-mecánicas del hormigón a elevadas temperaturas dentro de las cuales se observaron resultados para la resistencia a la compresión, resistencia a la flexión y la permeabilidad, para el estudio se usó una solución

de silicato potásico de 15.8 % en peso de K_2O , 24.2 % en peso de SiO_2 y 60% en peso H_2O con una relación Molar (SiO/K_2O) de 2.4. Para el estudio inicialmente se determinó el uso de precursores de mezcla como metacaolín (MK), cenizas volantes (FA), humo de sílice (SF), superplastificante (SP), Silicato de Potasio (SK), la composición se muestra en la Tabla 18, así como los diseños de mezcla en la Tabla 19 y 20.

Tabla 18

Composición química de MK, FA y SF (% en peso)

Compuesto	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	$CaO+MgO$	K_2O+Na_2O	Otro óxido	Pérdida Ignición
MK	45.3	41.2	3.18	4.21	0.47	3.24	2.4
FA	51.35	44.24	0.98	0.61	0.24	1.86	0.72
SF	96.1	0.09	0.15	0.3	0.08	2.48	0.8

Nota. Zhang et al. (2020)

Tabla 19

Mezcla de hormigones geopolímeros (kg/m^3) y $f'c$ (MPa)

GC Tipo	MK	FA	SF	SK	KOH	Agua	Arena	Grava	$f'c$ 28 días (MPa)
GC40	177	177	-	244	68	70	529	1236	42.1
GC50	186	186	-	219	61	63	535	1249	56.5
GC60	75	320	46	224	62	-	622	1151	63.8
GC80	108	181	72	261	72	-	633	1172	80.7

Nota. Zhang et al. (2020)

Tabla 20

Mezcla de hormigones OPC (kg/m^3) y $f'c$ (MPa)

Hormigón Tipo	Cemento	FA	SF	Agua	SP	Arena	Grava	$f'c$ 28 días (MPa)
C40	356	-	-	178	3.6	630	1223	43.2
C50	547	-	-	175	13	611	1242	64.3
C60	420	120	60	156	18	667	1186	85.6

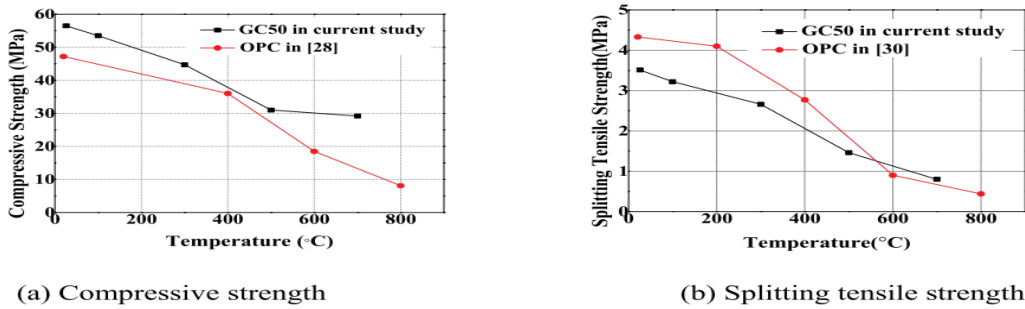
Nota. Zhang et al. (2020)

Para las pruebas de Resistencia residual a altas temperaturas se observó en la Resistencia a la compresión un valor inicial a temperatura ambiente de alrededor a 57 MPa para el hormigón geopolimérico descendiendo hasta los 30 MPa a los 700 °C, mientras que para el hormigón convencional se inició con un valor a temperatura ambiente alrededor de 48

MPa descendiendo a menos de 10 MPa a los 800°C. Para el caso de la resistencia a la tracción la tasa de degradación en temperaturas de 500°C a 700°C es superior a la compresión, se define que la tasa de degradación de la resistencia a la tracción del hormigón geopolimérico por encima de los 300°C es inferior a la del hormigón tradicional estos resultados se muestran en la Figura 25.

Figura 25

Resistencia de compresión y tracción de hormigón geopolimérico GC50

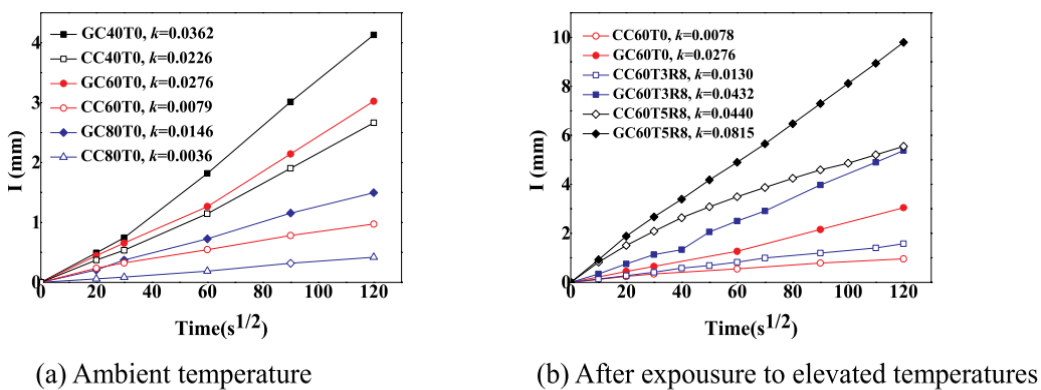


Nota. Zhang et al. (2020)

Para determinar la permeabilidad del hormigón con geopolímeros se realizó el ensayo de sorptividad en muestras a temperatura ambiente y temperaturas elevadas, producto del ensayo se pudo determinar en muestras a temperatura ambiente que de acuerdo al aumento de resistencia a la compresión en las muestras disminuye la absorción del agua, sin embargo, para el hormigón con geopolímeros la absorción es mucho mayor en todas las muestras, esto puede observarse en la Figura 26(a). Para el caso de temperatura elevada con exposición a 300°C y 500°C puede observarse que la absorción en hormigón convencional y con geopolímero aumenta la absorción del agua, pero la absorción del hormigón con geopolímero es significativamente superior.

Figura 26

Comparación de absorción de agua acumulada de GPC y OPC



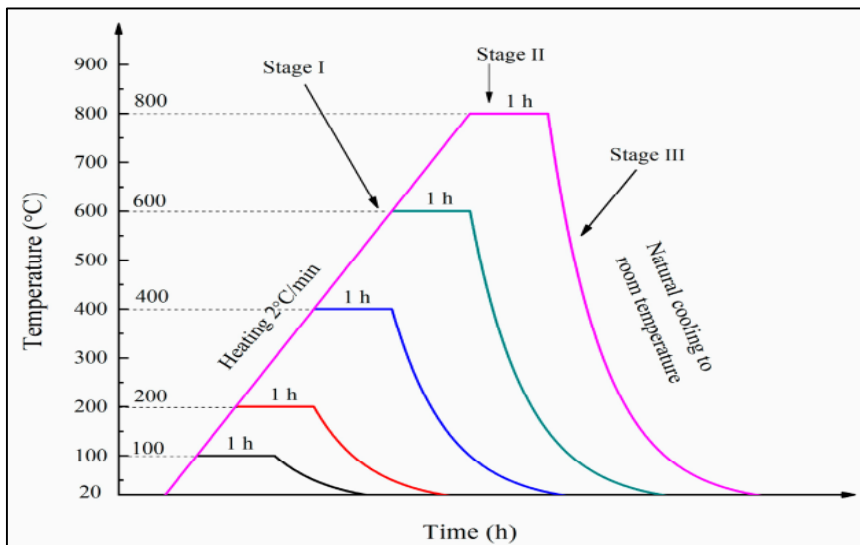
Nota. Zhang et al. (2020)

Los investigadores concluyen que el hormigón con geopolímeros tienen una mayor resistencia a altas temperaturas en comparación al hormigón convencional, conversando valores de resistencia a la compresión casi un 200% más en comparación al hormigón convencional. Mientras que para la permeabilidad de las muestras en el presente estudio se afirma que la reacción de sinterización que se produce en torno a 700°C aumenta el volumen de poros y la permeabilidad del hormigón con geopolímeros.

Zhang et al. (2019) estudiaron el hormigón geopolimérico con una solución activadora alcalina de silicato de sodio, una molaridad de 10 Moles y un ratio de 2.5 para la solución, así mismo utilizaron un factor de 0.45 para la solución respecto a la ceniza volante. Para el estudio se ensayaron 3 tipos de muestras: OPC-0 (reemplazo total del cemento por geopolímeros), OPC-5 (5% de contenido de cemento para la mezcla) y OPC-10 (10% de contenido de cemento para la mezcla) la composición se observa en la Tabla 21. Las muestras se sometieron a temperaturas de 100°C, 200°C, 400°C, 600°C y 800°C como se puede ver en el gráfico de la Figura 27. Al someter las muestras a diversas temperaturas se obtuvo que los valores de las muestras 200°C representan alrededor de un 50% de pérdida de masa para las 3 muestras de ensayo, se registraron pérdidas del 2.25%, 2.75% y 3.5% para las muestras de OPC-0, OPC-5 y OPC-10 respectivamente. El mayor valor se observó a los 800°C con porcentajes totales de 4%, 5% y 5.30% para las muestras OPC-0, OPC-5 y OPC-10 respectivamente. Respecto a la resistencia a la compresión se observó que desde temperatura ambiente hasta los 200°C existe un incremento considerable para los 3 tipos de muestras, los valores residuales óptimos son de 167%, 103% y 114% para OPC-0, OPC-5 y OPC-10 respectivamente. A partir de los 200°C en adelante surge una pérdida de resistencia para todas las muestras, siendo los valores más bajos a la temperatura de 800°C con valores de 60%, 29% y 48% de resistencia residual para las muestras de OPC-0, OPC-5 y OPC-10 respectivamente. Los autores concluyen que las muestras con contenido de cemento (OPC-5 y OPC-10) tienen una mayor pérdida de masa debido a la hidratación del cemento tal como se muestra en la Tabla 22. Así mismo para la resistencia a la compresión tiene un aumento considerable al cabo de los 200°C esto debido a la geopolimerización secundaria que ocurre durante el proceso en aumento de temperatura. De la tabla 21 y 22, GPC: Hormigón Geopolimérico, OPC: Adición de Cemento de 0%, 5% y 10%, SAA: Solución Activadora Alcalina.

Tabla 21*Diseño de mezcla (kg/m³)*

Mezclas	Ag. Grueso	Ag. Fino	Ceniza Volante	Cemento Portland	SAA
GPC-OPC-0	1172	539	459	0	200
GPC-OPC-5	1172	539	436.05	22.95	200
GPC-OPC-10	1172	539	413.1	45.9	200

Nota. Zhang et al. (2019)**Figura 27***Régimen de calentamiento**Nota.* Zhang et al. (2019)**Tabla 22***Pérdida de masa (%) de GPC con adición de 0%, 5% y 10% de cemento*

Temperatura (°C)	GPC-OPC-0%	GPC-OPC-5%	GPC-OPC-10%
20°C	0	0	0
100°C	1.50	1.55	1.90
200°C	2.20	2.75	3.30
400°C	3.25	3.60	4.40
600°C	3.40	4.25	4.60
800°C	3.75	5.00	5.50

Nota. Zhang et al. (2019)

Zhang et al. (2020) realizaron 4 diseños de mezclas los cuales se muestran en la Tabla 23, GPN-A, GPN-H, GPH-A, GPH-H, donde GPC significa Hormigón Geopolimérico, N significa de resistencia normal, H significa de alta resistencia, -A significa curado al ambiente y -H curado al horno. Del total de muestras un juego se curó

en el horno a una temperatura de 80°C por un tiempo de 24 horas, otro juego se curó a temperatura ambiente durante 72 horas debido al largo tiempo de fraguado las muestras se observan en la Figura 28. Las muestras fueron expuestas a temperaturas elevadas después de los 90 días de edad y el régimen de calentamiento fue según la curva de fuego en su Etapa I, II y III esto se observa en el gráfico de la Figura 29. Donde la velocidad de calentamiento en la etapa I fue de 5°C/min, en la etapa II se mantuvo la temperatura por 2 horas y en la etapa III se dejaron enfriar dentro del horno. Los investigadores calcularon la pérdida de masa de las muestras pesando las muestras antes y después de la exposición a temperaturas objetivo, además indican que hasta los 200°C la pérdida de masa estuvo ligada con la pérdida de agua libre y parcialmente de agua ligada líquidamente como resultado de la deshidratación del gel de geopolímero, los resultados se observan en la Tabla 24 y Figura 30. Más allá de los 200°C la pérdida de masa se debió principalmente a la deshidratación del gel de geopolímero y la deshidroxilación de los grupos de hidroxilo, que se refiere a un proceso químico en el cual los grupos hidroxilo (-OH) presentes en los materiales precursores, como las cenizas volantes, reaccionan y se eliminan en forma de agua durante la formación de la matriz geopolimérico. Para las muestras ensayadas GPN-A y GPN-H se usó una relación de solución activadora alcalina (Silicato de Sodio / Hidróxido de Sodio) de 2.5 y una relación de solución activadora alcalina/cenizas volantes de 0.45. Para las muestras ensayadas GPH-A y GPH-H se usó una relación de solución activadora alcalina (Silicato de Sodio / Hidróxido de Sodio) de 3.0 y una relación de solución activadora alcalina/cenizas volantes de 0.45. De la tabla 23, FA: Cenizas Volantes, SS: Silicato de Sodio, SH: Hidróxido de Sodio, M: Molaridad y de la Tabla 24, GP: Hormigón Geopolimérico, N: Resistencia Normal, H: Alta Resistencia, -A: Curado al Ambiente, -H: Curado al Horno.

Tabla 23

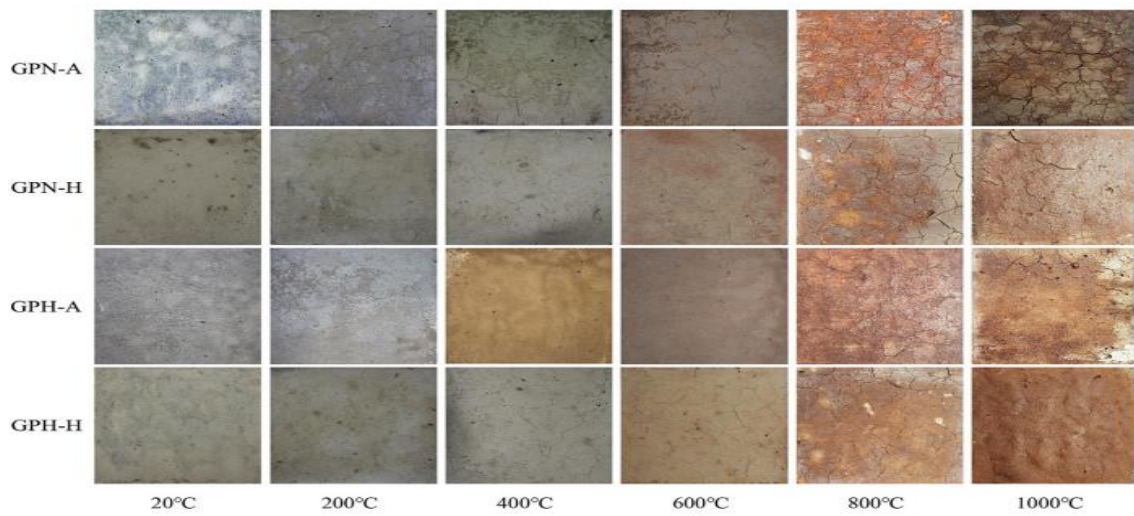
Diseño de mezcla del hormigón (kg/m³)

ID	Ag. Grueso	Ag Fino	FA	SS	SH	SS/SH	M	Temp. curado	Cont. agua
GPN-A	1201	539	460	142.9	57.1	2.5	8	25°C	5.54%
GPN-H	1201	539	460	142.9	57.1	2.5	8	80°C	5.54%
GPH-A	1201	539	460	150	50	3	14	25°C	5.21%
GPH-H	1201	539	460	150	50	3	14	80°C	5.21%

Nota. Zhang et al. (2020)

Figura 28

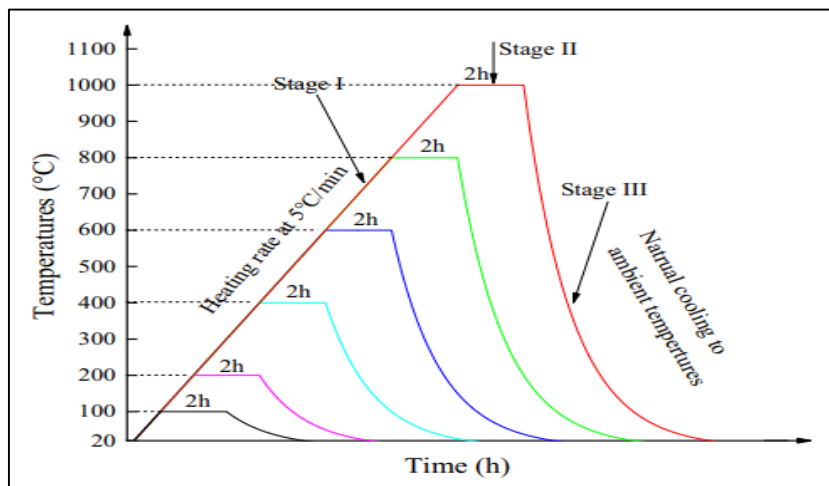
Superficie del hormigón geopolimérico a diferentes temperaturas



Nota. Zhang et al. (2020)

Figura 29

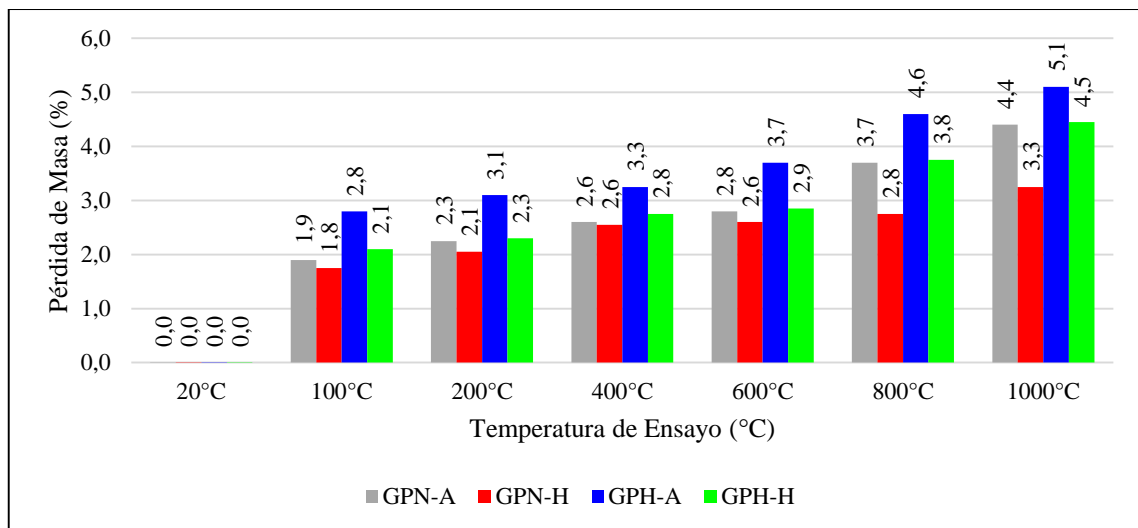
Curva de régimen de calentamiento



Nota. Zhang et al. (2020)

Tabla 24*Pérdida de masa (%) del hormigón geopolimérico a temperaturas elevadas*

Temp. (°C)	GPN-A	GPN-H	GPH-A	GPH-H
20°C	0.0	0.0	0.0	0.0
100°C	1.9	1.8	2.8	2.1
200°C	2.3	2.1	3.1	2.3
400°C	2.6	2.6	3.3	2.8
600°C	2.8	2.6	3.7	2.9
800°C	3.7	2.8	4.6	3.8
1000°C	4.4	3.3	5.1	4.5

Nota. Zhang et al. (2020)**Figura 30***Pérdida de masa (%) del GP a temperaturas elevadas**Nota.* Zhang et al. (2020)

Zulfiati et al. (2019) investigaron los resultados de resistencia a la compresión del hormigón geopolimérico a temperatura ambiente. Realizan 2 tipos de mezclas, donde la variable es la cantidad de Hidróxido de Sodio, se utiliza una molaridad de 14 y 16 para cada uno de los 2 diseños. El máximo valor de resistencia a la compresión para la mezcla de M=14 fue $f^c = 10.20$ MPa y para M=16 la $f^c = 13$ MPa. Debido a los valores bajos obtenidos para ambos valores de molaridad, los autores optaron por agregar fibra de piña, en longitudes de 30mm con porcentajes de 0.25% y 0.50% del peso del mortero. Para las muestras con M=14 más 0.50% en peso de fibra de piña se alcanzó un $f^c = 30$ MPa y para las muestras con M=16 más 0.50% en peso de fibra de piña se alcanzó un $f^c = 40$ MPa.

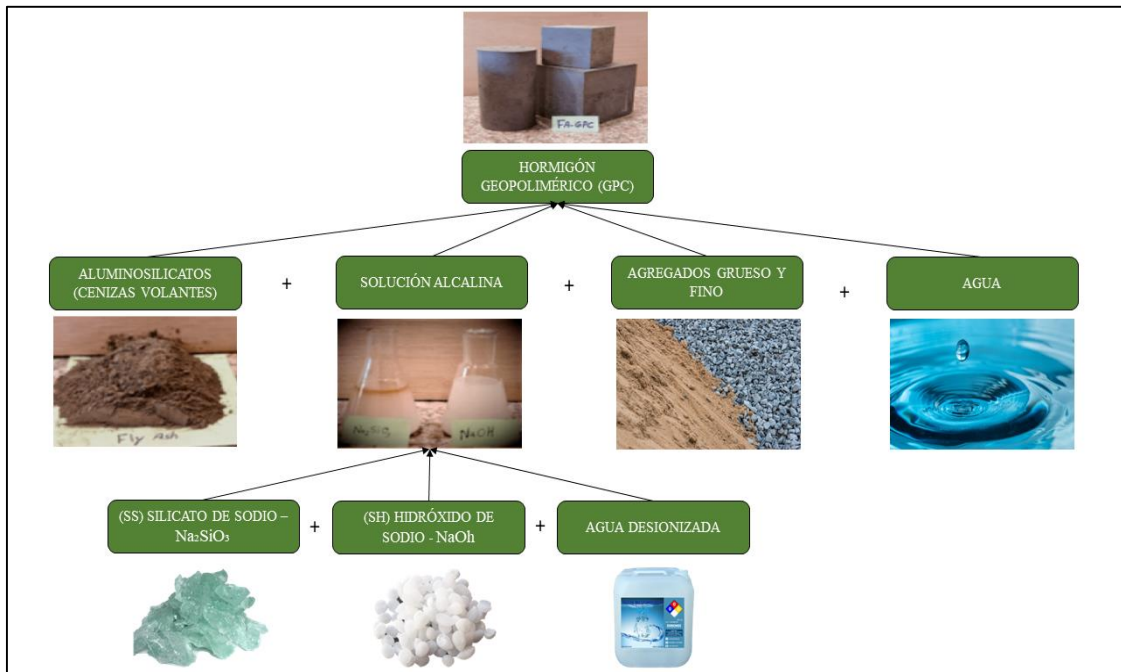
2.3 Estructura teórica y científica que sustenta el estudio

2.3.1 Fundamentación teórica

“La tecnología de hormigón geopolímero (GPC) proporciona un desarrollo sostenible y un medio ambiente más limpio a largo plazo al reducir emisiones globales de CO₂” (Ozbayrak et al., 2020).

Figura 31

Composición del hormigón geopolimérico



Nota. Elaboración Propia

2.3.2 Geopolímero (polímero inorgánico)

En 1978 Davidovits estuvo en búsqueda de un elemento que pueda sustituir al cemento en la elaboración del hormigón. Este investigador descubre un polímero inorgánico con forma amorfa, que tiene un mínimo parecido a la microestructura química de la zeolita. A este material se le denominó geopolímero por el parecido que tenía este material con la microestructura que se forma en la corteza terrestre.

Los geopolímeros se componen de polímeros inorgánicos que se forman mediante una reacción química entre un material precursor rico en óxido de aluminio y óxido de silicio en su composición química (cenizas volantes) y una solución acuosa alcalina (Davidovits, 1988).

El producto resultante por esta reacción prosigue a una fase de calcinación en horno y el nuevo material consigue propiedades semejantes o mejores a la del hormigón convencional. Como parte de las propiedades adquiridas por el material resultante se

puede resaltar la buena resistencia a la compresión, así como su resistencia ante los agentes degradantes y diversos elementos, además su fabricación reduce la propagación de agentes contaminantes y genera menor consumo de energía. Por las propiedades ya nombradas se les atribuye como un sustituto en reemplazo parcial o total al cemento tradicional (Salirrosas, 2020, p.9).

2.3.3 Proceso de geopolimerización

La formación de geopolímeros se basa en la formación de un polímero inorgánico a partir de la activación de una fuente de alúmina y sílice (aluminosilicatos, como las cenizas volantes) mediante la adición de una solución a base de un álcali (como el hidróxido de potasio) (Davidovits, 1988).

La activación alcalina, se refiere a que ha iniciado el proceso de geopolimerización, que es un proceso químico que se utiliza para producir el geopolímero, este se crea a partir de la reacción de materiales alcalinos con materiales aluminosos y silíceos (aluminosilicatos).

El proceso de geopolimerización consiste en la formación de polímeros a partir de la reacción entre el precursor con alto contenido de aluminio y silicio como es el caso de la ceniza volante y la solución alcalina de monómeros inorgánicos (Davidovits, 1988; Valenzuela Herrera, 2013).

2.3.4 Ceniza volante

Es un residuo fino captado de los gases producidos durante la quema de carbón mineral para la generación de energía en centrales térmicas, por sus características esta es considerada como una puzolana artificial según la ASTM C 618 (ver Figura 33).

Las cenizas volantes utilizadas en la fabricación de geopolímeros son “Ceniza volante baja en calcio”, es decir es aquella que tiene concentración de óxido de calcio menor a 5% de su peso, este tipo se les conoce como de clase F.

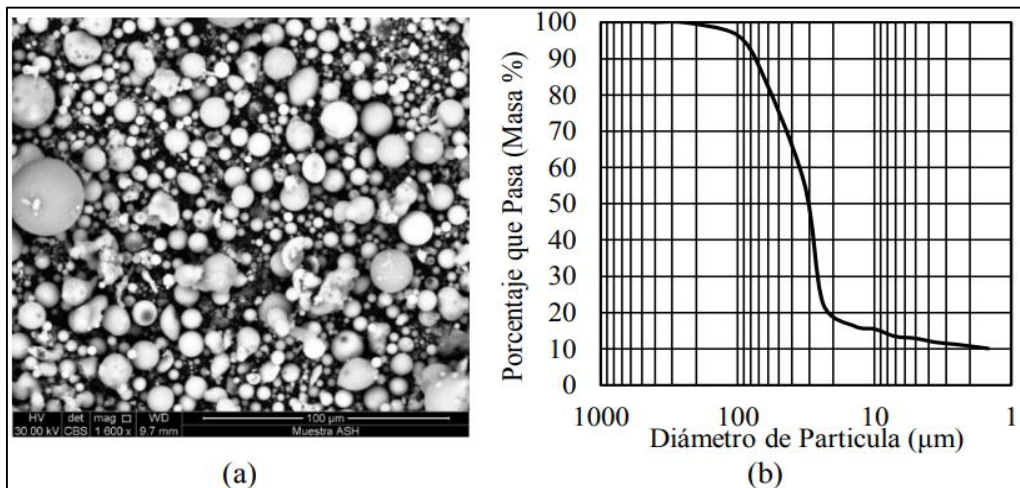
Para conocer la morfología se realiza un análisis SEM (Análisis de microscopía electrónica de barrido) que consiste en hacer un barrido con un haz de electrones sobre la superficie de la muestra, a medida que los electrones interactúan con la muestra se producen electrones secundarios que son emitidos y captados, donde la intensidad de las mismas depende de la topografía y se puede formar una imagen con las intensidades como se puede ver en la Figura 32 (Duxson & Provis, 2008).

El análisis granulométrico se realiza mediante el método de sedimentación, se mide directamente la masa de las partículas mediante la absorción de rayos X y mide la velocidad con que cae en un líquido debido a la gravedad. Con el equipo SediGraph 5100

se determina el diámetro de las partículas basándose en parámetros como la densidad y viscosidad. La gráfica granulométrica de la ceniza volante por lo general el 100% es menor a 250 μm de diámetro, con D90 (Diámetro de partícula al 90%) igual a 74 μm y D50 (Diámetro de partícula al 50%) igual a 31 μm (Duxson & Provis, 2008).

Figura 32

Características físicas de la ceniza volante clase F



Nota. (a) SEM y (b) Granulometría, recuperado de Salirrosas (2020)

Figura 33

Ceniza volante



Nota. Farida et al. (2023)

La composición química de la ceniza volante se determina con un análisis por fluorescencia de rayos X (XRF) (ver Tabla 25), este consiste en irradiar a una muestra con rayos X excitando sus átomos, para que estas emitan a una segunda radiación, conocida como fluorescencia de rayos X. Los resultados del XRF, muestran el contenido de los óxidos presentes en la ceniza volante, si la cantidad de CaO es menor al 5% significa que es una ceniza volante clase F. Los resultados del análisis muestran altos contenidos de sílice y alúmina, esto indica que la ceniza volante puede ser usada para

producir geopolímeros. El término LOI (Loss on Ignition) se refiere a una cantidad de carbono dentro de la muestra producidos durante la formación de la ceniza volante la cual es considerablemente baja (Salirrosas, 2020).

Tabla 25

Porcentaje de la composición referencial de óxidos de la ceniza volante

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	CaO	MgO	Na ₂ O	LOI
54.71%	27.45%	9.98%	2.26%	1.65%	0.92%	0.29%	2.79%

Nota. Salirrosas (2020)

2.3.5 Ceniza volante (material precursor)

El material precursor para la fabricación del geopolímero debe tener como base aluminosilicatos, como las cenizas volantes (Davidovits, 1988).

Las cenizas volantes tienen origen natural o artificial. Las de origen natural son generadas a cocción de minerales a las altas temperaturas dentro de los núcleos de magma de los volcanes y expulsados en las erupciones y humos volcánicos de origen natural (Djobo et al., 2016).

Los de origen artificial son subproductos generados por la reacción incompleta de materiales durante procesos industriales o son desechos de los mismos (Davidovits, 1988).

2.3.6 Solución Activadora Alcalina (SAA)

Esta actúa en la formación de geopolímeros como agente activador del proceso de geopolimerización (Davidovits, 1978).

Son soluciones acuosas que interactúan con los aluminosilicatos disolviendo sus componentes en aluminatos (AlO₂⁻), silicatos (SiO₃⁻²) y sialatos (-Si-O-Al-), para formar los polímeros. Las soluciones se generan al disolver un hidróxido de un metal alcalino (MOH), como son el sodio (Na) o el potasio (K), para formar los cationes de estos elementos alcalinos y aniones de hidroxilo (OH⁻), donde son los aniones los responsables de disolver los aluminosilicatos (cenizas volantes) en sus componentes de Si y Al para formar las redes del geopolímero. La producción de la solución se debe realizar en ambientes adecuados, debido a que la disolución del hidróxido es una reacción exotérmica (liberación de energía en forma de calor hacia el entorno). Los componentes para la fabricación de la solución activadora alcalina son el Hidróxido de Sodio (NaOH) y el Silicato de Sodio (Na₂SiO₃) (Salirrosas, 2020).

El hidróxido de sodio (SH o NaOH), es conocida como sosa cáustica, se presenta como un sólido blanco cristalino de forma aperlada y sólida a temperatura ambiente, sin

embargo, cuando se mezcla con agua desionizada, este se disuelve completamente en el agua y forma una solución altamente alcalina (hace referencia a una mezcla líquida que contiene un alto contenido de álcali, es decir un pH muy elevado, como el NaOH) (ver Figura 34).

El silicato de sodio (SS o Na_2SiO_3), conocido como vidrio soluble o waterglass, esta denominación se refiere a su aspecto similar al vidrio y a su propiedad de ser una solución líquida con alto contenido de silicio y sodio disueltos en agua, compuesto por lo general en una 30% de SiO_2 , 10% de Na_2O y 60% de H_2O (ver Figura 35).

El agua desionizada, es usado como medio de disolución de la solución activadora alcalina y para obtener una mezcla de reacción más trabajable. Esta se emplea para no alterar los componentes en la solución. Su principal función es actuar como un medio de transporte para disolver y mezclar los componentes de la solución activadora alcalina, como el hidróxido de sodio (NaOH), así como para proporcionar la humedad necesaria para la reacción de geopolimerización.

En la preparación de la solución activadora alcalina del hormigón geopolimérico, el agua desionizada se mezcla típicamente con el hidróxido de sodio (NaOH) para formar la solución activadora alcalina. El silicato de sodio (waterglass) generalmente se agrega por separado a la mezcla, y su función principal es proporcionar el silicio necesario para la reacción de geopolimerización (ver Figura 36).

Figura 34

Perlas de hidróxido de sodio (SH)



Nota. Salirrosas (2020)

Figura 35

Silicato de Sodio (SS)



Nota. Salirrosas (2020)

Figura 36

Componentes del Hormigón Geopolimérico (GPC)



Nota. Çelik et al. (2023)

2.3.7 Relación SS/SH (Silicato de Sodio / Hidróxido de Sodio)

La relación entre el silicato de sodio (Na_2SiO_3) y el hidróxido de sodio (NaOH) en el hormigón geopolimérico es un factor crítico que influye en la formación y las propiedades del geopolímero. Esta relación se expresa a menudo como la relación molar entre el silicato de sodio y el hidróxido de sodio.

La relación molar se refiere a la proporción de moles de silicato de sodio con respecto a moles de hidróxido de sodio en la mezcla utilizada para hacer el geopolímero. Esta

relación es importante porque afecta directamente la reacción de geopolimerización y, por lo tanto, las propiedades físicas-mecánicas del hormigón geopolimérico.

Las relaciones de silicato de sodio a hidróxido de sodio pueden variar según las formulaciones específicas del geopolímero y las necesidades del proyecto, pero generalmente se encuentran en el rango de 1 a 3.

2.3.8 Relación SAA/FA (Solución Activadora Alcalina / Cenizas Volantes)

La relación entre la solución activadora alcalina y las cenizas volantes en el hormigón geopolimérico es un factor crítico que influye en la formulación y las propiedades del geopolímero. Esta relación se refiere a la cantidad de solución activadora alcalina en comparación con la cantidad de cenizas volantes utilizadas en la mezcla para producir el geopolímero. Esta relación se expresa generalmente en términos de proporciones o concentraciones, y su ajuste puede tener un impacto significativo en las características del material resultante.

2.3.9 Preparación del geopolímero

La fabricación del geopolímero se inicia preparando la solución activadora alcalina. Se mezcla en un recipiente el hidróxido de sodio, silicato de sodio y el agua desionizada en proporciones de acuerdo a lo requerido. Luego, la solución activadora alcalina es vaciada en la ceniza volante y son mezcladas. Después, la mezcla fue vertida en los moldes, se realizó un vibrado mecánico. Las muestras son desmoldadas y curadas a temperatura ambiente aproximadamente 24 horas y después se curan en el horno otras 24 horas a una temperatura entre 60°C y 90°C. Finalmente, las muestras son retiradas del horno, se dejan reposar a temperatura ambiente hasta ser ensayadas

2.3.10 Curado del hormigón geopolimérico

El curado en horno de hormigón geopolimérico es un método de curado que implica exponer el hormigón a temperaturas controladas en un horno o una cámara de curado. Este proceso se utiliza para acelerar significativamente el desarrollo de resistencia y la formación de enlaces químicos en el hormigón geopolimérico.

Después de la colocación en moldes, el hormigón geopolimérico se deja reposar durante un período inicial a temperatura ambiente para permitir que comience la reacción de geopolimerización. Una vez que ha tenido lugar el curado inicial, las muestras de hormigón se trasladan a un horno, donde se someten a temperaturas específicas y controladas durante un período de tiempo determinado. Estas temperaturas suelen estar en el rango de 60°C a 90°C. Después del período de curado a alta temperatura, el hormigón se enfría gradualmente en el horno para evitar tensiones térmicas que puedan

dañar el material. El curado en horno del hormigón geopolimérico acelera significativamente el desarrollo de resistencia y la formación de enlaces químicos, lo que resulta en un material más duro y resistente en un período de tiempo más corto en comparación con el curado a temperatura ambiente. Esto puede ser ventajoso en proyectos donde se requiera una rápida puesta en servicio de los elementos de hormigón.

2.3.11 Tiempo de curado del hormigón geopolimérico

El tiempo de curado en el horno del hormigón geopolimérico puede variar dependiendo de las necesidades, el curado a corto plazo se puede emplear en situaciones donde se necesita una resistencia temprana y se busca un curado más rápido, por ejemplo, en la producción de elementos prefabricados o en situaciones donde se necesita una rápida puesta en servicio. En este caso el hormigón geopolimérico puede ser curado en el horno durante unas pocas horas, generalmente de 4 a 8 horas.

Un curado a largo plazo, se utiliza en proyectos que requieren una resistencia más alta y una mayor durabilidad a largo plazo, el curado en el horno puede extenderse durante varios días, incluso hasta una semana o más. Este período prolongado de curado a alta temperatura permite un desarrollo más completo de las propiedades del geopolímero y una mayor resistencia.

Después del período de curado a alta temperatura, se suele permitir un enfriamiento gradual para evitar tensiones térmicas en el hormigón geopolimérico.

2.3.12 Estructuras de hormigón geopolimérico

El hormigón geopolimérico ya ha sido usado para la construcción de edificaciones, como se muestra en la Figura 37, en el 2016 la Universidad de Queensland (Australia) levantó su edificio llamado “Global Change Institute”, esta sede consiguió ser la primera construcción neutral en carbono del país, gracias a la utilización de este hormigón.

Tal como se muestra en la figura38, en el 2014 el aeropuerto Brisbane West Wellcamp (Australia), se enorgulleció por ser el proyecto de hormigón geopolimérico más grande del mundo, con aproximadamente 100,000 toneladas de hormigón, ahorrando así 6,600 toneladas de emisión de CO₂ con respecto a una construcción realizada con hormigón convencional.

Figura 37

Edificio Global Change Institute



Nota. ArchDaily Perú (2013)

Figura 38

Aeropuerto Brisbane West Wellcamp



Nota. The Chronicle (2014)

2.3.13 Propiedades del hormigón

El concreto es la combinación de materiales como arena y piedra (también llamados agregados o áridos) y cemento el cual sirve como conglomerante (Enrique Pasquel, 1998).

2.3.13.1 Resistencia a la compresión. “Una de las principales propiedades mecánicas del hormigón es la resistencia a la compresión. Esta se define como la capacidad para soportar una carga por unidad de área, y se expresa en términos de esfuerzo, generalmente en kg/cm², MPa y con alguna frecuencia en libras por pulgada cuadrada (psi)” (NTP-339.034, 2008, p.3).

2.3.13.2 Asentamiento. “Este método de ensayo originalmente fue desarrollado para proporcionar al usuario una técnica para monitorear la consistencia del concreto no endurecido. Bajo condiciones de laboratorio, con estricto control de todos los materiales del concreto, se ha encontrado que el asentamiento del concreto se incrementa proporcionalmente con el contenido de agua para una mezcla dada y, por lo tanto, está relacionado inversamente con la resistencia del concreto” (NTP-339.035, 2009, p.2).

2.3.13.3 Permeabilidad del hormigón. La permeabilidad en el hormigón hace referencia a la proporción de infiltración de agua mediante la estructura porosa del material en un lapso de tiempo determinado; es así que el concepto de la permeabilidad se asocia a: la composición de la porosidad en el hormigón, la asociación con la liberación de calor o calor de hidratación y evaporación del agua de mezcla, la formación de cavidades y grietas en el hormigón durante el tiempo de fraguado.

“La porosidad del hormigón, determinan la exposición ambiental del material y daños provenientes de los líquidos y de los gases que lo penetran, tales como dióxido de carbono, agua, oxígeno, cloruros, sulfatos, etc.; estos elementos o compuestos originan diversas reacciones químicas, el más crítico es la corrosión del acero en el hormigón armado” (Vélez, 2010).

2.3.13.4 Temperatura en el hormigón. Las elevadas temperaturas por sí solas generan crecimiento de la necesidad de agua, los cuales a su vez incrementan el ratio agua/cemento manifestándose una menor resistencia. Las elevadas temperaturas suelen acelerar la pérdida de asentamiento y generan pérdida del aire incorporado.

2.3.14 Normas técnicas y ensayos

2.3.14.1 Ensayo de resistencia a la compresión. “El método consiste en aplicar una carga de compresión axial a los cilindros moldeados o extracciones diamantinas a una velocidad normalizada en un rango prescrito mientras ocurre la falla. La resistencia a la compresión de la probeta es calculada por división de la carga máxima alcanzada durante el ensayo, entre el área de la sección recta de la probeta” (NTP-339.034, 2008, p.3).

2.3.14.2 Ensayo de medición del asentamiento. “Una muestra de concreto fresco mezclado, se coloca en un molde con forma de cono trunco, y se compacta por varillado. El molde se retira hacia arriba permitiendo que el concreto se asiente. La distancia vertical entre la posición inicial y la desplazada, medida en el centro de la superficie superior del concreto, se informa como el asentamiento del concreto” (NTP-339.035, 2009, p.2).

2.3.14.3 Ensayo de absorción de agua. El ensayo se realiza según la ASTM C642, para evaluar la capacidad de absorción de agua de la muestra de hormigón. Este indicador es una propiedad de suma importancia para determinar la durabilidad y la resistencia del hormigón a la penetración de agua y a la degradación relacionada con la humedad. El objetivo del ensayo es medir el porcentaje de agua que es capaz de absorber el hormigón después de un período de inmersión, para determinar si es permeable o no. El porcentaje de absorción se mide con la diferencia entre los pesos de la muestra seca en horno al inicio del ensayo y con la muestra que estuvo sumergida en agua (Moradikhou & Moradikhou, 2018).

$$\text{Absorción de Agua (\%)} = \frac{M1 - M2}{M2} \times 100$$

M1 = Peso de la muestra después de la inmersión

M2 = Peso de la muestra seco (antes de la inmersión).

2.3.14.4 Ensayo de pérdida de masa. El ensayo para evaluar la pérdida de masa, se realiza para evaluar la resistencia del hormigón cuando se expone a temperaturas elevadas, este se evalúa según la curva de fuego de la ISO 834 que comprende cómo se comporta el hormigón en condiciones de incendios u otras condiciones en la que se puedan alcanzar temperaturas elevadas. La pérdida de masa se evalúa midiendo la diferencia entre la muestra a temperatura ambiente y esa misma luego de exponerse a temperaturas elevadas (Kanagaraj et al., 2022).

$$\text{Pérdida de Masa (\%)} = \frac{M1 - M2}{M1} \times 100$$

M1 = Peso de la muestra antes de exponerse a temperaturas elevadas

M2 = Peso de la muestra luego de exponerse a temperaturas elevadas.

2.4 Definición de términos básicos

Activador alcalino: “Son activadores relacionados con los silicatos alcalinos, donde se hace reaccionar un hidróxido alcalino con una materia prima rica en sílice, la cual se disuelve total o parcialmente” (Payá et al. 2022).

Hormigón: “Mezcla de cemento Portland o cualquier otro cemento hidráulico, agregado fino, agregado grueso y agua, con o sin aditivos” (NTE E.060, 2009, p. 13).

Cenizas volantes: “Las cenizas volantes son el residuo finamente dividido resultante de la combustión del carbón, ya sea en trozos o en polvo, el cual es transportado desde su almacenamiento por los gases de combustión” (Huaquisto y Belizario, 2018).

Cemento: “Material pulverizado que por adición de una cantidad conveniente de agua forma una pasta aglomerante capaz de endurecer, tanto bajo el agua como en el aire. Quedan excluidas las cales hidráulicas, las cales aéreas y los yesos” (Norma Técnica de Edificación E.060, 2009, p. 13).

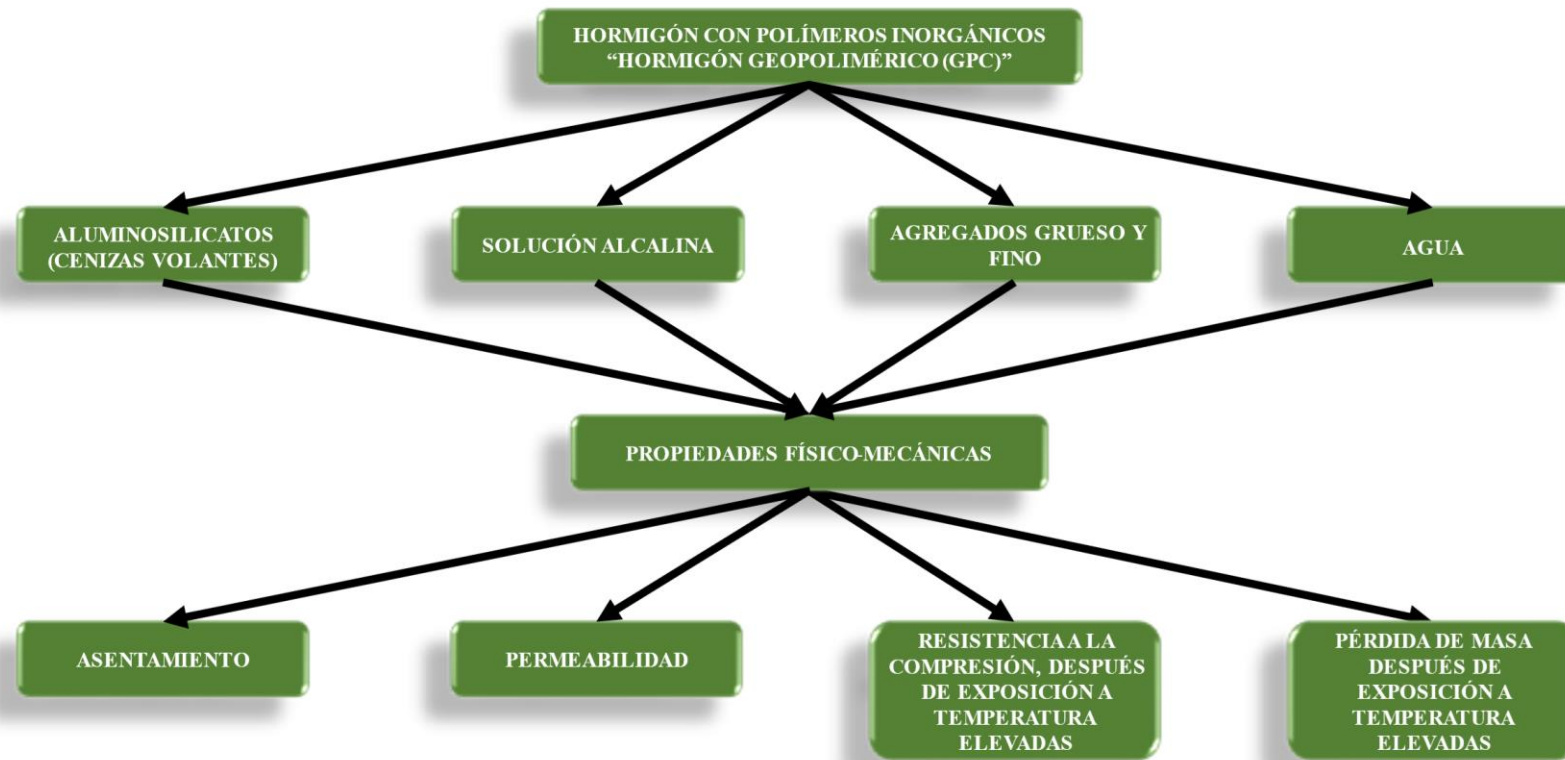
Permeabilidad: “La porosidad del hormigón, determinan la exposición ambiental del material y daños provenientes de los líquidos y de los gases que lo penetran, tales como dióxido de carbono, agua, oxígeno, cloruros, sulfatos, etc.; estos elementos o compuestos originan diversas reacciones químicas, el más crítico es la corrosión del acero en el hormigón armado” (Vélez, 2010).

Polímeros Inorgánicos: “Los geopolímeros son compuestos de polímeros inorgánicos formados por redes de sialatos producidos por una reacción química entre un material precursor rico en óxido de aluminio y óxido de silicio en su composición química, como es el caso de la ceniza volante, metacaolín o puzolana, y una solución acuosa alcalina” (Davidovits, 1988).

2.5 Fundamentos teóricos que sustentan las hipótesis

Figura 39

Fundamentación teórica del hormigón geopolimérico



Nota. Elaboración propia

CAPÍTULO III: SISTEMA DE HIPÓTESIS

3.1 Hipótesis

3.1.1 Hipótesis general

Al determinar los polímeros inorgánicos de tipo mineral como cenizas mejoran las propiedades físico – mecánicas del hormigón.

3.1.2 Hipótesis específicas

- a) Al determinar la relación solución activadora alcalina/ceniza volante incrementa el asentamiento del hormigón.
- b) Al determinar la relación solución activadora alcalina/ceniza volante se reduce la permeabilidad del hormigón.
- c) Al determinar la relación solución activadora alcalina/ceniza volante mejora la resistencia a la compresión del hormigón después de ensayos a altas temperaturas
- d) Al determinar la relación solución activadora alcalina/ceniza volante reduce la pérdida de masa del hormigón después de ensayos a altas temperaturas

3.2 Sistema de variables

3.2.1 Variable independiente

Polímeros Inorgánicos.

3.2.2 Variable dependiente

Propiedades físico-mecánicas del hormigón.

3.3 Definición conceptual y operacional

3.3.1 Definición conceptual

V.I: Los polímeros inorgánicos “geopolímeros”, son material de estudio de gran utilidad en el sector de la construcción, debido a sus propiedades de resistencia y durabilidad que se pueden comprar con los hallados en el hormigón convencional. Estos polímeros son sintetizados a partir de aluminosilicatos, fuentes de óxidos de silicio y de aluminio, activados por un agente alcalino.

V.D: Se refiere a las propiedades físicas y mecánicas del hormigón. Como el asentamiento, la permeabilidad y su resistencia a la compresión y flexión.

3.3.2 Definición operacional

V.I: Se presentan diversas combinaciones o dosificaciones de las soluciones activadoras de álcali con las cenizas volantes para determinar su influencia y mejoras de las propiedades físico-mecánicas del hormigón frente a temperaturas altas, con indicadores como el asentamiento, permeabilidad, la resistencia a compresión y pérdida de masa.

Adicionalmente con el uso de los polímeros inorgánicos se busca distribuir uniformemente el material para mejorar la estructura porosa del hormigón y así reducir la permeabilidad de manera significativa.

V.D: Se estudiarán las propiedades físico-mecánicas del hormigón sometido a diferentes temperaturas, posteriormente por mediante ensayos de laboratorio se mide las propiedades físicas (asentamiento, permeabilidad y pérdida de masa) y mecánicas (resistencia a la compresión). Este último se miden con el uso de una prensa hidráulica calibrada, que aplica una carga de manera constante sobre la superficie de la muestra en condiciones definidas hasta llegar a la ruptura, de esta forma se determinará su esfuerzo máximo y tipo de falla. Se aplican ensayos térmicos en el hormigón endurecido para determinar su influencia en la masa del elemento y su resistencia final, así como la porosidad final o permeabilidad de la estructura.

3.3.3 Operacionalización de las variables

Tabla 26

Operacionalización de variables

VARIABLES	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Índices	Unidad de medida	Escala	Instrumento	Herramienta
V.I. Polímeros inorgánicos (geopolímero)	Material inorgánico que se forma mediante la reacción de aluminosilicatos (cenizas volantes) y soluciones activadoras alcalinas.	Mejora las propiedades físico-mecánicas del hormigón.	Técnicas	Solución Activadora Alcalina	Relación Solución Activadora Alcalina / Ceniza Volante	SAA/FA	Cuantitativa	Formato de laboratorio	Especificaciones técnicas, Norma NTP y ASTM
				Ceniza Volante					
V.D. Propiedades físico-mecánicas del hormigón	Son las características de las propiedades del hormigón en estado fresco y endurecido.	Se refiere al comportamiento del hormigón, como buena trabajabilidad, impermeable, altas resistencias, etc.	Fresco	Asentamiento	Slump	cm	Cuantitativa	Formato de laboratorio	NTP 339.035
				Permeabilidad	Absorción de Agua	%	Cuantitativa		ASTM C642
			Endurecido	Resistencia a temperaturas elevadas	Compresión	kg/cm ²	Cuantitativa	ASTM C 39	
				Resistencia a temperaturas elevadas	Pérdida de masa	%	Cuantitativa	ASTM C 172	
								NTP 339.034	
									ISO 834
									ASTM C618

Nota. Elaboración propia

CAPÍTULO IV: METODOLOGÍA

El estudio acoge la tipología empleada por Iberico, V. y Camayo, E. (2022), debido a que emplea un método deductivo, porque reconoce e identifica las variables de estudio, plantea las hipótesis para cada uno de sus objetivos, operacionaliza las variables y propone una solución al problema de la investigación, es aplicada, ya que propone el uso de polímeros inorgánicos para el mejoramiento de las propiedades físico-mecánicas del hormigón ante la exposición a elevadas temperaturas, tiene un enfoque cuantitativo, dado que los resultados del estudio se presentaron como indicadores o relaciones en peso y porcentajes respecto al uso de polímeros inorgánicos y las cenizas volantes, el instrumento de recolección de datos es retrolectiva, debido a que se recolectó la información de fuentes existentes como artículos científicos y tesis nacionales e internacionales. Finalmente, la investigación es de tipo descriptivo, correlacional y explicativo toda vez que estudia la relación o grado de asociación existente entre la variable independiente y las variables dependientes, estableciéndose que el uso de polímeros inorgánicos incrementa o mejora las propiedades físico-mecánicas en función a la aplicación de diferentes relaciones en peso respecto a la SSA/cenizas volantes. El diseño es no experimental, longitudinal y retrospectivo, ya que no realizamos una manipulación física de las variables, se analiza y evalúa información histórica relacionada con el tema de investigación. Así mismo como se evalúan las propiedades del hormigón en lapso de un periodo de tiempo. El estudio fue de diseño de cohorte (causa-efecto) porque se mide el efecto que provoca el uso de polímero inorgánico en la preparación del hormigón.

El estudio acoge la tipología empleada por Iberico, V. y Camayo, E. (2022) debido a que empleo un método deductivo, de orientación aplicada, enfoque cuantitativo, de instrumento de recolección de datos retrolectivo, tipo descriptivo, explicativo y correlacional, su nivel es descriptivo, el diseño fue no experimental, retrospectivo, longitudinal y de causa-efecto (estudio de cohortes).

4.1 Método de la investigación

El método fue deductivo porque nos basamos en la variable independiente llamada polímeros inorgánicos cuyo objetivo fue mejorar las propiedades físico-mecánicas del hormigón, esto con la finalidad de plantear hipótesis alternas y nulas, y operacionalizar las variables. La orientación fue aplicada debido a que se propone dar solución a la problemática planteada, la cual fue la exposición del hormigón a elevadas temperaturas.

El enfoque fue cuantitativo ya que se recolecto datos numéricos y estadísticos para probar la hipótesis, así mismo los resultados se presentan en relaciones respecto a los pesos de polímeros y cenizas volantes. El instrumento de recolección de datos fue retrolectiva, debido a que se recolecto la información de fuentes existentes como artículos científicos y tesis nacionales e internacionales.

4.2 Tipo de la investigación

Fue descriptiva, explicativa y correlacional. Descriptiva porque describió las características y propiedades de los polímeros inorgánicos. Explicativa porque dio a comprender cuales son los efectos en las propiedades del hormigón cuando se usa polímeros inorgánicos. Correlativo porque se estableció que las propiedades del hormigón fueron directamente afectadas por el polímero inorgánico, en muchos casos mejorando sus propiedades.

4.3 Nivel de investigación

El nivel de la investigación fue descriptivo debido a que se describen el efecto del uso de polímeros inorgánicos, así como las relaciones en cantidades de peso y como afectan en cada una de las variables definidas en la investigación: asentamiento, permeabilidad, resistencia a la compresión y pérdida de masa.

4.4 Diseño de la investigación

El diseño fue no experimental, retrospectivo, longitudinal y de causa-efecto (estudio de cohortes). No experimental porque no realizamos una manipulación física de las variables. Retrospectivo porque se analiza y evalúa información histórica relacionada con el tema de investigación. Longitudinal porque en se evalúan las propiedades del hormigón en lapso de un periodo de tiempo. El estudio fue de diseño de cohorte (causa-efecto) porque se mide el efecto que provoca el uso de polímero inorgánico en la preparación del hormigón.

4.5 Población y muestra

4.5.1 Población

Constituida por todas las investigaciones nacionales e internacionales asociadas con el uso de polímeros inorgánicos en el hormigón, así como las normativas que las rigen los ensayos de asentamiento, permeabilidad, resistencia a la compresión y pérdida de masa.

4.5.2 Muestra

Está conformado por las investigaciones (artículos y tesis) de los autores citados en el presente documento, en las cuales se usan polímeros inorgánicos en el hormigón, donde se evalúan las propiedades físicas y mecánicas.

4.6 Técnicas e instrumentación de recolección de datos

4.6.1 Instrumento de recolección de datos

Se hizo uso de las bases de datos bibliográficos como Scopus, ResearchGate, ProQuest y Scisearch. Se tomaron en consideración las normas técnicas peruanas (NTP), de los distintos indicadores de nuestra investigación: asentamiento, permeabilidad, resistencia a la compresión y pérdida de masa.

4.6.2 Métodos y técnicas

Se realizó la revisión documental de investigaciones relacionadas con el tema. Posterior a ello se filtraron las investigaciones según su grado de relevancia. Por medio de tablas con el software Microsoft Excel se realizó un cuadro resumen de las investigaciones con los indicadores y conclusiones relevantes para un mejor análisis y procesamiento de datos.

4.7 Descripción de procesamientos de análisis

La información recopilada, fue obtenida de tesis y artículos científicos con una antigüedad máxima de 05 años. Posterior a ellos se realizó un filtro, conservando la información de las investigaciones más relevantes para nuestro caso. La información obtenida para nuestra investigación descriptiva, ayudó a comprender los efectos y beneficios que se puede lograr en las propiedades físico-mecánicas del hormigón, con el uso de los polímeros inorgánicos.

En nuestra investigación definimos como variable independiente al polímero inorgánico y como variable dependiente a las propiedades físico-mecánicas del hormigón.

CAPÍTULO V: PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

Para el análisis y comparación de resultados de la presente tesis, nos enfocamos en la relación de la solución activadora alcalina respecto a las cenizas volantes y cómo esta relación influye en las propiedades físico-mecánicas del hormigón, refiriéndose al asentamiento, porosidad, resistencia a la compresión y resistencia a la flexión. Se compiló ensayos de artículos científicos, que enfatizan los indicadores establecidos en la presente investigación.

5.1 Resultado de la investigación

5.1.1 Relaciones de SAA/FA para incrementar el asentamiento del hormigón

SS/SH: Relación Silicato de Sodio / Hidróxido de Sodio

SAA/FA: Relación Solución Activadora Alcalina / Cenizas Volantes

En la Tabla 27 se muestran los autores que han investigado el asentamiento del hormigón y sus resultados obtenido para diferentes relaciones de SAA/FA.

Tabla 27

Matriz de autores para estudio del asentamiento del GPC

Año	Autor	Título	SS/SH	SAA/FA
2021	Kannangara et al.	A study of the residual resistance of powdered reactive geopolymer concrete at elevated temperatures.	0.5, 1.5, 2, 2.5.	0.4, 0.57.
2022	Çelik et al.	Effect of activators in different ratios on compressive strength of geopolymer concrete	1.5, 2.5.	0.6, 0.85.
2021	Ketana et al.	Effect of various parameters on the workability and strength properties of geopolymer concrete.	2.5.	0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9.
2023	Rhomadon et al.	The influence of low alkaline activator on the compressive strength and workability of geopolymer concrete.	2.5.	0.35, 0.40, 0.50, 0.60.

Nota. Elaboración propia

Kannangara et al. (2021)

a) Proporción de Silicato de Sodio/Hidróxido de Sodio (SS/SH): 0.5, 1.5, 2, 2.5.

b) Proporción de Mezcla de Activador Alcalino/Cenizas Volantes (SAA/FA): 0.4, 0.57.

c) Composición de la Solución Activadora Alcalina: Na₂O: 26.2%, H₂O: 73.8%.

d) Solución de 8 Moles.

e) Denominación para el Geopolímero “GP”

En la Tabla 28 se muestran los valores de asentamiento para distintas relaciones de SSA/FA y en la Figura 40 se ilustra los resultados obtenidos.

Tabla 28

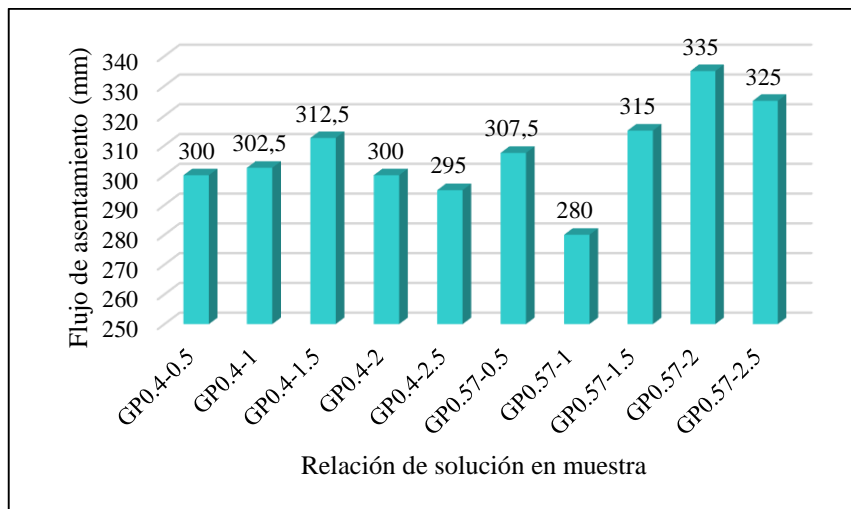
Flujo de asentamiento

Muestra	Asentamiento (mm)
GP0.4-0.5	300.0
GP0.4-1	302.5
GP0.4-1.5	312.5
GP0.4-2	300.0
GP0.4-2.5	295.0
GP0.57-0.5	307.5
GP0.57-1	280.0
GP0.57-1.5	315.0
GP0.57-2	335.0
GP0.57-2.5	325.0

Nota. Kannangara et al, (2021)

Figura 40

Flujo de asentamiento



Nota. Kannangara et al., (2021)

Çelik et al., (2022)

a) Proporción de Silicato de Sodio/Hidróxido de Sodio (SS/SH): 1.5, 2.5.

- b) Proporción de Mezcla de Activador Alcalino/Cenizas Volantes (SAA/FA): 0.6, 0.85.
- c) Composición de la Solución Activadora Alcalina: Na₂O: 15%, SiO₂: 30%, H₂O: 55%.
- d) Denominación para el geopolímero “GP”, el plastificante se denomina como “SP”.

En la Tabla 29 se muestran los valores de asentamiento para distintas relaciones de SSA/FA y en la Figura 41 se ilustra los resultados obtenidos.

Tabla 29

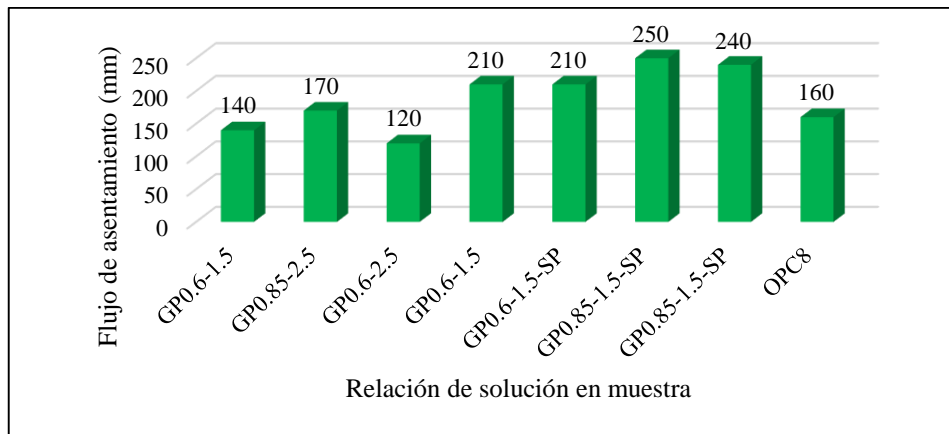
Flujo de asentamiento

Nombre de grupo	Asentamiento (mm)
GP0.6-1.5	140
GP0.85-2.5	170
GP0.6-2.5	120
GP0.6-1.5	210
GP0.6-1.5-SP	210
GP0.6-1.5-SP	250
GP0.6-1.5-SP	240
OPC	160

Nota. Çelik et al., (2022)

Figura 41

Flujo de asentamiento



Nota. Çelik et al., (2022)

Ketana et al. (2021)

- a) Proporción de Silicato de Sodio/Hidróxido de Sodio (SS/SH): 2.5.
- b) Proporción de Mezcla de Activador Alcalino/Cenizas Volantes (SAA/FA): 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9.
- c) Solución de 16 Moles.

En la Tabla 30 se muestran los valores de asentamiento para distintas relaciones de SSA/FA y en la Figura 42 se ilustra los resultados obtenidos.

Tabla 30

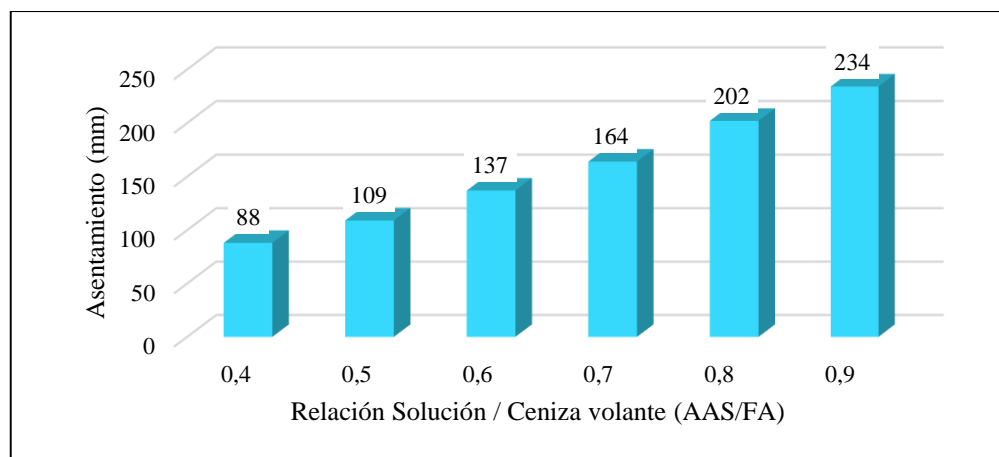
Trabajabilidad de mezclas de GPC hechas con diferentes SAA/FA

Características de diseño	Relación SAA/AF	Asentamiento (mm)
$\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}=2.5$ $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O} = 2.0$ NaOH Molaridad= 16M Ag. fino = 505 kg/m ³ Ag. grueso = 1246 kg/m ³	0.4	88
	0.5	109
	0.6	137
	0.7	164
	0.8	202
	0.9	234

Nota. Ketana et al. (2021)

Figura 42

Trabajabilidad de mezclas de GPC



Nota. Ketana et al. (2021)

Rhomadon et al., (2022)

- a) Proporción de Silicato de Sodio/Hidróxido de Sodio (SS/SH): 2.5.
- b) Proporción de Mezcla de Activador Alcalino/Cenizas Volantes (SAA/FA): 0.35, 0.4, 0.5, 0.6
- c) Solución de 14 Moles.

En la Tabla 31 se muestran los valores de asentamiento para distintas relaciones de SSA/FA y en la Figura 43 se ilustra los resultados obtenidos.

Tabla 31

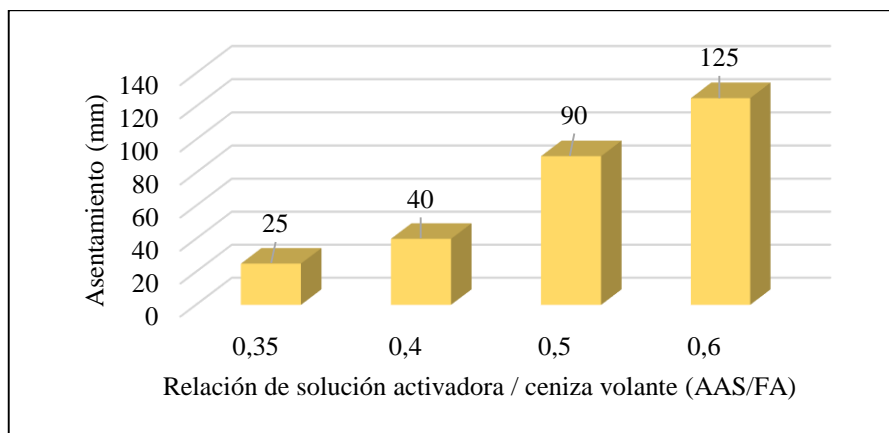
Resultados de ensayo de hormigón geopolímero activador alcalino al 5%

SAA/FA	Asentamiento (mm)
0.6	125
0.5	90
0.4	40
0.35	25

Nota. Romadhon et al. (2023)

Figura 43

Resultados de ensayo de hormigón geopolímero activador alcalino al 5%



Nota. Romadhon et al. (2023)

5.1.2 Relaciones de SAA/FA para reducir la permeabilidad del hormigón

SS/SH: Relación Silicato de Sodio / Hidróxido de Sodio

SAA/FA: Relación Solución Activadora Alcalina / Cenizas Volantes

En la Tabla 32 se muestran los autores que han investigado la permeabilidad del hormigón y sus resultados obtenidos para diferentes relaciones de SAA/FA.

Tabla 32*Matriz de autores para estudio de la permeabilidad del GPC*

Año	Autor	Título	SS/SH	SAA/FA
2021	Moradikhou, S.& Moradikhou, A.	Geopolymer Concrete Based on Fly Ash Cured at Ambient Condition	1.5	0.5
2020	Atabey et al.	The influence of activator type and quantity on the transport properties of class F fly ash geopolymer	1.5	0.15, 0.20, 0.30, 0.40
2023	Naghizadeh et al.	Long-term strength development and durability index quality of ambient-cured fly ash geopolymer concretes	1.5	0.50, 0.60, 0.65

Nota. Elaboración propia**Moradikhou, S. & Moradikhou, A. (2021)**

- Proporción de Silicato de Sodio/Hidróxido de Sodio (SS/SH): 1.50.
- Proporción de Mezcla de Activador Alcalino/Cenizas Volantes (SAA/FA): 0.50.
- Según la norma de pruebas de permeabilidad, los investigadores aplicaron la norma ASTM C642.
- Resultado de los ensayos:

En la Tabla 33 se muestran los valores de porcentaje de absorción de agua para distintas relaciones de SSA/FA y en la Figura 44 se ilustra los resultados obtenidos.

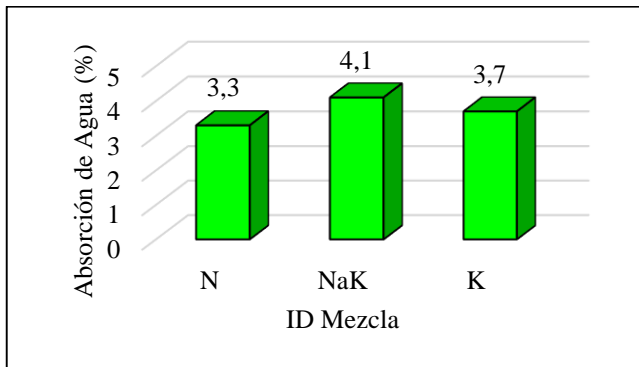
Tabla 33*Resultados de la absorción de agua (kg/m³)*

ID Mezcla	Absorción de Agua (%)
N	3.3
NaK	4.1
K	3.7

Nota. Moradikhou, S. & Moradikhou, A. (2021)

Figura 44

Absorción de Agua (%) de Mezclas



Nota. Moradikhou, S. & Moradikhou, A. (2021)

Atabey et al. (2020)

- Proporción de Silicato de Sodio/Hidróxido de Sodio (SS/SH): 1.50.
- Proporción de Mezcla de Activador Alcalino/Cenizas Volantes (SAA/FA): 0.15, 0.20, 0.30 y 0.40.
- Según la norma de pruebas de permeabilidad, los investigadores aplicaron la norma ASTM C642 y ASTM C1585.

En la Tabla 34 se muestran los valores de porcentaje de absorción de agua para distintas relaciones de SSA/FA y en la Figura 45 se ilustra los resultados obtenidos.

Tabla 34

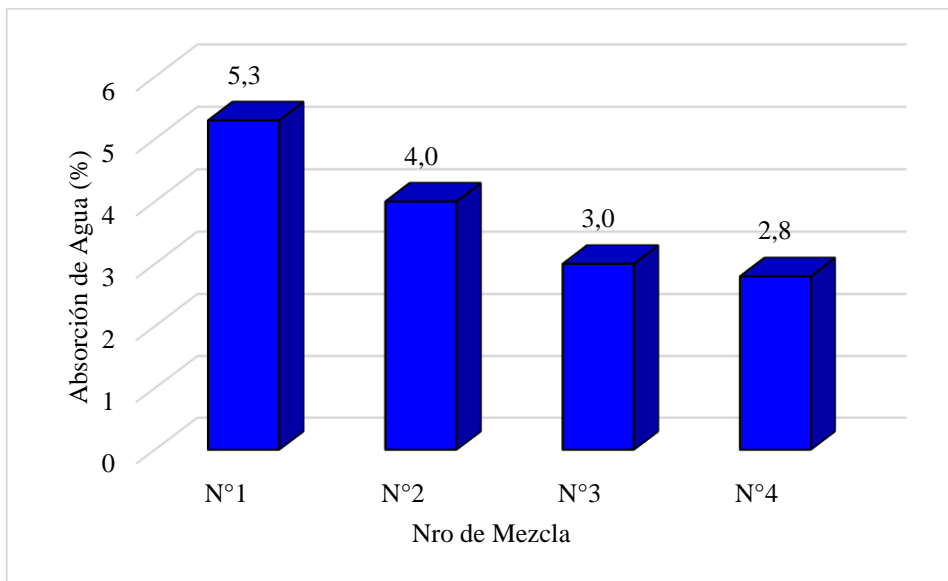
Resultado de absorción de agua (%)

Nro Mezcla	Absorción de Agua (%)
1	5.3
2	4.0
3	3.0
4	2.8

Nota. Atabey et al. (2020)

Figura 45

Resultado de Absorción de Agua (%)



Nota. Atabey et al. (2020)

Naghizadeh et al. (2023)

- Proporción de Silicato de Sodio/Hidróxido de Sodio (SS/SH): 1.5 y 2.5.
- Proporción de Mezcla de Activador Alcalino/Cenizas Volantes (SAA/FA): 0.50, 0.60 y 0.65.
- Composición de la Solución Activadora Alcalina:
 - Silicato de Sodio (Na_2SiO_3): No indica.
 - Hidróxido de Sodio (NaOH): Molaridad 16M.
- Según la norma de pruebas de permeabilidad, los investigadores aplicaron la norma ASTM C642.
- Resultado de los ensayos:

En la Tabla 35 se muestran los valores de porcentaje de absorción de agua para distintas relaciones de SSA/FA y en la Figura 46 se ilustra los resultados obtenidos.

Tabla 35

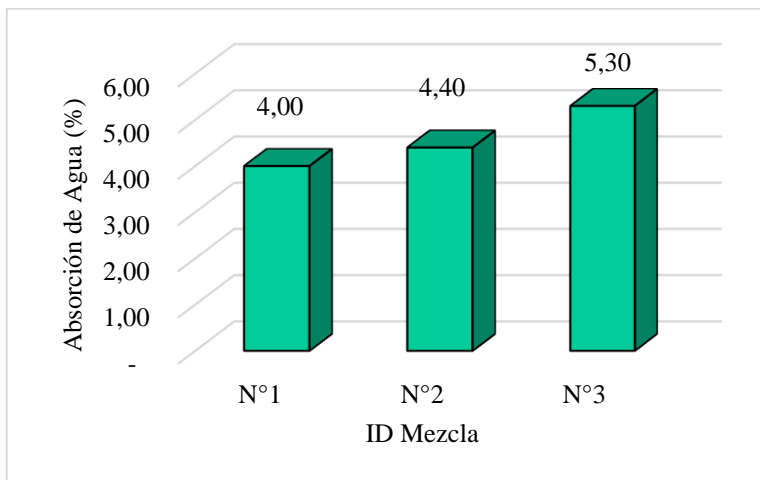
Resultado de absorción de agua (%)

ID Mezcla	Absorción de Agua (%)
N°1	4.00%
N°2	4.40%
N°3	5.30%

Nota. Naghizadeh et al. (2023)

Figura 46

Resultado de Absorción de Agua (%)



Nota. Naghizadeh et al. (2023)

5.1.3 Relaciones de SAA/FA para incrementar la f_c del hormigón

SS/SH: Relación Silicato de Sodio / Hidróxido de Sodio

SAA/FA: Relación Solución Activadora Alcalina / Cenizas Volantes

En la Tabla 36 se muestran los autores que han investigado la resistencia a la compresión del hormigón y sus resultados obtenidos para diferentes relaciones de SAA/FA.

Tabla 36

Matriz de autores para estudio de resistencia a la compresión del GPC

Año	Autor	Título	SS/SH	SAA/FA
2019	Zhang et al.	The Effect of Ordinary Portland Cement Substitution on the Thermal Stability of Geopolymer Concrete	1	0.44
2022	Razak et al.	Fire-Exposed Fly-Ash-Based Geopolymer Concrete: Effects of Burning Temperature on Mechanical and Microstructural Properties	2.5, 3	0.38, 0.45, 0.50
2021	Kannangara et al.	A Study of the Residual Strength of Reactive Powder-Based Geopolymer Concrete under Elevated Temperatures	0.5, 1.5, 2, 2.5	0.4, 0.57
2023	Ozbayrak et al.	Comprehensive experimental analysis of the effects of elevated temperatures in geopolymer concretes with variable alkali activator ratios	1.5, 2.5, 3.5	0.5, 0.6, 0.7
2020	Hassan et al.	Mechanical Behaviour and Microstructural Investigation of Geopolymer Concrete After Exposure to Elevated Temperatures	2.5, 3	0.435
2020	Zhang et al.	Deterioration of Ambient-Cured and Heat-Cured Fly Ash Geopolymer Concrete by High Temperature Exposure and Prediction of its Residual Compressive Strength.	1.75	0.45

Nota. Elaboración propia

Zhang et al. (2019)

- a) Proporción de Silicato de Sodio/Hidróxido de Sodio (SS/SH): 1.
- b) Proporción de Mezcla de Activador Alcalino/Cenizas Volantes (SAA/FA): 0.44.
- c) Composición de la Solución Activadora Alcalina:
- Na₂O: 15.4%, SiO₂:38.5%, H₂O: 46.1%.
 - Solución de 10 Moles.
- d) Temperaturas a las cuales fueron sometidas las muestras: 20°C, 100°C, 200°C, 400°C, 600°C y 800°C.
- e) Denominación para el Geopolímero “GP”

En la Tabla 37 se muestran los componentes de cada uno de los tipos de mezclas y en la Tabla 38 los resultados de la resistencia a la compresión residual para distintas relaciones de SSA/FA, en la Figura 47 se ilustra los resultados obtenidos.

Tabla 37*Diseño de mezcla FAGC (kg/m³)*

Mezclas	Agregado Grueso	Arena	Ceniza Volante	OPC	Solución Activadora Alcalina
OPC-0	1172	539	459	0	200
OPC-5	1172	539	436.05	22.95	200
OPC-10	1172	539	413.1	45.9	200

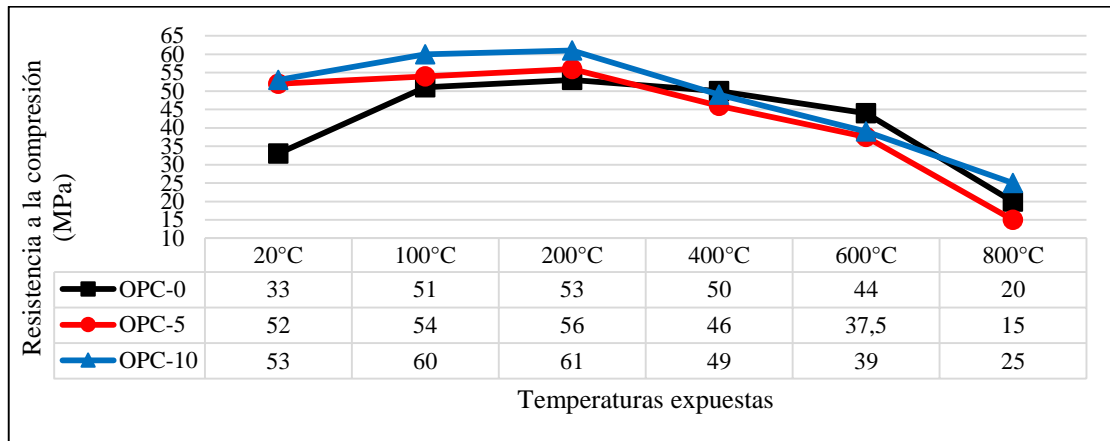
Nota. Zhang et al. (2019)**Tabla 38***Resistencia residual a la compresión (MPa) de FAGC bajos en calcio*

Muestra ID	20°C	100°C	200°C	400°C	600°C	800°C
OPC-0	33	51	53	50	44	20
OPC-5	52	54	56	46	37.5	15
OPC-10	53	60	61	49	39	25

Nota. Zhang et al. (2019)

Figura 47

Resistencia residual a la compresión (MPa) de FAGC bajos en calcio



Nota. Zhang et al. (2019)

Razak et al. (2022)

- a) Proporción de Silicato de Sodio/Hidróxido de Sodio (SS/SH): 2.5, 3.
- b) Proporción de Mezcla de Activador Alcalino/Cenizas Volantes (SAA/FA): 0.38, 0.45, 0.50.
- c) Solución de 10 Moles.
- d) Temperaturas a las cuales fueron sometidas las muestras: 20°C, 500°C y 1200°C.
- e) Denominación para el Geopolímero “GP”

En la Tabla 39 y Tabla 40 se muestran los componentes de las mezclas de OPC y GPC respectivamente. En la Tabla 41 se muestran los resultados de la resistencia a la compresión residual para distintas relaciones de SSA/FA y en la Figura 48 se ilustra los resultados obtenidos.

Tabla 39

Proporciones de la mezcla de hormigón a base de OPC

Mezcla	OPC (Kg/m ³)	Agua (Kg/m ³)	Arena (Kg/m ³)	Agregados Gruesos (Kg/m ³)	Superplastificante (Kg/m ³)
OPC20	342	205	652	1211	-
OPC40	405	190	642	1193	-
OPC60	600	190	498	1162	4

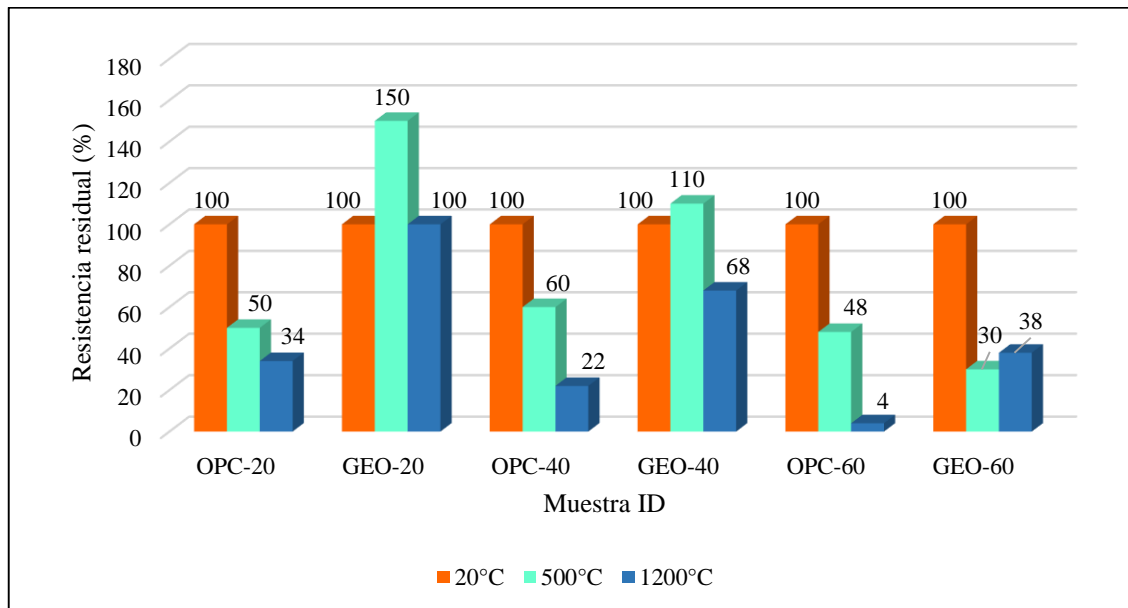
Nota. Razak et al. (2019)

Tabla 40*Proporciones de la mezcla de hormigón geopolimérico*

Mezcla	Ceniza Voladora (Kg/m ³)	Arena (Kg/m ³)	Agregado grueso (Kg/m ³)	Hidróxido de sodio (Kg/m ³)	Silicato de sodio (Kg/m ³)	Agua (Kg/m ³)
GEO20	400	850	950	57	143	40
GEO40	400	640	1000	43.5	108.5	40
GEO60	460	700	1050	46	138	46

Nota. Razak et al. (2019)**Tabla 41***Resistencia residual a compresión (%) de probetas de hormigón*

Muestra ID	20°C	500°C	1200°C
OPC-20	100	50	34
GEO-20	100	150	100
OPC-40	100	60	22
GEO-40	100	110	68
OPC-60	100	48	4
GEO-60	100	30	38

Nota. Razak et al. (2019)**Figura 48***Resistencia residual a compresión de probetas de hormigón**Nota.* Razak et al. (2019)

Kannangara et al. (2021)

- a) Proporción de Silicato de Sodio/Hidróxido de Sodio (SS/SH): 0.5, 1.5, 2, 2.5.
- b) Proporción de Mezcla de Activador Alcalino/Cenizas Volantes (SAA/FA): 0.4, 0.57.
- c) Solución de 8 Moles.
- d) Temperaturas a las cuales fueron sometidas las muestras: 0°C, 400°C y 800°C.
- e) Denominación para el Geopolímero “GP”

En la Tabla 42 se muestran los resultados de la resistencia a la compresión residual para distintas relaciones de SSA/FA y en la Figura 49 se ilustra los resultados obtenidos.

Tabla 42

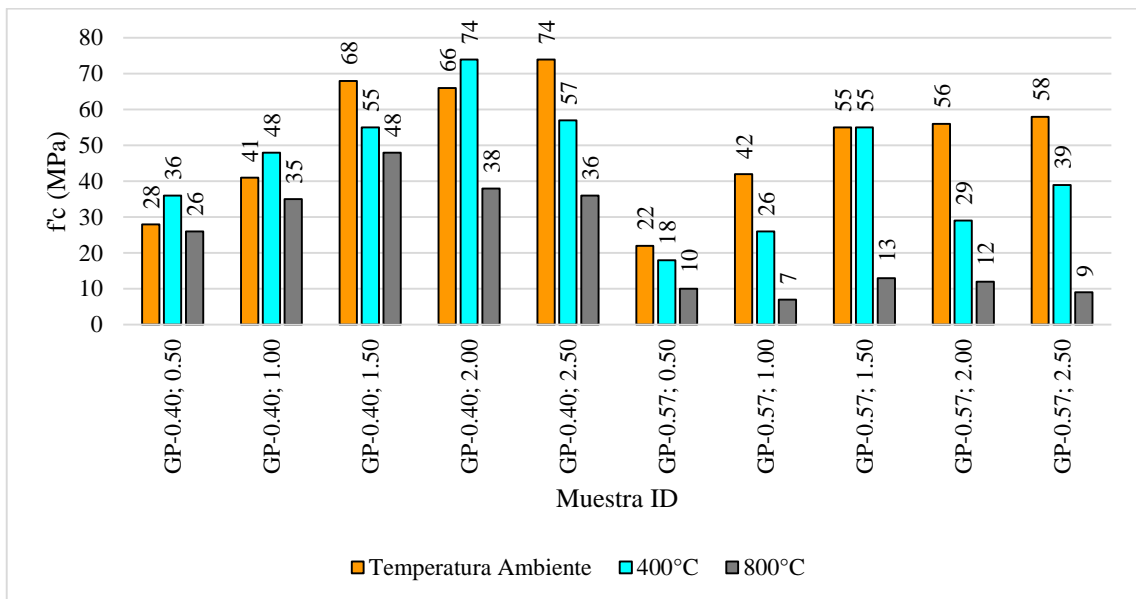
Resistencias a la compresión (MPa) inicial y residual de las probetas GP

Muestra ID	Temperatura Ambiente	400°C	800°C
GP-0.40; 0.50	28	36	26
GP-0.40; 1.00	41	48	35
GP-0.40; 1.50	68	55	48
GP-0.40; 2.00	66	74	38
GP-0.40; 2.50	74	57	36
GP-0.57; 0.50	22	18	10
GP-0.57; 1.00	42	26	7
GP-0.57; 1.50	55	55	13
GP-0.57; 2.00	56	29	12
GP-0.57; 2.50	58	39	9

Nota. Kannangara et al. (2021)

Figura 49

F'c (Mpa) inicial y residual de las probetas GP



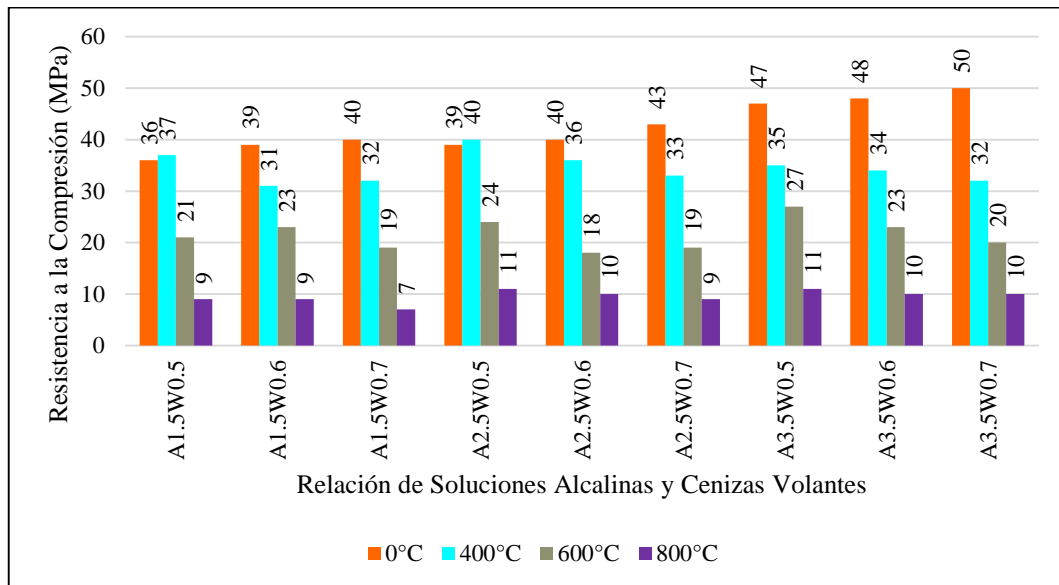
Nota. Kannangara et al. (2021)

Ozbayrak et al. (2023)

- a) Proporción de Silicato de Sodio/Hidróxido de Sodio (SS/SH): 1.5, 2.5, 3.5.
 - b) Proporción de Mezcla de Activador Alcalino/Cenizas Volantes (SAA/FA): 0.5, 0.6, 0.7.
 - c) Composición de la Solución Activadora: Na₂O: 14.41%, SiO₂: 29.64%, H₂O: 55.73%.
 - d) Temperaturas a las cuales fueron sometidas las muestras: 0°C, 400°C, 600°C y 800°C.
- En la Tabla 43 se muestran los resultados de la resistencia a la compresión residual para distintas relaciones de SSA/FA y en la Figura 50 se ilustra los resultados obtenidos.

Tabla 43*F'c Resistencia (MPa) a diferentes temperaturas elevadas*

Muestra ID	0°C	400°C	600°C	800°C
A1.5W0.5	36	37	21	9
A1.5W0.6	39	31	23	9
A1.5W0.7	40	32	19	7
A2.5W0.5	39	40	24	11
A2.5W0.6	40	36	18	10
A2.5W0.7	43	33	19	9
A3.5W0.5	47	35	27	11
A3.5W0.6	48	34	23	10
A3.5W0.7	50	32	20	10

*Nota. Ozbayrak et al. (2023)***Figura 50***Resistencia residual a la compresión a diferentes temperaturas elevadas**Nota. Ozbayrak et al. (2023)***Rahmadina & Ekaputri (2017)**

- Proporción de Silicato de Sodio/Hidróxido de Sodio (SS/SH): 2.
- Proporción de Mezcla de Activador Alcalino/Cenizas Volantes (SAA/FA): 0.55.
- Composición de la Solución Activadora Alcalina: Na₂O: 18.50%, SiO₂: 36.40%, H₂O: 45.10%.
- Temperaturas a las cuales fueron sometidas las muestras: 0°C, 200°C, 400°C, 600°C y 800°C.

e) La comparación se da entre el hormigón tradicional denominado “OPC” y el hormigón con geopolímeros denominado “GC50” dado que la resistencia inicial o patrón oscila los 50 MPa.

En la Tabla 44 se muestran los resultados de la resistencia a la compresión para mezclas de OPC y GPC y en la Figura 51 se ilustra los resultados obtenidos.

Tabla 44

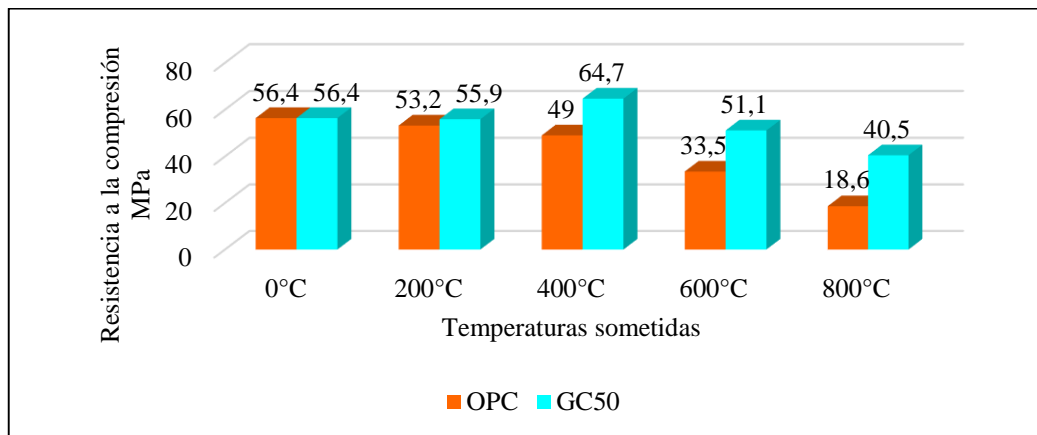
Resistencia residual a la compresión a diferentes temperaturas elevadas

Temperatura Sometidas	OPC (MPa)	GC50 (MPa)
0°C	56.4	56.4
200°C	53.2	55.9
400°C	49	64.7
600°C	33.5	51.1
800°C	18.6	40.5

Nota. Rahmadina & Ekaputri (2017)

Figura 51

Resistencia residual a la compresión a diferentes temperaturas elevadas



Nota. Rahmadina & Ekaputri (2017)

Hassan et al., (2020)

- a) Proporción de Mezcla de Activador Alcalino/Cenizas Volantes (SAA/FA): 0.435
- b) Proporción de Silicato de Sodio/Hidróxido de Sodio (SS/SH): 2.5 y 3.0
- c) Composición de la Solución Activadora Alcalina:
 - Silicato de Sodio (Na_2SiO_3): Na_2O : 8.83%, SiO_2 : 27.64%, H_2O : 63.53%
 - Hidróxido de Sodio (NaOH): Molaridad 8M.
- d) Temperaturas a las cuales fueron sometidas las muestras: 0°C, 100°C, 200°C, 400°C, 600°C, 800°C y 1000°C.

e) Nomenclatura:

- GPN-A: Hormigón geopolimérico de resistencia normal curado al ambiente
- GPN-H: Hormigón geopolimérico de resistencia normal curado al horno
- GPH-A: Hormigón geopolimérico de alta resistencia curado al ambiente
- GPH-H: Hormigón geopolimérico de alta resistencia curado al horno

En la Tabla 45 se muestran los resultados de la resistencia a la compresión para mezclas de curadas al ambiente y al horno. En la Figura 52 se ilustra los resultados obtenidos.

Tabla 45

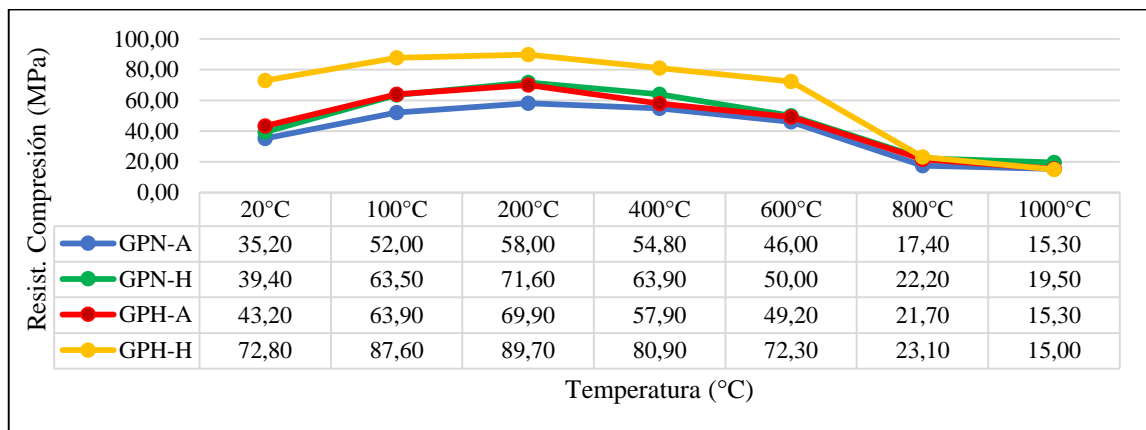
Resistencia a la compresión (Mpa) después de la exposición al calor

Temp. (°C)	GPN-A	GPN-H	GPH-A	GPH-H
20	35.20	39.40	43.20	72.80
100	52.00	63.50	63.90	87.60
200	58.00	71.60	69.90	89.70
400	54.80	63.90	57.90	80.90
600	46.00	50.00	49.20	72.30
800	17.40	22.20	21.70	23.10
1000	15.30	19.50	15.30	15.00

Nota. Hassan et al. (2020)

Figura 52

Resistencia a la compresión (Mpa) a después de exposición al calor



Nota. Hassan et al. (2020)

Zhang et al., (2020)

a) Proporción de Mezcla de Activador Alcalino/Cenizas Volantes (SAA/FA): 0.45

b) Proporción de Silicato de Sodio/Hidróxido de Sodio (SS/SH): 1.75

c) Composición de la Solución Activadora Alcalina:

- Silicato de Sodio (Na_2SiO_3): Na_2O : 16.27%, SiO_2 : 34.64%, H_2O : 49.09%
 - Hidróxido de Sodio (NaOH): Molaridad 10M.
- d) Temperaturas a las cuales fueron sometidas las muestras: Ambiente °C, 200°C, 400°C, 600°C y 800°C.
- e) Nomenclatura:
- GPC-H: Geopolymer Concrete – curado horno
 - GPC-A: Geopolymer Concrete – curado ambiente
 - OPC: Ordinary Portland Cement

En la Tabla 46 se muestran los resultados de la resistencia a la compresión para mezclas de OPC y GPC. En la Figura 53 se ilustra los resultados obtenidos.

Tabla 46

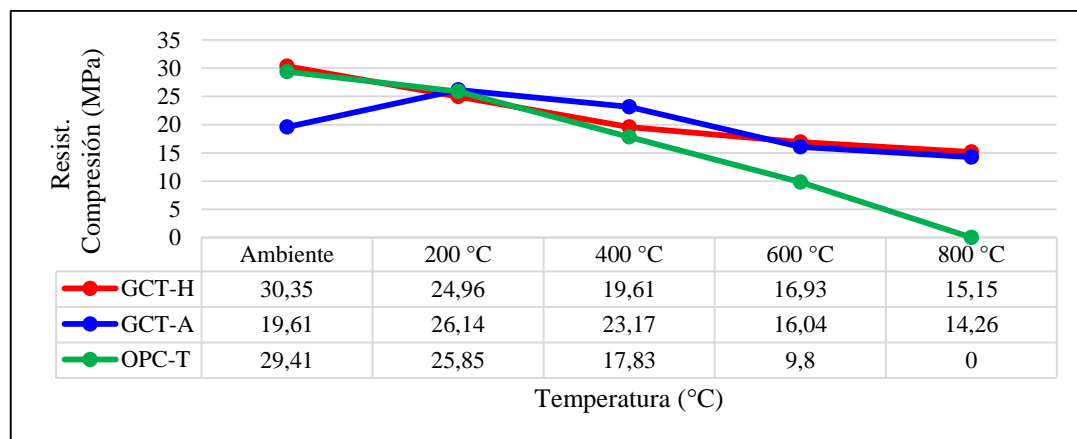
Resistencia a la compresión (MPa) GPC y OPC

Temperatura (°C)	GPC-H	GPC-A	OPC-T
Ambiente	30.35	19.61	29.41
200	24.96	26.14	25.85
400	19.61	23.17	17.83
600	16.93	16.04	9.80
800	15.15	14.26	0.00

Nota. Zhang et al. (2020)

Figura 53

Resistencia a la Compresión (MPa) GPC y OPC



Nota. Adaptado de Zhang et al. (2020)

5.1.4 Relaciones de SAA/FA para la reducir la pérdida de masa del hormigón

SS/SH: Relación Silicato de Sodio / Hidróxido de Sodio

SAA/FA: Relación Solución Activadora Alcalina / Cenizas Volantes

En la Tabla 47 se muestran los autores que han investigado la pérdida de masa del hormigón y sus resultados obtenidos para diferentes relaciones de SAA/FA.

Tabla 47

Matriz de autores para estudio de pérdida de masa del GPC

Año	Autor	Título	SS/SH	SAA/FA
2022	Kanagaraj et al.	Investigation on Engineering Properties and Micro-Structure Characteristics of Low Strength and High Strength Geopolymer Composites Subjected to Standard Temperature Exposure	1.5	0.45
2020	Zhang et al.	Deterioration of Ambient-Cured and Heat-Cured Fly Ash Geopolymer Concrete by High Temperature Exposure and Prediction of its Residual Compressive Strength	2.5	0.45
2020	Hassan et al.	Mechanical Behaviour and Microstructural Investigation of Geopolymer Concrete After Exposure to Elevated Temperatures	1.7	0.45
2020	Jiang et al.	A Comparative Study on Geopolymers Synthesized by Different Classes of Fly Ash After Exposure to Elevated Temperatures	2.0	0.45
2019	Zhang et al.	The Effect of Ordinary Portland Cement Substitution on the Thermal Stability of Geopolymer Concrete	2.5	0.45
2023	Özbayrak et al.	Comprehensive Experimental Analysis of the Effects of Elevated Temperatures in Geopolymer Concretes with Variable Alkali Activator Ratios	1.5, 2.5, 3.5	0.45
2021	Razak et al.	Fire Performance of Fly Ash-Based Geopolymer Concrete: Effect of Burning Temperature	3.0	0.45

Nota. Elaboración propia

Kanagara et al. (2022)

- a) Proporción Solución Activadora Alcalina, Silicato Sodio/Hidróxido Sodio (SS/SH): 1.50.
- b) Proporción de Mezcla de Solución Activadora Alcalina/Cenizas Volantes (SAA/FA): 0.45.
- c) Los pesos para el diseño del hormigón con $f^c=40\text{MPa}$ son: 500 kg/m³ de cenizas volantes, 650 kg/m³ de agregado fino, 1250 kg/m³ de agregado grueso, 132.48 kg/m³ de Silicato de Sodio (SS), 88.2 kg/m³ de Hidróxido de Sodio (SH) y una relación Activador Alcalino/Cenizas Volantes de 0.45.
- d) Los investigadores ensayaron los especímenes de hormigón a distintas temperaturas, según el estándar de curva de fuego estándar ISO 834.
- e) Abreviaciones: GPC-NO: Hormigón Geopolimérico de Resistencia Normal Curado al Horno

En la Tabla 48 se muestran el porcentaje de pérdida de masa en muestras de GPC a distintas temperaturas. En la Figura 54 se ilustra los resultados obtenidos.

Tabla 48

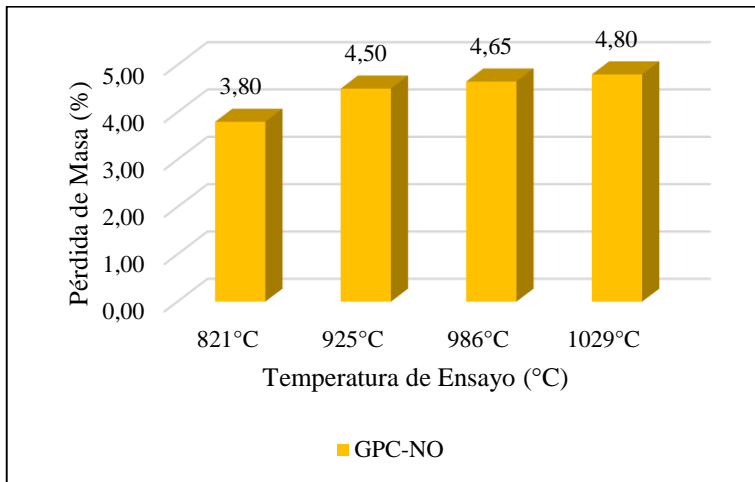
Porcentaje de pérdida de masa (%) – GPC-NO

Temperatura de Ensayo (°C)	Pérdida de Masa (%) - GPC-NO
821°C	3.80
925°C	4.50
986°C	4.65
1029°C	4.80

Nota. Kanagara et al. (2022)

Figura 54

Pérdida de Masa (%) del GPC a 821°C, 925°C, 986°C y 1029°C



Nota. Kanagara et al. (2022)

Zhang et al. (2020)

- Proporción Solución Activadora Alcalina, Silicato Sodio/Hidróxido Sodio (SS/SH): 2.50.
- Proporción de Mezcla de Solución Activadora Alcalina/Cenizas Volantes (SAA/FA): 0.45.
- Los pesos para el diseño del hormigón con $f^c = 40$ MPa son: 460 kg/m³ de cenizas volantes, 539 kg/m³ de agregado fino, 1201 kg/m³ de agregado grueso, 142.90 kg/m³ de Silicato de Sodio (SS), 57.10 kg/m³ de Hidróxido de Sodio (SH) y una relación Activador Alcalino/Cenizas Volantes de 0.45.
- Los investigadores ensayaron los especímenes de hormigón a distintas temperaturas, según el estándar de curva de fuego estándar ISO 834.
- Abreviaciones: GPN-H: Hormigón Geopolimérico de Resistencia Normal Curado al Horno

En la Tabla 49 se muestran el porcentaje de pérdida de masa en muestras de GPC a distintas temperaturas. En la Figura 55 se ilustra los resultados obtenidos.

Tabla 49

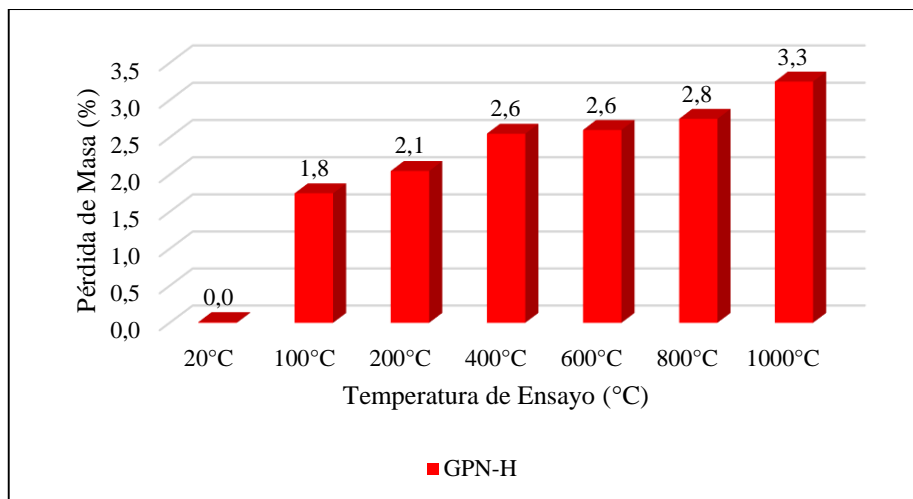
Porcentaje de pérdida de masa (%) - GPN-H

Temperatura (°C)	Pérdida de Masa (%) - GPN-H
20°C	0.0
100°C	1.8
200°C	2.1
400°C	2.6
600°C	2.6
800°C	2.8
1000°C	3.3

Nota. Zhang et al. (2020)

Figura 55

Pérdida de Masa (%) del GPC a 100°C hasta los 1000°C



Nota. Zhang et al. (2020)

Hassan et al. (2020)

- Proporción Solución Activadora Alcalina, Silicato Sodio/Hidróxido Sodio (SS/SH): 1.75.
- Proporción de Mezcla de Solución Activadora Alcalina/Cenizas Volantes (SAA/FA): 0.45.
- Los pesos para el diseño del hormigón GPC con $f'c = 30\text{MPa}$ son: 410 kg/m³ de cenizas volantes, 530.60 kg/m³ de agregado fino, 1044.40 kg/m³ de agregado grueso, 117.40 kg/m³ de Silicato de Sodio (SS), 67.10 kg/m³ de Hidróxido de Sodio (SH) y una relación Activador Alcalino/Cenizas Volantes de 0.45.

- d) Los pesos para el diseño del hormigón OPC con $f'_c = 30\text{MPa}$ son: 400 kg/m³ de cemento Portland, 622 kg/m³ de agregado fino, 1072 kg/m³ de agregado grueso, 190 kg/m³ de agua y una relación agua/cemento de 0.48.
- e) Los investigadores ensayaron los especímenes de hormigón a distintas temperaturas, según el estándar de curva de fuego estándar ISO 834.
- f) Abreviaciones: GPC-H: Hormigón Geopolimérico de Curado al Horno, OPC-T: Hormigón Portland Ordinario Curado al Agua

En la Tabla 50 se muestran el porcentaje de pérdida de masa en muestras de GPC a distintas temperaturas. En la Figura 56 se ilustra los resultados obtenidos.

Tabla 50

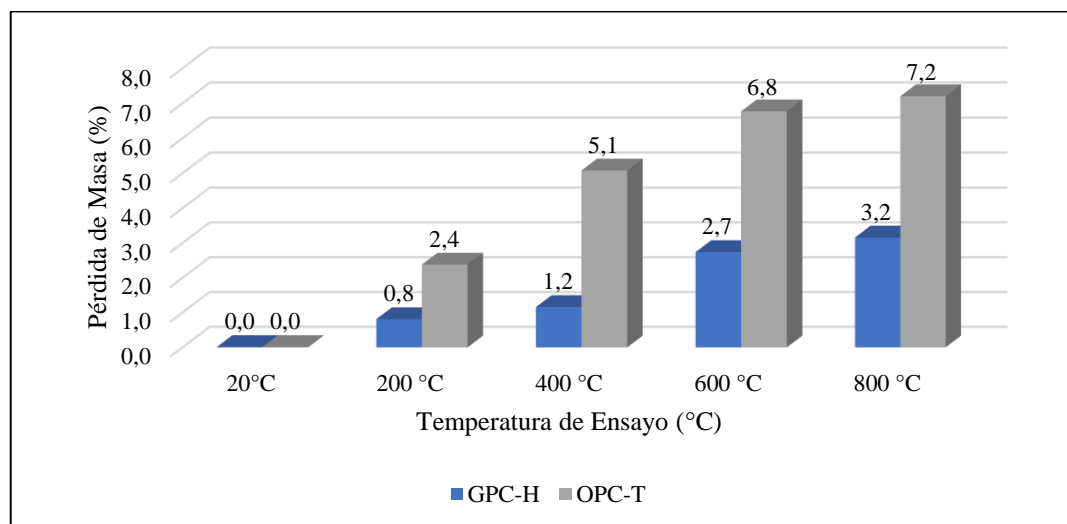
Pérdida de masa (%) de GPC y OPC a temperaturas elevadas

Temperatura (°C)	GPC-H	OPC-T
20°C	0.0	0.0
200 °C	0.8	2.4
400 °C	1.2	5.1
600 °C	2.7	6.8
800 °C	3.2	7.2

Nota. Zhang et al. (2020)

Figura 56

Pérdida de Masa (%) del GPC y OPC a 200°C, 400°C, 600°C y 800°C



Nota. Zhang et al. (2020)

Jiang et al. (2020)

- a) Proporción Solución Activadora Alcalina, Silicato Sodio/Hidróxido Sodio (SS/SH): 2.00.

- b) Proporción de Mezcla de Solución Activadora Alcalina/Cenizas Volantes (SAA/FA): 0.45.
- c) Los pesos para el diseño del hormigón GPC con $f'c = 45$ MPa son: 1000 kg/m³ de cenizas volantes, 300 kg/m³ de Silicato de Sodio (SS), 150 kg/m³ de Hidróxido de Sodio (SH) y una relación Activador Alcalino/Cenizas Volantes de 0.45.
- d) Los investigadores ensayaron los especímenes de hormigón a distintas temperaturas, según el estándar de curva de fuego estándar ISO 834.
- e) Abreviaciones: F-GPC: Hormigón Geopolimérico con Cenizas Volantes Clase F

En la Tabla 51 se muestran el porcentaje de pérdida de masa en muestras de GPC a distintas temperaturas. En la Figura 57 se ilustra los resultados obtenidos.

Tabla 51

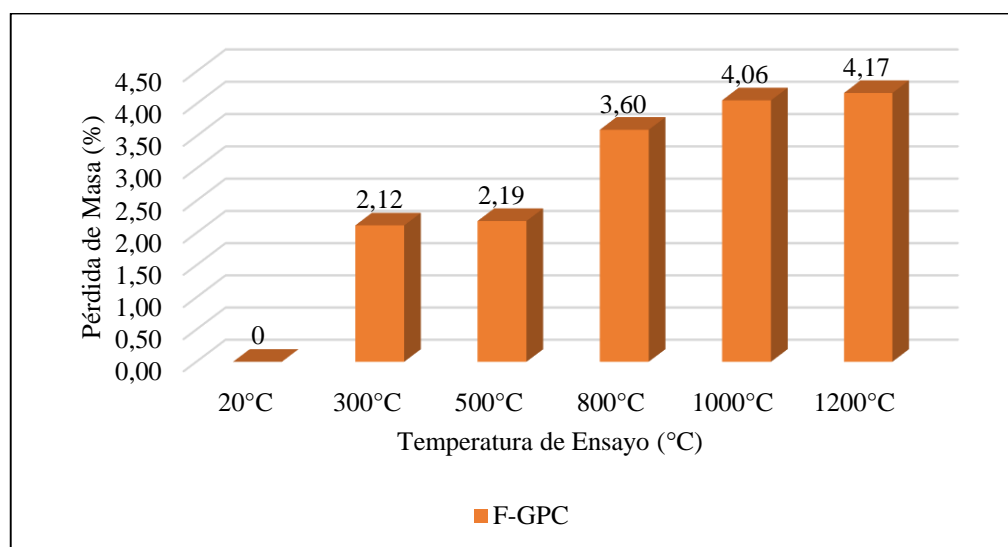
Porcentaje de pérdida de masa (%)

Temperatura (°C)	Pérdida de Masa (%) – F-GPC
20°C	0
300°C	2.12
500°C	2.19
800°C	3.60
1000°C	4.06
1200°C	4.17

Nota. Jiang et al. (2020)

Figura 57

Pérdida de Masa (%) del GPC y OPC a 300°C hasta los 1200°C



Nota. Jiang et al. (2020)

Zhang et al. (2019)

- a) Proporción Solución Activadora Alcalina, Silicato Sodio/Hidróxido Sodio (SS/SH): 2.50.
- b) Proporción de Mezcla de Solución Activadora Alcalina/Cenizas Volantes (SAA/FA): 0.45.
- c) Los pesos para el diseño del hormigón GPC con $f'_c = 30$ MPa son: 459 kg/m³ de cenizas volantes, 539 kg/m³ de agregado fino, 1172 kg/m³ de agregado grueso, 200 kg/m³ entre Silicato de Sodio (SS) e Hidróxido de Sodio (SH) con relación de SS/SH = 2.5 y una relación Activador Alcalino/Cenizas Volantes de 0.45.
- d) Los investigadores ensayaron los especímenes de hormigón a distintas temperaturas, según el estándar de curva de fuego estándar ISO 834.
- e) Abreviaciones: GPC-OPC-0%: Hormigón Geopolimérico con 0% de adición de Cemento Portland

En la Tabla 52 se muestran el porcentaje de pérdida de masa en muestras de GPC a distintas temperaturas. En la Figura 58 se ilustra los resultados obtenidos.

Tabla 52

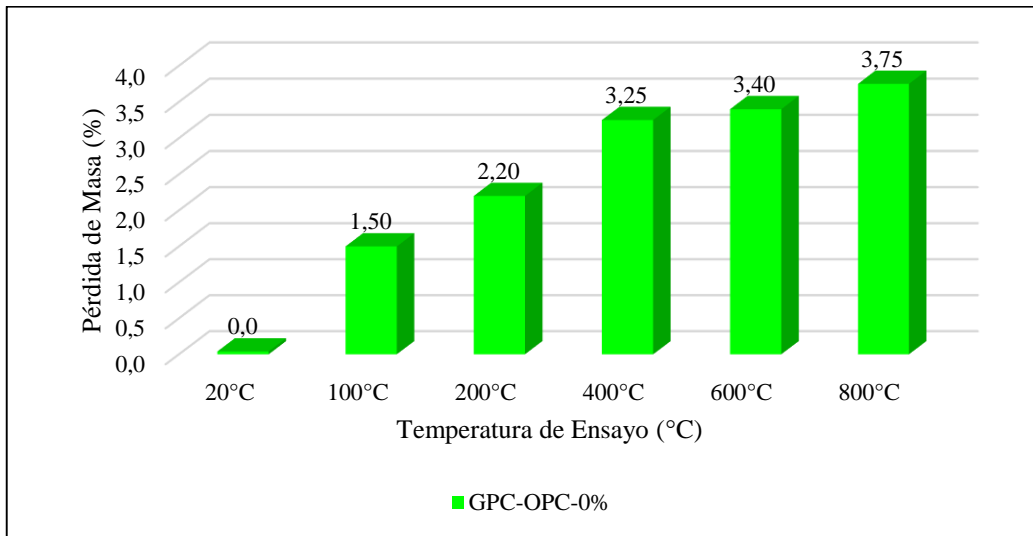
Porcentaje de pérdida de masa del hormigón geopolimérico

Temperatura (°C)	GPC-OPC-0%
20°C	0.0
100°C	1.50
200°C	2.20
400°C	3.25
600°C	3.40
800°C	3.75

Nota. Zhang et al. (2019)

Figura 58

Pérdida de Masa (%) del GPC y OPC a 100°C hasta los 800°C



Nota. Zhang et al. (2019)

Ozbayrak et al. (2023)

- a) Proporción Solución Activadora Alcalina, Silicato Sodio/Hidróxido Sodio (SS/SH): 1.50, 2.50 y 3.50.
- b) Proporción de Mezcla de Solución Activadora Alcalina/Cenizas Volantes (SAA/FA): 0.45.
- c) Los pesos para el diseño del hormigón GPC con $f'c = 40$ MPa son: 406 kg/m³ de cenizas volantes, 643 kg/m³ de agregado fino, 1194 kg/m³ de agregado grueso, 122 kg/m³ de Silicato de Sodio (SS), 81 kg/m³ de Hidróxido de Sodio (SH) y una relación Activador Alcalino/Cenizas Volantes de 0.45.
- d) Los pesos para el diseño del hormigón GPC con $f'c = 40$ MPa son: 406 kg/m³ de cenizas volantes, 643 kg/m³ de agregado fino, 1194 kg/m³ de agregado grueso, 145 kg/m³ de Silicato de Sodio (SS), 58 kg/m³ de Hidróxido de Sodio (SH) y una relación Activador Alcalino/Cenizas Volantes de 0.45.
- e) Los pesos para el diseño del hormigón GPC con $f'c = 40$ MPa son: 406 kg/m³ de cenizas volantes, 643 kg/m³ de agregado fino, 1194 kg/m³ de agregado grueso, 158 kg/m³ de Silicato de Sodio (SS), 45 kg/m³ de Hidróxido de Sodio (SH) y una relación Activador Alcalino/Cenizas Volantes de 0.45.
- f) Los investigadores ensayaron los especímenes de hormigón a distintas temperaturas, según el estándar de curva de fuego estándar ISO 834.
- g) Abreviaciones: A1.5-W0.45, A2.5-W0.45, A3.5-W0.45: Hormigón Geopolimérico con SS/SH=1.5, 2.5, 3.5 y SAA/FA=0.45.

En la Tabla 53 se muestran el porcentaje de pérdida de masa en muestras de GPC a distintas temperaturas. En la Figura 59 se ilustra los resultados obtenidos.

Tabla 53

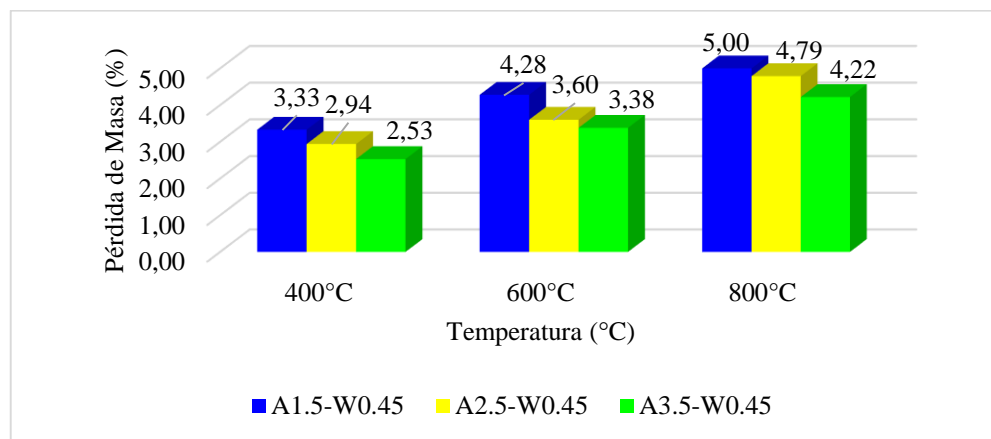
Porcentaje de pérdida de masa del hormigón geopolimérico (%)

Temperatura (°C)	A1.5-W0.5	A2.5-W0.5	A3.5-W0.5
400°C	3.33	2.94	2.53
600°C	4.28	3.60	3.38
800°C	5.00	4.79	4.22

Nota. Ozbayrak et al. (2023)

Figura 59

Pérdida de Masa (%) del GPC y OPC a 400°C, 600°C y 800°C



Nota. Ozbayrak et al. (2023)

Razak et al. (2021)

- a) Proporción Solución Activadora Alcalina, Silicato Sodio/Hidróxido Sodio (SS/SH): 2.50.
- b) Proporción de Mezcla de Solución Activadora Alcalina/Cenizas Volantes (SAA/FA): 0.45.
- c) Los pesos para el diseño del hormigón GPC con $f'c = 40\text{MPa}$ son: 400 kg/m³ de cenizas volantes, 640 kg/m³ de agregado fino, 1000 kg/m³ de agregado grueso, 109 kg/m³ de Silicato de Sodio (SS), 44 kg/m³ de Hidróxido de Sodio (SH) y una relación Activador Alcalino/Cenizas Volantes de 0.45.
- d) Los investigadores ensayaron los especímenes de hormigón a distintas temperaturas, según el estándar de curva de fuego estándar ISO 834.
- e) Abreviaciones: OPC G40: Hormigón Ordinario Portland $f'c=40$ MPa, GEO-40: Hormigón Geopolimérico $f'c=40$ MPa.

En la Tabla 54 se muestran el porcentaje de pérdida de masa en muestras de GPC a distintas temperaturas. En la Figura 60 se ilustra los resultados obtenidos.

Tabla 54

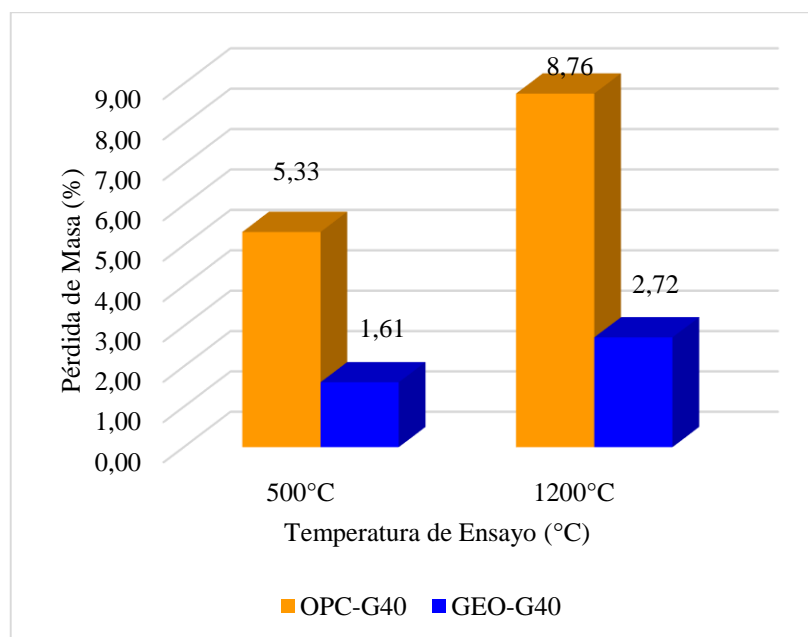
Porcentaje de pérdida de masa de hormigón OPC y GPC

Temperatura (°C)	OPC G40	GEO-G40
500°C	5.33	1.61
1200°C	8.76	2.72

Nota. Razak et al. (2021)

Figura 60

Pérdida de masa (%) del GPC y OPC a 500°C y 1200°C



Nota. Razak et al. (2021)

5.2 Contrastación de hipótesis

5.2.1 Contrastación de la primera hipótesis

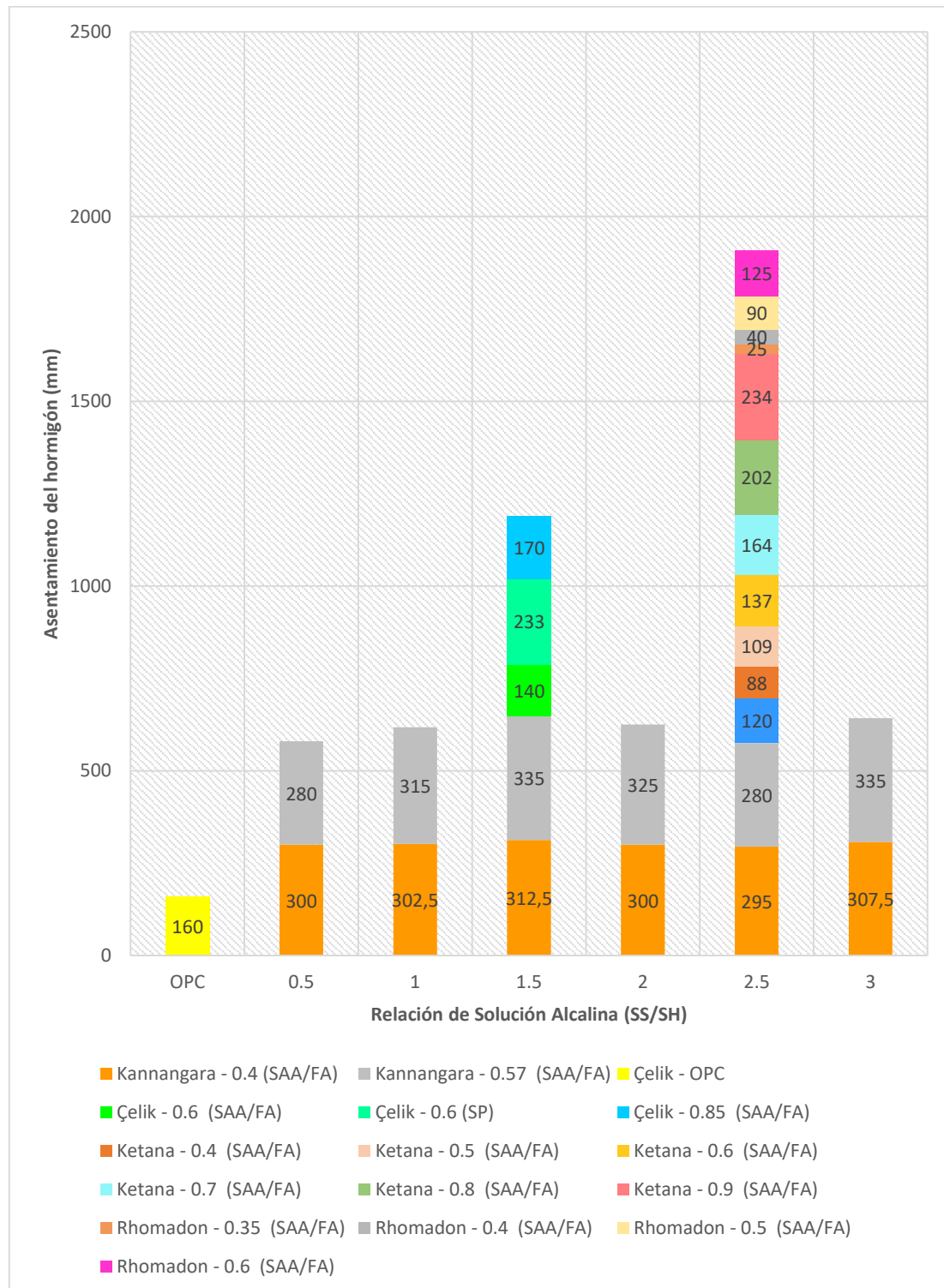
Hipótesis 1: Al analizar la relación solución activadora alcalina/ceniza volante aumenta el asentamiento del hormigón.

Hipótesis auxiliar:

- H0: Al analizar la relación solución activadora alcalina/ceniza volante no aumenta el asentamiento del hormigón.
- H1: Al analizar la relación solución activadora alcalina/ceniza volante si aumenta el asentamiento del hormigón.

Figura 61

Flujo de asentamiento (mm) – Relación de solución activadora alcalina (SS/SH) vs Relación de Solución Activadora Alcalina/Cenizas Volantes (SS/FA)



Nota. Elaboración propia

Observación:

En la Figura 61, donde SAA: Solución activadora alcalina, FA: Ceniza volante, SS: Silicato de sodio, SH: Hidróxido de sodio, OPC: Cemento portland, el autor Kannangara destaca que la mejor relación para la solución activadora alcalina (SS/SH) corresponde a 1.5 en conjunto al uso de una relación de 0.57 para la solución activadora alcalina/ceniza volante (SAA/FA), dando como resultado un asentamiento de 335 mm (13.19”) es decir un hormigón con consistencia fluida muy trabajable.

Çelik et al., por su lado resalta que el valor óptimo para la relación de solución activadora alcalina (SS/SH) corresponde a 1.5 respecto al uso de una relación de 0.85 para la solución activadora alcalina/ceniza (SAA/FA) volante, dando como resultado un asentamiento de 170 mm. Cabe resaltar que los autores también evaluaron el uso de superplastificante con la misma relación de solución activadora alcalina (SS/SH) pero con un valor de 0.6 para la relación de SAA/FA (solución alcalina/ceniza volante) dando como resultado un asentamiento de 233 mm (9.17”) es decir un hormigón con consistencia fluida muy trabajable.

Ketana et al., obtuvieron los resultados más favorables para una relación de solución alcalina (SS/SH) con un valor de 2.5 y el uso de una relación 0.9 para la solución alcalina/ceniza (SS/FA) volante, el cual dio como resultado un asentamiento final de 234 mm (9.21”) es decir un hormigón con consistencia fluida muy trabajable.

Rhomadon et al., los autores recalcan que el valor más óptimo resulta para una relación de 2.5 en solución activadora alcalina (SS/SH) y el uso de relación de 0.6 para la solución activadora alcalina/ceniza volante (SS/FA), el cual dio como resultado un asentamiento de 125 mm (4.92”) es decir un hormigón con consistencia fluida trabajable.

Se rechaza la hipótesis nula (H_0) y se acepta la hipótesis alterna (H_1), esto resulta de analizar la figura 64, se observa que al ir aumentando la relación de solución activadora alcalina (SS/SH) y de igual forma aumentar la relación de solución activadora alcalina/ceniza volante (SAA/FA), el asentamiento del hormigón con polímeros inorgánicos incrementa su valor en comparación a la muestra patrón.

5.2.2 Contrastación de la segunda hipótesis

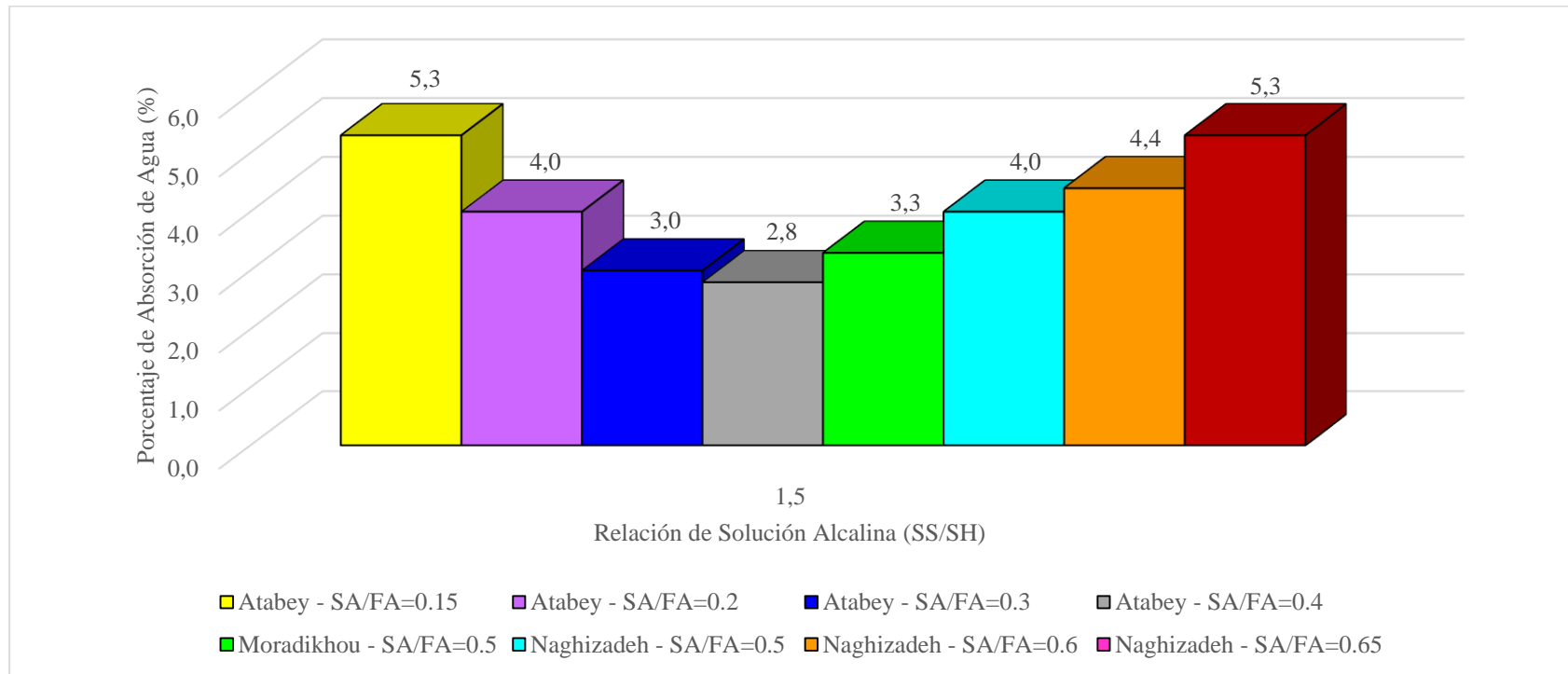
Hipótesis 2: Al analizar la relación solución activadora alcalina/ceniza volante se reduce la permeabilidad del hormigón.

Hipótesis auxiliar:

- H0: Al analizar la relación solución activadora alcalina/ceniza volante no reduce la permeabilidad del hormigón.
- H1: Al analizar la relación solución activadora alcalina/ceniza volante si reduce la permeabilidad del hormigón.

Figura 62

Porcentaje de Absorción de Agua (%) – Relación de Solución Activadora Alcalina (SS/SH) vs Relación de Solución Activadora Alcalina/Cenizas Volantes (SAA/FA)



Nota. Elaboración propia

Observación:

En la figura 62, todos los autores han usado una relación de SS/SH (Silicato de Sodio/Hidróxido de Sodio) igual a 1.5.

Atabey utilizó relaciones de SAA/FA (Solución Activadora/Ceniza Volante) de 0.15, 0.20, 0.30 y 0.40; definió que la relación SAA/FA más óptimo era de 0.40 ya que mostraba un valor bajo de absorción de agua igual a 2.8%; si reducía el valor de la relación SAA/FA las muestras aumentaban su porcentaje de absorción de agua y muestras con valores por encima del 5% se consideran como hormigones permeables.

Moradikhou, definió que el valor más óptimo de la relación de SAA/FA es de 0.50, ya que obtenían valores de absorción de agua menores a un 5%, que les indicaba que se trata de un hormigón de baja permeabilidad.

Naghizadeh, definió que a medida que aumentaba la relación de SAA/FA, aumentaba la permeabilidad del hormigón, por ello concluye que SAA/FA=0.5 es el valor más óptimo para lograr un hormigón de baja permeabilidad.

Por lo tanto, para lograr valores bajos de porcentaje de absorción de agua, el valor óptimo es de una relación SAA/FA entre 0.30 y 0.50.

5.2.3 Contrastación de la tercera hipótesis

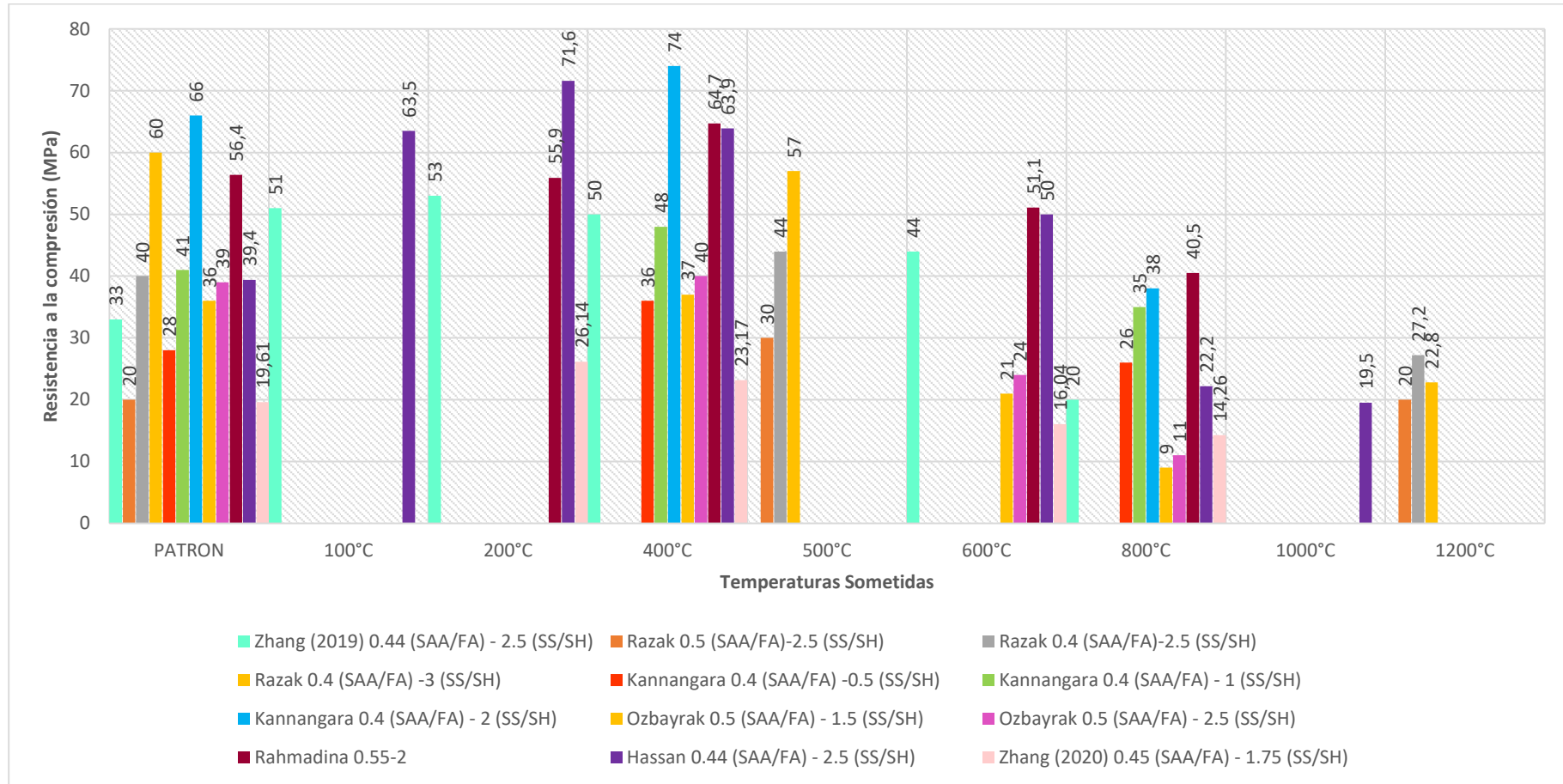
Hipótesis 3: Al analizar la relación solución activadora alcalina/ceniza volante aumenta la resistencia a la compresión del hormigón sometido a elevadas temperaturas.

Hipótesis auxiliar:

- H0: Al analizar la relación solución activadora alcalina/ceniza volante no aumenta la resistencia a la compresión del hormigón sometido a elevadas temperaturas.
- H1: Al analizar la relación solución activadora alcalina/ceniza volante si aumenta la resistencia a la compresión del hormigón sometido a elevadas temperaturas.

Figura 63

Resistencia a la compresión del hormigón con geopolímeros – Relación de Solución Activadora Alcalina (SS/SH) vs Relación de Solución Activadora Alcalina/Cenizas Volantes (SS/FA)



Nota. Elaboración propia

Observación:

En la Figura 63, donde SAA: Solución activadora alcalina, FA: Ceniza volante, SS: Silicato de sodio, SH: Hidróxido de sodio, se puede observar que el autor Zhang et al. (2019), utilizaron una relación de solución activadora alcalina (SS/SH) de valor 1, mientras que la relación de solución activadora alcalina/ceniza volante (SAA/FA) un valor de 0.44, cuyos resultados muestran que al someter la muestra a los 200°C se logra una resistencia de 53 MPa, con lo cual se logra un aumento del 60 % respecto a la muestra patrón a temperatura ambiente la cual obtuvo una resistencia de 33 MPa.

Razak et al. realizó ensayos con relaciones de solución activadora alcalina (SS/SH) de 2.5 y 3, mientras que para la relación de solución activadora alcalina/ceniza volante (SS/FA) varía con 0.38, 0.45 y 0.50, los resultados muestran que al someter las muestras a una temperatura de 500°C el hormigón con geopolímeros obtiene un incremento porcentual de 50% superior a la muestra patrón curada a temperatura ambiente.

Kannangara et al. en su investigación utilizan una relación de solución activadora alcalina (SS/SH) de valor 2, mientras que para la relación de solución activadora alcalina respecto a la ceniza volante (SS/FA) usan un valor de 0.4, con lo cual al someter las muestras a una temperatura elevada de 400°C obtiene un valor de 74 MPa con lo cual se obtiene un incremento de 12% respecto a la muestra patrón curada a temperatura ambiente que obtuvo un valor de 66 MPa.

Ozbayrak et al. en sus ensayos utilizaron una relación de solución activadora alcalina (SS/SH) con un valor de 1.5, mientras que para la relación de solución activadora alcalina /cenizas volantes (SS/FA) usaron un valor de 0.5, con lo cual sometiendo las muestra a diferentes temperaturas al cabo de los 400°C se obtuvo una resistencia de 37 MPa con un aumento porcentual mínimo respecto a la muestra patrón curada a temperatura ambiente con 36 MPa, sin embargo la muestra mantuvo e inclusive aumentar su resistencia por lo cual se da como óptimo el diseño de mezcla.

Hassan et al. los investigadores utilizaron una relación de solución activadora alcalina (SS/SH) con valores de 2.5 y 3, mientras que para la relación de solución activadora alcalina/ceniza volantes (SAA/FA) usaron un valor de 0.44, en la investigación se realizaron ensayos con muestras curadas al horno y temperatura ambiente, con lo cual se concluyó que los mejores resultados se obtuvieron para un curado al horno, ya que al someter las muestras a una temperatura de 200°C se obtuvo una resistencia de 71.60 MPa es decir un incremento del 82 % respecto a la muestra patrón curada a temperatura ambiente.

Zhang et al. (2020), en su investigación utilizaron una relación de solución activadora alcalina (SS/SH) de valor 1.75, mientras que para la relación solución activadora/ceniza volante (SAA/FA) usaron un valor de 0.45, con lo cual obtuvieron resultados favorables a la temperatura de 400°C con una resistencia a la compresión de 23.17 MPa con curado ambiente, logrando un incremento de 29% respecto a la muestra patrón curada a temperatura ambiente con una resistencia inicial de 17.83 MPa.

Se rechaza la hipótesis nula (H0) y se acepta la hipótesis alterna (H1), esto resulta de analizar la figura 37, en la cual se observa que al someter las muestras de hormigón con geopolímeros a temperaturas elevadas en un rango de 200°C a 500°C se obtiene mejoras en el incremento de la resistencia a la compresión con aumentos desde el 12% hasta un 89% dependiendo el tipo de dosificación a utilizar.

5.2.4 Contrastación de la cuarta hipótesis

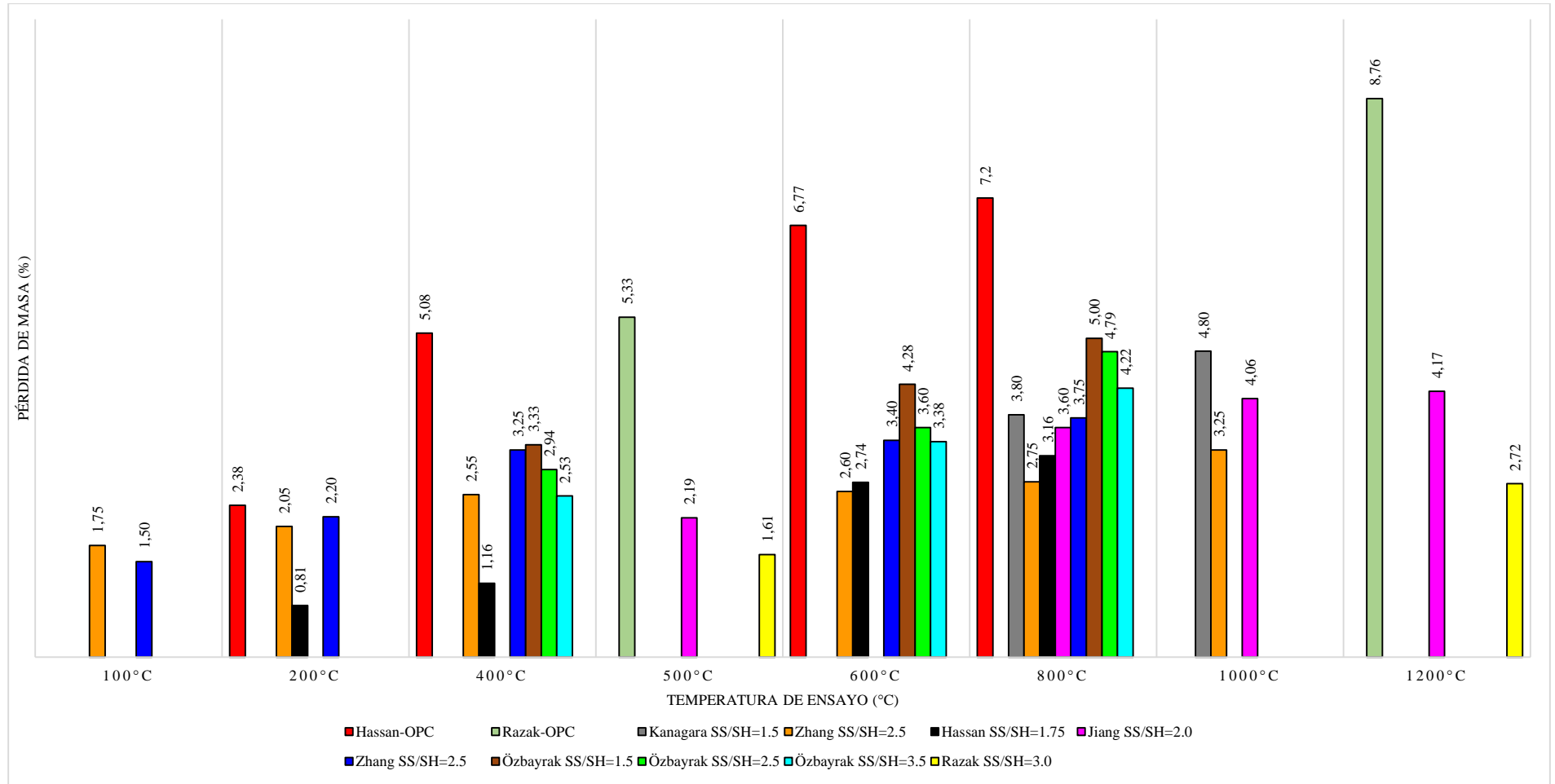
Hipótesis 4: Al determinar la relación solución activadora alcalina/ceniza volante reduce la pérdida de masa del hormigón después de ensayos a altas temperaturas.

Hipótesis auxiliar:

- H0: Al determinar la relación solución activadora alcalina/ceniza volante no reduce la pérdida de masa del hormigón después de ensayos a altas temperaturas.
- H1: Al determinar la relación solución activadora alcalina/ceniza volante si reduce la pérdida de masa del hormigón después de ensayos a altas temperaturas.

Figura 64

Pérdida de Masa (%) del Hormigón Geopolimérico – Usando Relación de Solución Activadora Alcalina/Cenizas Volantes (SAA/FA) = 0.45



Nota. Elaboración propia

Observación:

En la figura 64, todos los autores han usado una relación de SAA/FA (Solución Activadora/Ceniza Volante) igual a 0.45.

Hassan, realizó ensayos de exposición a altas temperaturas del hormigón ordinario, este a una temperatura de 800°C empezó a sufrir daños severos, además del agrietamiento, se desprendieron partes de la muestra. Asimismo, Rasak, también ensayó muestras de hormigón ordinario que, a una temperatura de 1200°C, la muestra perdió un 8.76% de su masa, reflejando así que el OPC no resiste ensayos a altas temperaturas.

Kanagara utilizó en su diseño una relación SS/SH=1.50, sus muestras fueron ensayadas a 800°C y 1000°C, donde para este último la pérdida de masa llegó a un 4.80%.

Ozbayrak utilizó en su primer diseño una relación SS/SH=1.50, sus muestras fueron ensayadas a 400°C y 800°C, donde para este último la pérdida de masa llegó a un 5.00%. Para su segundo diseño las muestras ensayadas tuvieron una relación de SS/SH=2.5, a los 800°C perdió el 4.79% de su masa y para el tercer diseño, la relación es de SS/SH=3.5 donde a los 800°C perdió el 4.22% de su masa.

Hassan utilizó en su diseño una relación SS/SH=1.75, sus muestras fueron ensayadas desde los 200°C hasta los 800°C, donde para este último la pérdida de masa llegó a un 3.16%.

Jiang utilizó en su diseño una relación SS/SH=2.00, sus muestras fueron ensayadas desde los 500°C hasta los 1200°C, donde para este último la pérdida de masa llegó a un 4.17%.

Zhang utilizó en su diseño una relación SS/SH=2.50, sus muestras fueron ensayadas desde los 100°C hasta los 800°C, donde para este último la pérdida de masa llegó a un 3.75%.

Razak utilizó en su diseño una relación SS/SH=3.00, sus muestras fueron ensayadas a 500°C y 1200°C, donde para este último la pérdida de masa llegó a un 2.72%.

DISCUSIÓN

1. En función a los resultados analizados en la figura 61 respecto al flujo de asentamiento para un hormigón con polímeros inorgánicos de acuerdo a los artículos internacionales que tienen como autores a Kannangara (2021), Çelik (2022), Ketana (2021) y Rhomadon (2023) y observando en la figura 63 se obtuvo como resultado la aceptación de la hipótesis 1, en la cual se determina que para incrementar el asentamiento del hormigón con polímeros inorgánicos se requiere de una proporción de solución activadora alcalina (SS/SH) 1.5 esto para los dos primeros autores, los cuales obtienen un óptimo resultado pero difieren en la proporción de solución activadora alcalina/ceniza volante (SS/FA) con 0.57 para Kannangara y 0.85 para Çelik, cabe acotar que el segundo autor reduce el factor (SS/FA) a 0.6 con el uso de un superplastificante “SP”. Mientras que los 2 autores restantes recomiendan una proporción de solución activadora alcalina (SS/SH) equivalente a 2.5 para el incremento del asentamiento, sin embargo, difieren en el uso de del factor solución activadora alcalina/ceniza volante (SS/FA) con valor de 0.9 para Ketana y 0.6 para Rhomadon.

2. De acuerdo a la figura 62, Atabey et al. (2020), las muestras de hormigones geopolímeros con valores de absorción de agua inferiores al 5%, son considerados como hormigones de baja permeabilidad. Wardhono et al. (2017), menciona que en hormigones ordinarios (OPC) una absorción de agua de más del 5% se clasifica como hormigón de alta permeabilidad, mientras que menos del 3% se clasifica como hormigón de baja permeabilidad, Naghizadeh et al. (2023), indica que los hormigones geopolímeros son considerados de baja permeabilidad porque tiene valores de absorción de agua menores a un 5.50%, mientras que los valores de los hormigones de cemento portland típicamente varían ampliamente y pueden llegar hasta el 10%. Según los resultados analizados de los ensayos tanto de Porcentaje de Absorción de Agua (%) de autores como Atabey (2020), Moradikhou (2021) y Naghizadeh (2023), se pudo contrastar la hipótesis n° 2, en la cual se obtuvieron valores que indican una baja permeabilidad. Se mostró que los valores más bajos de porcentaje de absorción de agua, se dan cuando se usa una relación de Solución Activadora Alcalina/Ceniza Volante (SAA/FA) de 0.30, 0.40 y 0.50 para una proporción de Silicato de Sodio/Hidróxido de Sodio (SS/SH) de 1.50. En términos generales la mayor parte de los valores obtenidos tienen resultados por debajo de un 5.5% que indican que se tiene una baja permeabilidad.

3. Se analizó los resultados en función a 6 autores mencionados en la figura 63 de los cuales se observó que Zhang (2019) y Hassan coincidieron con un aumento en la

resistencia a la compresión sometiendo el hormigón geopolimérico a una temperatura de 200°C logrando aumentos porcentuales del 29% y 82% respectivamente esto en comparación a la muestra patrón curada a temperatura ambiente (20°C), asimismo coinciden en el uso de un factor de solución activadora alcalina respecto a las cenizas volantes (SS/FA) de 0.44, sin embargo difieren en el ratio de solución activadora alcalina (SS/SH), Zhang utilizó un valor de 1 mientras que Hassan aplicó un valor de 2.5 y 3. Los autores restantes coincidieron con valores óptimos a temperaturas entre 400°C y 500°C, tal es el caso de Ozbayrak y Zhang (2020), Ozbayrak logró un aumento porcentual mínimo, sin embargo mantuvo la resistencia a pesar de someter el hormigón a elevadas temperaturas lo cual resulta favorable, mientras que Zhang (2020) obtuvo un aumento del 29% respecto a la muestra patrón curada a temperatura ambiente (20°C), los autores utilizan ratios de solución activadora alcalina (SS/SH) de 1.5 y 1.75 respectivamente, de igual forma coinciden en el factor de solución activadora alcalina respecto a la ceniza volantes con valores de 0.5 y 0.45 en ambos casos usan valores casi cercanos para lograr una mejora óptima sometiendo el hormigón con geopolímeros a temperaturas de 400°C. Finalmente Razak y Kannangara coinciden con valores de solución activadora alcalina (SS/SH) mayores a 2, mientras que para el factor de solución activadora alcalina respecto a ceniza volante usan un valor promedio de 0.4, con lo cual sometiendo a temperaturas de 500°C y 400°C se obtuvieron incrementos de un 50% y 12% respectivamente, en comparación con la muestra patrón curada a temperatura ambiente (20°C).

4. De acuerdo a los resultados mostrados en la figura 64, los autores Hassan et al. (2020) y Razak et al. (2021), han ensayado muestras de Hormigón (OPC) en hornos a temperaturas de 200°C, 400°C, 500°C, 600°C, 800°C, 1000°C y 1200°C, teniendo porcentajes de pérdida de masa que se elevan progresivamente desde un 2.38% a 200°C hasta un 8.76% a 1200°C. Mientras que para autores como Zhang et al. (2019) que usa una relación SS/SH=2.5 obtiene %PM de 2.20% a una temperatura de 200°C y 3.75% cuando alcanza los 800°C. Ozbayrak et al. (2019) utilizó relaciones de SS/SH de 1.5, 2.5 y 3.0, donde para ensayos a temperaturas de 800°C obtuvo resultado de %PM (porcentaje de pérdida de masa) de 5.00%, 4.79% y 4.22% respectivamente. Jiang et al. (2020) que usó una relación de SS/SH de 2.0, obtuvo valores de %PM de 4.06% y 4.17% para ensayos a una temperatura de 1000°C y 1200°C respectivamente. Hassan et al. (2020) que usó una relación de SS/SH=1.75 obtuvo el valor de %PM de 3.16% a una temperatura de 800°C. Todos los autores obtienen valores de %PM menores a comparación de las muestras de OPC. La pérdida de masa se reduce aproximadamente entre un 40% - 60%.

CONCLUSIONES

1. Como conclusión general los polímeros inorgánicos redujeron la permeabilidad y la pérdida de masa e incrementaron el asentamiento y resistencia a la compresión del hormigón. El asentamiento incrementó en entre un 10% a 400% con una SS/SH (relación Silicato de Sodio/Hidróxido de Sodio) en un rango de 1.5 a 2.5 y una SAA/FA (relación de Solución Activadora Alcalina/Ceniza Volante) en un rango de 0.40 a 0.90. La permeabilidad se redujo en un 50% con una SS/SH de 1.5 y una SAA/FA de 0.40. La resistencia a la compresión aumentó entre un 29% a 82% con una SS/SH en un rango de 1.75 a 2.5 y una SAA/FA en un rango de 0.40 a 0.45 y la pérdida de masa se redujo entre un 40% a 60% con una SS/SH de 1.75 y una SAA/FA de 0.45. Finalmente se concluye que los polímeros inorgánicos mejoran las propiedades físico-mecánicas del hormigón sometido a elevadas temperaturas.
2. Con respecto al asentamiento en el hormigón con polímeros inorgánicos, de acuerdo a la figura 61, se pudo definir dos valores óptimos para la relación de solución activadora alcalina (SS/SH) en el diseño de mezcla para el incremento del asentamiento, estos valores corresponden a 1.5 y 2.5 con los cuales se logró obtener mezclas con consistencia plástica trabajable (3''- 4'') y consistencia fluida muy trabajable (>5''); así mismo como complemento del estudio para la relación de solución activadora alcalina/ceniza volante (SAA/FA) se obtuvo un rango de 0.6 a 0.9 como valores óptimos para el incremento del asentamiento en el hormigón. Dependiendo el tipo de asentamiento que se requiera en el diseño de mezcla, en función a los autores estudiados y los datos ya mencionados estos pueden lograr incrementos porcentuales desde un 10% hasta un 400% adicional, esto dependerá de los ratios de solución y ceniza volante a utilizar, cabe recalcar que el uso de superplastificante también incrementa en una mayor magnitud el asentamiento en el hormigón geopolimérico. Se debe mencionar que en la mayoría de los artículos de la literatura estudiada utilizan al Silicato de Sodio (Na_2SiO_3) como solución activadora de mezcla para los geopolímeros.
3. La baja permeabilidad se debe a que en la formación del geopolímero se da a cabo una reacción química entre elementos ricos en aluminosilicatos (cenizas volantes), esta reacción forma una red tridimensional en la que los poros tienden a ser más pequeños y menos conectados en comparación del OPC, por ello una menor conexión entre los poros reduce las zonas de ingreso para cualquier fluido como por ejemplo el agua, lo que significa una menor permeabilidad. De los resultados de los ensayos de Porcentaje de

Absorción de Agua y Profundidad de Penetración del Agua de los autores, se puede concluir que el hormigón con polímeros inorgánicos de tipo mineral como ceniza tienen una baja permeabilidad a comparación del OPC. Por lo tanto, de acuerdo a la figura 62 los valores más bajos de permeabilidad se logran con el uso de una proporción de SS/SH de 1.5 y una relación de SAA/FA de 0.4, que resulta en valores de porcentaje de absorción del agua igual a un 2.8%, lo que representa una reducción del 50% con respecto al máximo valor de porcentaje de absorción de agua igual al 5.5% que es el límite para que se considera un hormigón de baja permeabilidad.

4. El incremento de la resistencia a la compresión a elevadas temperaturas en el hormigón con geopolímeros resulta particularmente de una segunda geopolimerización que surge al incrementar la temperatura interna del hormigón, activando así un porcentaje de partículas inertes de la mezcla de ceniza volante con solución activadora alcalina, de esta forma se logra incrementar la resistencia a la compresión, respecto a los autores investigados en la figura 63, se logró encontrar parámetros ideales para mejorar esta propiedad siendo que el hormigón con geopolímeros incrementa su resistencia a la compresión en un rango de temperaturas de 200°C a 500°C, y las relaciones recomendables para la solución activadora alcalina (SS/SH) se encuentra en un rango de valores de 1 a 2.5, de igual forma los valores la relación de solución activadora alcalina/ceniza volante (SAA/FA) más óptimos se encuentran entre 0.40 y 0.50, con estos valores para el diseño de mezcla se lograron aumentos desde un 20 % hasta un 80 %, estos diseños se lograron con reemplazo total del cemento tradicional por la ceniza volante.

5. De acuerdo a la figura 64, el menor porcentaje de pérdida de masa que se obtiene es de 3.16% para una relación de SS/SH = 1.75 a una temperatura de 800°C, donde los porcentajes están por debajo del 50% del valor de pérdida de masa del OPC, en general los valores de pérdida de masa del hormigón GPC se reducen entre un 40% a 60% con respecto al hormigón convencional. El hormigón con polímeros inorgánicos de tipo mineral como ceniza tiene una menor pérdida de masa cuando se expone a altas temperaturas a comparación del OPC, esto debido a que su composición de materiales como la ceniza volante, tienen una gran resistencia al calor en comparación a los componentes del cemento, cuando se eleva la temperatura el geopolímero forma enlaces químicos que resisten mejor la degradación. Además, el geopolímero a diferencia del cemento portland no contiene calcio en su estructura, este elemento se descompone en condiciones de temperaturas extremas, lo que ayuda al geopolímero a reducir su pérdida

de masa en condiciones de calor. Además, la porosidad baja del geopolímero ayuda a que se reduzca la entrada de calor y así poder mantener sus propiedades mecánicas en un periodo más amplio que el hormigón convencional cuando está expuesto al fuego.

RECOMENDACIONES

1. Como recomendación académica, se incita a que se continúe investigando al hormigón geopolimérico, ya que este tiene un gran potencial para mejorar la sostenibilidad y durabilidad de las infraestructuras. También recomendamos la integración de contenidos relacionados al hormigón geopolimérico en los programas de estudios de ingeniería civil, ya que, si se forma sólidos conocimientos en el proceso de formación profesional, esto ayudará en el futuro a pensar en construcción sostenibles y con propiedades físico mecánicas iguales o mejores al hormigón convencional que se utiliza usualmente.
2. Se recomienda evaluar el uso de superplastificantes para incrementar el asentamiento del hormigón, ya que, de acuerdo a ensayos observados, se puede lograr un incremento significativo en esta propiedad, así mismo mediante este método se puede reducir los ratios en el uso de la solución activadora alcalina y por consiguiente obtener un ahorro económico respecto al costo de la solución activadora alcalina.
3. Se recomienda el uso de hormigones geopolímeros porque al tener baja permeabilidad este es menos propenso a permitir el ingreso del agua, humedad u otros líquidos a su estructura interna. Evitar el ingreso de fluidos en el hormigón puede aumentar en gran medida la vida útil, porque reduciría el riesgo de daño por corrosión del refuerzo de acero u otro proceso de degradación.
4. Se recomienda , de acuerdo a las investigaciones estudiadas, utilizar las cenizas volantes de clase F como un material sustituto en un 100% del cemento tradicional, se menciona que sea en un 100% ya que ciertas investigaciones muestran adiciones parciales de la ceniza volante respecto al cemento tradicional, sin embargo alcanzan resultados inferiores respecto al reemplazo en su totalidad con la ceniza volante, de igual manera para posibles ensayos se recomienda realizar curados al horno ya que estos muestran resultados superiores a un curado ambiente, así mismo las investigaciones estudiadas se basan en el uso de Hidróxido de Sodio como solución activadora alcalina para lograr resultados favorables.
5. Se recomienda el uso del hormigón geopolimérico debido a que tiene un porcentaje de pérdida de masa bajo, esto quiere decir que tras el evento de un incendio las estructuras no van a descomponerse porque resiste de buena forma el calor y reduce el riesgo de colapso de estructuras durante o después de un incendio. Este hormigón genera una seguridad contra incendios, más durabilidad de las estructuras y menos reparaciones post incendio.

REFERENCIAS

- Ahmed, T., Abdellatif, M., Bassioni, G., Heniegal, A. & Elrahman, M. (2023). Influence of high temperature exposure on compressive strength and microstructure of ultra-high performance geopolymer concrete with waste glass and ceramic. *Journal of Materials Research and Technology*, 23, 5681–5697. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.02.177>
- Al-Bayati, M., Abdulrahman, M., Alzebaree, R. & Arbili, M. (2022). The effect of materials and curing system on the behavior of self-compacting geopolymer concrete. *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*, 31(1), 710–718. <https://doi.org/10.1515/jmbm-2022-0206>
- Aliabdo, A., Abdelmoaty, A. & Mohamed, M. (2018). Permeability indices and corrosion resistance of geopolymer and Portland cement concretes. *Magazine of Concrete Research*, 70(12), 595–609. <https://doi.org/10.1680/jmacr.17.00151>
- Anne, M. & Chand, J. (2023). Geo-polymer concrete- a concrete for sustainable environment. *IOP Conference Series*, 1110(1), 012049. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1110/1/012049>
- ASTM International. (2017). “ASTM C172 / C172M-17. Standard Practice for Sample Collection of Freshly Mixed Concrete. https://www.astm.org/c0172_c0172m-17.html
- ASTM International. (2020). “ASTM C39 / C39-20, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens”. <https://www.astm.org/astm-tpt-781.html>
- ASTM International. (2021). “ASTM C642 / C642-21, Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete”. <https://www.astm.org/c0642-21.html>
- ASTM International. (2022). “ASTM C618 / C618-22, Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete”. <https://www.astm.org/c0618-22.html>
- Atabey, İ., Karahan, O., Bilim, C. & Atış, C. (2020). The influence of activator type and quantity on the transport properties of class F fly ash geopolymer. *Construction and Building Materials*, 264(120268), 120268. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120268>

- Balaji, G., Kamal, S., Saravanan, J. & Thirugnanasambandam, S. (2021). A comparative study on compressive strength and durability properties of alccofine incorporated geopolymer concrete over conventional concrete. *Annals of the Romanian Society for Cell Biology*, 25(6), 16839–16851. <https://www.annalsofrscb.ro/index.php/journal/article/view/8978>
- Bellum, R., Muniraj, K. & Madduru, S. (2020). Exploration of mechanical and durability characteristics of fly ash-GGBFS based green geopolymer concrete. *SN Applied Sciences*, 2(5). <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2720-5>
- Chandrakanth, V. & Koniki, S.(2020). Effect of elevated temperature on geo-polymer concrete – A Review. *E3S Web of Conferences* 184, 01090 (2020). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202018401090>
- Çelik, A., Özbayrak, A., Şener, A. & Acar, M. (2022). Effect of activators in different ratios on compressive strength of geopolymer concrete. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 50(2), 69-79. <https://doi.org/10.1139/cjce-2021-0529>
- Davidovits, J. (1988). Geopolymers of the first generation: siliface-process, geopolymer. *Volume: Geopolymer '88, Volume 1 pp.49-67.* https://www.researchgate.net/publication/304822628_Geopolymers_of_the_first_generation_siliface-process_geopolymer
- Davidovits, J. (2005). *Geopolymer, green chemistry and sustainable development solutions. Institute Geopolymer*
- Dissanayake, D., Dissanayake, D. & Pathirana, C. (2022). Strength properties of Fly Ash based Geopolymer Concrete cured at different temperatures. *Electronic journal of structural engineering*, 22(2), 19–26. <https://doi.org/10.56748/ejse.223262>
- Djobo, J., Elimbi, A., Tchakouté, H. & Kumar, S. (2016). Volcanic ash-based geopolymer cements/concretes: the current state of the art and perspectives. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(5), 4433–4446. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-8230-8>
- Duxson, P. & Provis, J. (2008). Designing precursors for geopolymer cements. *Journal of the American Ceramic Society*, 91(12), 3864–3869. <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2008.02787.x>
- Farida, F., Hardjasaputra, H., Sofwan, A. & Surahman, A. (2023). Compressive Strength Study based on Fly Ash Geopolymer Concrete at the age of 28 days under very High Temperature. *Journal of physics*, 2421(1), 012046. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2421/1/012046>

- Hardjasaputra, H., Cornelia, M., Gunawan, Y., Surjaputra, I., Lie, H., Rachmansyah, R. & Ng, G. (2019). Study of mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete. *IOP Conference Series*, 615(1), 012009. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/615/1/012009>
- Hassan, A., Arif, M. & Shariq, M. (2020). Mechanical behaviour and microstructural investigation of geopolymer concrete after exposure to elevated temperatures. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 45(5), 3843–3861. <https://doi.org/10.1007/s13369-019-04269-9>
- Huaquisto, S. & Belizario, G. (2018). Utilización de la ceniza volante en la dosificación del concreto como sustituto del cemento. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 20(2), 225-234. <https://dx.doi.org/10.18271/ria.2018.366>
- Ibrahim, W., Abdullah, M., Ahmad, R., Naveed, A., Ghazali, C. & Ibrahim, M. (2019). Effects of thermal resistance to fly Ash-Based lightweight geopolymer. *IOP Conference Series*. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/551/1/012082>
- INDECOPI (2009). *Norma Técnica Peruana 339.035. HORMIGÓN (CONCRETO). Método de ensayo para la medición del asentamiento del concreto de cemento portland*. Lima, 20 de febrero. <https://pdfcoffee.com/ntp-3390352009pdf-pdf-free.html>
- INDECOPI (2015). *Norma Técnica Peruana 339.034. CONCRETO. Método de ensayo normalizado para la determinación de la resistencia a la compresión del concreto en muestras cilíndricas*. Lima, 27 de agosto. <https://pdfcoffee.com/ntp-339034-metodo-de-ensayo-normalizado-para-la-determinacion-de-la-resistencia-a-la-compresion-del-concreto-en-muestras-cilindricas-2-pdf-free.html>
- INDECOPI (2017). *Norma Técnica Peruana 339.036. CONCRETO. Práctica para muestreo de mezclas en concreto fresco*. Lima, 27 de agosto. <https://pdfcoffee.com/ntp-3390362017-concreto-practica-normalizada-para-muestreo-de-mezclas-de-concreto-fresco-4-pdf-free.html>
- International Organization for Standardization (2020). *Fire resistance tests — elements of building construction — Part 1: General requirements (ISO 834-1)*. <https://www.iso.org/standard/2576.html>
- Jiang, X., Zhang, Y., Xiao, R., Polaczyk, P., Zhang, M., Hu, W., Bai, Y. & Huang, B. (2020). A comparative study on geopolymers synthesized by different classes of fly ash after exposure to elevated temperatures. *Journal of Cleaner Production*, 270(122500), 122500. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122500>

- Jindal, B., Singhal, D., Sharma, S. & Parveen, P. (2018). Enhancing mechanical and durability properties of geopolymer concrete with mineral admixture. *Computers and Concrete*, 21(3), 345–353. <https://doi.org/10.12989/CAC.2018.21.3.345>
- Junaid, M., Kayali, O., & Khennane, A. (2016). Response of alkali activated low calcium fly-ash based geopolymer concrete under compressive load at elevated temperatures. *Materials and Structures*, 50(1). <https://doi.org/10.1617/s11527-016-0877-6>
- Kanagaraj, B., Anand, N., Andrushia, A. & Lubloy, E. (2022). Investigation on engineering properties and micro-structure characteristics of low strength and high strength geopolymer composites subjected to standard temperature exposure. *Case Studies in Construction Materials*, 17(e01608), e01608. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01608>
- Kannagara, T., Guerrieri, M., Fragomeni, S. & Joseph, P. (2021). A Study of the Residual Strength of Reactive Powder-Based Geopolymer Concrete under Elevated Temperatures. *Applied Sciences*, 11(24), 11834. <https://doi.org/10.3390/app112411834>
- Kavipriya, S., Ramesh, G., Aravindhraj, M., Gowtham, S., Lingeshwaran, N., & Soundharya, T. (2023). Absorption capacity and porosity percentage of geopolymer concrete with varying percentage of source material and alkalinity ratio. *Materials Today: Proceedings*, 72, 3144–3148. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.10.071>
- Ketana, N., Reddy, V., Rao, M. & Shrihari, S. (2021). Effect of various parameters on the workability and strength properties of geopolymer concrete. *E3S Web of Conferences*, 309, 01102. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202130901102>
- Luhar, S., Luhar, I., Nicolaidis, D. & Gupta, R. (2021). Durability performance evaluation of Rubberized Geopolymer Concrete. *Sustainability*, 13(11), 5969. <https://doi.org/10.3390/su13115969>
- Mahmoud, A., Khoshnaw, G. & Mahmood, F. (2017). Engineering and microstructures characteristics of low calcium fly ash based geopolymer concrete. *IEC2017 Proceedings Book*. <https://doi.org/10.23918/iec2017.09>
- Moradikhou, S. & Moradikhou, A. (2021). Geopolymer concrete based on Class Fly Ash cured at ambient condition. *Zenodo (CERN European Organization for Nuclear Research)*. <https://doi.org/10.22034/jcema.2022.305276.1065>

- Mortar, N., Kamarudin, H., Rafiza, R., Meor, T. & Rosnita, M. (2020). Compressive strength of fly Ash geopolymer concrete by varying sodium hydroxide molarity and aggregate to binder ratio. *IOP Conference Series*, 864(1), 012037. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/864/1/012037>
- Naghizadeh, A., Ekolu, S., Tchadjie, L. & Solomon, F. (2023). Long-term strength development and durability index quality of ambient-cured fly ash geopolymer concretes. *Construction and Building Materials*, 374(130899), 130899. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130899>
- Nurrudin, E. (2018). Methods of curing geopolymer concrete: A review. *International Journal of Advanced and Applied Sciences*, 5(1), 31–36. <https://doi.org/10.21833/ijaas.2018.01.005>
- Ozbayrak, A., Kucukgoncu, H., Aslanbay, H., Aslanbay, Y. & Atas, O. (2023). Comprehensive experimental analysis of the effects of elevated temperatures in geopolymer concretes with variable alkali activator ratios. *Journal of Building Engineering*, 68, 106108. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106108>
- Pane, I., Imran, I. & Budiono, B. (2018). Compressive strength of fly ash-based geopolymer concrete with a variable of sodium hydroxide (NaOH) solution molarity. *MATEC web of conferences*, 147, 01004. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201814701004>
- Pasquel, E. (1998). *Temas de tecnología del concreto en el Perú. Colegio de ingenieros del Perú, segunda edición 1998.* https://www.academia.edu/36925573/ENRIQUE_PASQUEL_CARBAJAL_TO_PICOS_DE_TECNOLOGIA
- Payá, J., Monzó, J., Borrachero, M. V., Soriano, L., Tashima, M. M. (2022), Activadores alternativos para cementos de activación alcalina. *Revista ALCONPAT*, 12 (1), pp. 16 – 31. <https://doi.org/10.21041/ra.v12i1.568>
- Paunescu, L., Paunescu, B., Volceanov, E. & Surugiu, G. (2022). Geopolymer concrete-a suitable nonconventional alternative solution for the global reduction of CO2 emissions in manufacturing the concrete. *Romanian Association on Nonconventional Technologies*, 26(4): 25-30. <https://www.proquest.com/openview/0307e9eb629b731c2c6431690967877a/1?pq-origsite=gscholar&cbl=366251>

- Rahmadina, A., & Ekaputri, J. (2017). Mechanical properties of geopolymer concrete exposed to combustion. *MATEC Web of Conferences*, 138, 01022. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201713801022>
- Razak, S., Shafiq, N., Guillaumat, L., Farhan, S. & Kumar, V. (2022). Fire-Exposed Fly-Ash-Based Geopolymer concrete: Effects of burning temperature on mechanical and microstructural properties. *Materials*, 15(5), 1884. <https://doi.org/10.3390/ma15051884>
- Razak, S., Shafiq, N., Guillaumat, L., Wahab, M., Farhan, S., Husna, N. & Ismail, F. (2021). Fire performance of fly ash-based geopolymer concrete: Effect of burning temperature. *IOP conference series. Earth and environmental science*, 945(1), 012062. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/945/1/012062>
- Reddy, S., Krishna, K., Rao, M. & Shrihari, S. (2021). Effect of molarity of sodium hydroxide and molar ratio of alkaline activator solution on the strength development of geopolymer concrete. *E3S Web of conferences* 309, 01058(2021). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202130>
- Ren, J., Chen, H., Sun, T., Hao, S. & Wang, M. (2017). Flexural Behaviour of Combined FA/GGBFS Geopolymer Concrete Beams after Exposure to Elevated Temperatures. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2017, 1–9. <https://doi.org/10.1155/2017/6854043>
- Romadhon, E., Antonius, A. & Sumirin, N. (2023). The influence of low alkaline activator on the compressive strength and workability of geopolymer concrete. *IOP Conference Series*, 1195(1), 012027. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1195/1/012027>
- Romea, C. (2014). El hormigón: breve reseña histórica de un material milenario. *Omnia Publisher*, 2014. DOI: 10.3926/oms.199
- Salirrosas, J. (2020). Geopolímeros En La Industria De La Construcción: Aplicaciones Con Ceniza Volante Y Puzolana Natural. *Pontificia Universidad Católica Del Perú*. Enlace: <http://hdl.handle.net/20.500.12404/17208>
- Saxena, R., Gupta, T., Sharma, R. & Panwar, N. (2021). Influence of granite waste on mechanical and durability properties of fly ash-based geopolymer concrete. *Environment, Development and Sustainability*, 23(12), 17810–17834. <https://doi.org/10.1007/s10668-021-01414-z>

- Shinde, P., Patankar, S. & Sayyad, A. (2018). Investigation on effects of fineness of flyash and alkaline ratio on mechanical properties of geopolymer concrete. *Res. Eng. Struct. Mat.*, 2018; 4(1): 61-71. <http://dx.doi.org/10.17515/resm2017.01ma0119>
- Vélez, L. (2010). Permeabilidad y Porosidad en Concreto. *Rev. Tecno Lógicas No. 25*, ISSN 0123-7799, pp. 169-187. Enlace: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=344234320010>
- Wardhono, A., Gunasekara, C., Law, D. & Setunge, S. (2017). Comparison of long term performance between alkali activated slag and fly ash geopolymer concretes. *Construction and Building Materials*, 143, 272–279. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.153>
- Younis, K., Salihi, K., Mohammedameen, A., Sherwani, A. & Alzebaree, R. (2021). Factors affecting the Characteristics of Self-Compacting Geopolymer Concrete. *IOP Conference Series*, 856(1), 012028. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/856/1/012028>
- Zhang, H., Li, L., Long, T., Sarker, P., Shi, X., Cai, G. & Wang, Q. (2019). The effect of ordinary Portland cement substitution on the thermal stability of geopolymer concrete. *Materials*, 12(16), 2501. <https://doi.org/10.3390/ma12162501>
- Zhang, H., Li, L., Yuan, C., Wang, Q., Sarker, P. & Shi, X. (2020). Deterioration of ambient-cured and heat-cured fly ash geopolymer concrete by high temperature exposure and prediction of its residual compressive strength. *Construction and Building Materials*, 262(120924), 120924. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120924>
- Zulfiati, R., Saloma, & Idris, Y. (2019). Mechanical Properties of Fly Ash-Based Geopolymer with Natural Fiber. *Journal of Physics*, 1198(8), 082021. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1198/8/082021>

ANEXOS

Anexo A: Matriz de consistencia

Problema General	Objetivo General	Hipótesis General	Variable Independiente	Indicadores	Instrumentos	Metodología
¿En qué medida los polímeros inorgánicos de tipo mineral como ceniza influyen en las propiedades físico-mecánicas del hormigón ?	Determinar los polímeros inorgánicos de tipo mineral como ceniza para mejorar las propiedades físico-mecánicas del hormigón .	Al determinar los polímeros inorgánicos de tipo mineral como cenizas mejoran las propiedades físico – mecánicas del hormigón .	Polímeros inorgánicos de tipo mineral como ceniza	Relación solución activadora alcalina/ceniza volante (SAA/FA)	Revisión de fuentes bibliográficas, artículos científicos internacionales.	
Problemas Específicos	Objetivos Específicos	Hipótesis Específicas	Variable Dependiente			
a. ¿En qué medida la relación solución activadora alcalina/ceniza volante influyen en el asentamiento del hormigón ?	a. Determinar la relación solución activadora alcalina/ceniza volante para mejorar el asentamiento del hormigón .	a. Al determinar la relación solución activadora alcalina/ceniza volante incrementa el asentamiento del hormigón .		Asentamiento		El método es deductivo, de orientación aplicada, de enfoque cualitativo y según la recolección de datos es retrolectiva.
b. ¿En qué medida la relación solución activadora alcalina/ceniza volante influyen en la permeabilidad del hormigón ?	b. Determinar la relación solución activadora alcalina/ceniza volante para reducir la permeabilidad del hormigón .	b. Al determinar la relación solución activadora alcalina/ceniza volante se reduce la permeabilidad del hormigón .		Permeabilidad	NTP 339.035 ASTM C642 NTP 339.036 ASTM C 39 ASTM C 172 NTP 339.034 ISO 834 ASTM C618	El tipo de investigación es descriptiva, explicativa y correlacional. El nivel de investigación es descriptivo.
c. ¿En qué medida la relación solución activadora alcalina/ceniza volante influyen en la resistencia a la compresión del hormigón después de ensayos a altas temperaturas?	c. Determinar la relación solución activadora alcalina/ceniza volante para mejorar la resistencia a la compresión del hormigón después de ensayos a altas temperaturas.	c. Al determinar la relación solución activadora alcalina/ceniza volante mejora la resistencia a la compresión del hormigón después de ensayos a altas temperaturas.	Propiedades físico-mecánicas del hormigón	Resistencia a la compresión		El diseño de la investigación es no experimental, retrospectivo, longitudinal, causa-efecto (estudio de cohortes) y retrospectivo.
d. ¿En qué medida la relación solución activadora alcalina/ceniza volante influyen en la pérdida de masa del hormigón después de ensayos a altas temperaturas?	d. Determinar la relación solución activadora alcalina/ceniza volante para reducir la pérdida de masa del hormigón después de ensayos a altas temperaturas.	d. Al determinar la relación solución activadora alcalina/ceniza volante reduce la pérdida de masa del hormigón después de ensayos a altas temperaturas.		Pérdida de masa		

Nota. Elaboración propia

Anexo B: Matriz de artículos internacionales

Nº	Título	Title	Autor	Referencia
1	Influencia de la exposición a altas temperaturas en la resistencia a la compresión y la microestructura del hormigón geopolímero de ultra alto rendimiento con residuos de vidrio y cerámica	Influence of high temperature exposure on compressive strength and microstructure of ultra-high performance geopolymer concrete with waste glass and ceramic	Ahmed et al.	Ahmed, T., Abdellatief, M., Bassioni, G., Heniegal, A. & Elrahman, M. (2023). Influence of high temperature exposure on compressive strength and microstructure of ultra-high performance geopolymer concrete with waste glass and ceramic. <i>Journal of Materials Research and Technology</i> , 23, 5681–5697. https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.02.177
2	El efecto de los materiales y el sistema de curado en el comportamiento del hormigón geopolímero autocompactante	The effect of materials and curing system on the behavior of self-compacting geopolymer concrete	Al-Bayati et al.	Al-Bayati, M., Abdulrahman, M., Alzebaree, R. & Arbili, M. (2022). The effect of materials and curing system on the behavior of self-compacting geopolymer concrete. <i>Journal of the Mechanical Behavior of Materials</i> , 31(1), 710–718. https://doi.org/10.1515/jmbm-2022-0206
3	Índices de permeabilidad y resistencia a la corrosión de hormigones de geopolímeros y cemento Portland	Permeability indices and corrosion resistance of geopolymer and Portland cement concretes	Aliabdo et al.	Aliabdo, A., Abdelmoaty, A. & Mohamed, M. (2018). Permeability indices and corrosion resistance of geopolymer and Portland cement concretes. <i>Magazine of Concrete Research</i> , 70(12), 595–609. https://doi.org/10.1680/jmacr.17.00151
4	Hormigón geopolimérico: un hormigón para un medio ambiente sostenible	Geo-polymer concrete- a concrete for sustainable environment	Anne & Chand	Anne, M. & Chand, J. (2023). Geo-polymer concrete- a concrete for sustainable environment. <i>IOP Conference Series</i> , 1110(1), 012049. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1110/1/012049
5	La influencia del tipo y la cantidad del activador en las propiedades de transporte del geopolímero de cenizas volantes de clase F	The influence of activator type and quantity on the transport properties of class F fly ash geopolymer	Atabey et al.	Atabey, İ., Karahan, O., Bilim, C. & Atiş, C. (2020). The influence of activator type and quantity on the transport properties of class F fly ash geopolymer. <i>Construction and Building Materials</i> , 264(120268), 120268. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120268
6	Un estudio comparativo sobre las propiedades de resistencia a la compresión y durabilidad del hormigón geopolímero incorporado a alccofina sobre el hormigón convencional	A comparative study on compressive strength and durability properties of alccofine incorporated geopolymer concrete over conventional concrete	Balaji et al.	Balaji, G., Kamal, S., Saravanan, J. & Thirugnanasambandam, S. (2021). A comparative study on compressive strength and durability properties of alccofine incorporated geopolymer concrete over conventional concrete. <i>Annals of the Romanian Society for Cell Biology</i> , 25(6), 16839–16851. https://www.annalsofrscb.ro/index.php/journal/article/view/8978

7	Exploración de las características mecánicas y de durabilidad del hormigón geopolímero verde basado en cenizas volantes-GGBFS	Exploration of mechanical and durability characteristics of fly ash-GGBFS based green geopolymer concrete	Bellum et al.	Bellum, R., Muniraj, K. & Madduru, S. (2020). Exploration of mechanical and durability characteristics of fly ash-GGBFS based green geopolymer concrete. <i>SN Applied Sciences</i> , 2(5). https://doi.org/10.1007/s42452-020-2720-5
8	Efecto de los activadores en diferentes proporciones sobre la resistencia a la compresión del hormigón geopolímero	Effect of activators in different ratios on compressive strength of geopolymer concrete	Çelik et al.	Çelik, A., Özbayrak, A., Şener, A. & Acar, M. (2022). Effect of activators in different ratios on compressive strength of geopolymer concrete. <i>Canadian Journal of Civil Engineering</i> , 50(2), 69-79. https://doi.org/10.1139/cjce-2021-0529
9	Geopolímero: Química y Aplicaciones	Geopolymer: Chemistry and Applications	Davidovits, J.	Davidovits, J. (1978). <i>Geopolymer: Chemistry and Applications</i>
10	Geopolímeros, química verde y soluciones de desarrollo sostenible. Instituto Geopolímero	Geopolymer, green chemistry and sustainable development solutions. Institute Geopolymer	Davidovits, J.	Davidovits, J. (2005). <i>Geopolymer, green chemistry and sustainable development solutions. Institute Geopolymer</i>
11	Propiedades de resistencia del hormigón geopolímero a base de cenizas volantes curado a diferentes temperaturas	Strength properties of Fly Ash based Geopolymer Concrete cured at different temperatures	Dissanayake et al.	Dissanayake, D., Dissanayake, D. & Pathirana, C. (2022). Strength properties of Fly Ash based Geopolymer Concrete cured at different temperatures. <i>Electronic journal of structural engineering</i> , 22(2), 19–26. https://doi.org/10.56748/ejse.223262
12	Cementos/hormigones geopolímeros a base de cenizas volcánicas: el estado actual del arte y las perspectivas	Volcanic ash-based geopolymer cements/concretes: the current state of the art and perspectives	Djobo et al.	Djobo, J., Elimbi, A., Tchakouté, H. & Kumar, S. (2016). Volcanic ash-based geopolymer cements/concretes: the current state of the art and perspectives. <i>Environmental Science and Pollution Research</i> , 24(5), 4433–4446. https://doi.org/10.1007/s11356-016-8230-8
13	Diseño de precursores para cementos geopoliméricos	Designing precursors for geopolymer cements	Duxson & Provis	Duxson, P. & Provis, J. (2008). Designing precursors for geopolymer cements. <i>Journal of the American Ceramic Society</i> , 91(12), 3864–3869. https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2008.02787.x
14	Estudio de resistencia a la compresión basado en hormigón geopolímero de cenizas volantes a la edad de 28 días a muy alta temperatura	Compressive Strength Study based on Fly Ash Geopolymer Concrete at the age of 28 days under very High Temperature	Farida et al.	Farida, F., Hardjasaputra, H., Sofwan, A. & Surahman, A. (2023). Compressive Strength Study based on Fly Ash Geopolymer Concrete at the age of 28 days under very High Temperature. <i>Journal of physics</i> , 2421(1), 012046. https://doi.org/10.1088/1742-6596/2421/1/012046

15	Estudio de las propiedades mecánicas del hormigón geopolímero a base de cenizas volantes	Study of mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete	Hardjasaputra et al.	Hardjasaputra, H., Cornelia, M., Gunawan, Y., Surjaputra, I., Lie, H., Rachmansyah, R. & Ng, G. (2019). Study of mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete. <i>IOP Conference Series</i> , 615(1), 012009. https://doi.org/10.1088/1757-899x/615/1/012009
16	Comportamiento mecánico e investigación microestructural del hormigón geopolímero tras la exposición a temperaturas elevadas	Mechanical behaviour and microstructural investigation of geopolymer concrete after exposure to elevated temperatures	Hassan et al.	Hassan, A., Arif, M. & Shariq, M. (2020). Mechanical behaviour and microstructural investigation of geopolymer concrete after exposure to elevated temperatures. <i>Arabian Journal for Science and Engineering</i> , 45(5), 3843–3861. https://doi.org/10.1007/s13369-019-04269-9
17	Efectos de la resistencia térmica al geopolímero ligero a base de cenizas de vuelo	Effects of thermal resistance to fly Ash-Based lightweight geopolymer	Ibrahim et al.	Ibrahim, W., Abdullah, M., Ahmad, R., Naveed, A., Ghazali, C. & Ibrahim, M. (2019). Effects of thermal resistance to fly Ash-Based lightweight geopolymer. <i>IOP Conference Series</i> . https://doi.org/10.1088/1757-899x/551/1/012082
18	Un estudio comparativo sobre geopolímeros sintetizados por diferentes clases de cenizas volantes después de la exposición a temperaturas elevadas	A comparative study on geopolymers synthesized by different classes of fly ash after exposure to elevated temperatures	Jiang et al.	Jiang, X., Zhang, Y., Xiao, R., Polaczyk, P., Zhang, M., Hu, W., Bai, Y. & Huang, B. (2020). A comparative study on geopolymers synthesized by different classes of fly ash after exposure to elevated temperatures. <i>Journal of Cleaner Production</i> , 270(122500), 122500. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122500
19	Mejora de las propiedades mecánicas y de durabilidad del hormigón geopolímero con mezcla mineral	Enhancing mechanical and durability properties of geopolymer concrete with mineral admixture	Jindal et al.	Jindal, B., Singhal, D., Sharma, S. & Parveen, P. (2018). Enhancing mechanical and durability properties of geopolymer concrete with mineral admixture. <i>Computers and Concrete</i> , 21(3), 345–353. https://doi.org/10.12989/CAC.2018.21.3.345
20	Respuesta del hormigón geopolímero a base de cenizas volantes con bajo contenido de calcio activado por álcali bajo carga de compresión a temperaturas elevadas	Response of alkali activated low calcium fly-ash based geopolymer concrete under compressive load at elevated temperatures	Junaid et al.	Junaid, M., Kayali, O., & Khennane, A. (2016). Response of alkali activated low calcium fly-ash based geopolymer concrete under compressive load at elevated temperatures. <i>Materials and Structures</i> , 50(1). https://doi.org/10.1617/s11527-016-0877-6

21	Investigación sobre las propiedades de ingeniería y las características de la microestructura de compuestos de geopolímeros de baja resistencia y alta resistencia sometidos a exposición a temperaturas estándar	Investigation on engineering properties and micro-structure characteristics of low strength and high strength geopolymer composites subjected to standard temperature exposure	Kanagaraj et al.	Kanagaraj, B., Anand, N., Andrushia, A. & Lubloy, E. (2022). Investigation on engineering properties and micro-structure characteristics of low strength and high strength geopolymer composites subjected to standard temperature exposure. <i>Case Studies in Construction Materials</i> , 17(e01608), e01608. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01608
22	Un estudio de la resistencia residual del hormigón geopolímero reactivo a base de polvo bajo temperaturas elevadas	A Study of the Residual Strength of Reactive Powder-Based Geopolymer Concrete under Elevated Temperatures	Kannangara et al.	Kannangara, T., Guerrieri, M., Fragomeni, S. & Joseph, P. (2021). A Study of the Residual Strength of Reactive Powder-Based Geopolymer Concrete under Elevated Temperatures. <i>Applied Sciences</i> , 11(24), 11834. https://doi.org/10.3390/app112411834
23	Capacidad de absorción y porcentaje de porosidad del hormigón geopolímero con porcentaje variable de material de origen y relación de alcalinidad	Absorption capacity and porosity percentage of geopolymer concrete with varying percentage of source material and alkalinity ratio	Kavipriya et al.	Kavipriya, S., Ramesh, G., Aravindhraj, M., Gowtham, S., Lingeswaran, N., & Soundharya, T. (2023). Absorption capacity and porosity percentage of geopolymer concrete with varying percentage of source material and alkalinity ratio. <i>Materials Today: Proceedings</i> , 72, 3144–3148. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.10.071
24	Efecto de varios parámetros en las propiedades de trabajabilidad y resistencia del hormigón geopolímero	Effect of various parameters on the workability and strength properties of geopolymer concrete	Ketana et al.	Ketana, N., Reddy, V., Rao, M. & Shrihari, S. (2021). Effect of various parameters on the workability and strength properties of geopolymer concrete. <i>E3S Web of Conferences</i> , 309, 01102. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202130901102
25	Evaluación del rendimiento de durabilidad del hormigón geopolímero de caucho	Durability performance evaluation of Rubberized Geopolymer Concrete	Luhar et al.	Luhar, S., Luhar, I., Nicolaidis, D. & Gupta, R. (2021). Durability performance evaluation of Rubberized Geopolymer Concrete. <i>Sustainability</i> , 13(11), 5969. https://doi.org/10.3390/su13115969
26	Características de ingeniería y microestructuras del hormigón geopolímero a base de cenizas volantes con bajo contenido de calcio	Engineering and microstructures characteristics of low calcium fly ash based geopolymer concrete	Mahmoud et al.	Mahmoud, A., Khoshnaw, G. & Mahmood, F. (2017). Engineering and microstructures characteristics of low calcium fly ash based geopolymer concrete. <i>IEC2017 Proceedings Book</i> . https://doi.org/10.23918/iec2017.09

27	Hormigón geopolímero basado en cenizas volantes de clase curadas a temperatura ambiente	Geopolymer concrete based on Class Fly Ash cured at ambient condition	Moradikhou & Moradikhou	Moradikhou, S. & Moradikhou, A. (2021). Geopolymer concrete based on Class Fly Ash cured at ambient condition. <i>Zenodo (CERN European Organization for Nuclear Research)</i> . https://doi.org/10.22034/jcema.2022.305276.1065
28	Resistencia a la compresión del hormigón de geopolímero de cenizas volantes variando la molaridad del hidróxido de sodio y la proporción de agregado a aglutinante	Compressive strength of fly Ash geopolymer concrete by varying sodium hydroxide molarity and aggregate to binder ratio	Mortar et al.	Mortar, N., Kamarudin, H., Rafiza, R., Meor, T. & Rosnita, M. (2020). Compressive strength of fly Ash geopolymer concrete by varying sodium hydroxide molarity and aggregate to binder ratio. <i>IOP Conference Series</i> , 864(1), 012037. https://doi.org/10.1088/1757-899x/864/1/012037
29	Desarrollo de resistencia a largo plazo e índice de calidad de durabilidad de hormigones de geopolímeros de cenizas volantes curados a temperatura ambiente	Long-term strength development and durability index quality of ambient-cured fly ash geopolymer concretes	Naghizadeh et al.	Naghizadeh, A., Ekolu, S., Tchadjie, L. & Solomon, F. (2023). Long-term strength development and durability index quality of ambient-cured fly ash geopolymer concretes. <i>Construction and Building Materials</i> , 374(130899), 130899. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.130899
30	Métodos de curado de hormigón geopolímero: una revisión	Methods of curing geopolymer concrete: A review	Nurruddin	Nurruddin, E. (2018). Methods of curing geopolymer concrete: A review. <i>International Journal of Advanced and Applied Sciences</i> , 5(1), 31–36. https://doi.org/10.21833/ijaas.2018.01.005
31	Análisis experimental exhaustivo de los efectos de temperaturas elevadas en hormigones de geopolímeros con proporciones variables de activadores alcalinos	Comprehensive experimental analysis of the effects of elevated temperatures in geopolymer concretes with variable alkali activator ratios	Ozbayrak et al.	Ozbayrak, A., Kucukgoncu, H., Aslanbay, H., Aslanbay, Y. & Atas, O. (2023). Comprehensive experimental analysis of the effects of elevated temperatures in geopolymer concretes with variable alkali activator ratios. <i>Journal of Building Engineering</i> , 68, 106108. https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106108
32	Resistencia a la compresión del hormigón geopolímero a base de cenizas volantes con una molaridad variable de solución de hidróxido de sodio (NaOH)	Compressive strength of fly ash-based geopolymer concrete with a variable of sodium hydroxide (NaOH) solution molarity	Pane et al.	Pane, I., Imran, I. & Budiono, B. (2018). Compressive strength of fly ash-based geopolymer concrete with a variable of sodium hydroxide (NaOH) solution molarity. <i>MATEC web of conferences</i> , 147, 01004. https://doi.org/10.1051/mateconf/201814701004

33	Geopolímero de hormigón: una solución alternativa no convencional adecuada para la reducción global de las emisiones de CO2 en la fabricación del hormigón	Geopolymer concrete-a suitable nonconventional alternative solution for the global reduction of CO2 emissions in manufacturing the concrete	Paunescu et al.	Paunescu, L., Paunescu, B., Volceanov, E. & Surugiu, G. (2022). Geopolymer concrete-a suitable nonconventional alternative solution for the global reduction of CO2 emissions in manufacturing the concrete. <i>Romanian Association on Nonconventional Technologies</i> , 26(4): 25-30. https://www.proquest.com/openview/0307e9eb629b731c2c6431690967877a/1?pq-origsite=gscholar&cbl=366251
34	Propiedades mecánicas del hormigón geopolímero expuesto a la combustión	Mechanical properties of geopolymer concrete exposed to combustion	Rahmadina & Ekaputri	Rahmadina, A., & Ekaputri, J. (2017). Mechanical properties of geopolymer concrete exposed to combustion. <i>MATEC Web of Conferences</i> , 138, 01022. https://doi.org/10.1051/mateconf/201713801022
35	Hormigón geopolímero a base de cenizas volantes expuestas al fuego: efectos de la temperatura de combustión en las propiedades mecánicas y microestructurales	Fire-Exposed Fly-Ash-Based Geopolymer concrete: Effects of burning temperature on mechanical and microstructural properties	Razak et al.	Razak, S., Shafiq, N., Guillaumat, L., Farhan, S. & Kumar, V. (2022). Fire-Exposed Fly-Ash-Based Geopolymer concrete: Effects of burning temperature on mechanical and microstructural properties. <i>Materials</i> , 15(5), 1884. https://doi.org/10.3390/ma15051884
36	Comportamiento al fuego del hormigón geopolímero a base de cenizas volantes: Efecto de la temperatura de combustión	Fire performance of fly ash-based geopolymer concrete: Effect of burning temperature	Razak et al.	Razak, S., Shafiq, N., Guillaumat, L., Wahab, M., Farhan, S., Husna, N. & Ismail, F. (2021). Fire performance of fly ash-based geopolymer concrete: Effect of burning temperature. <i>IOP conference series. Earth and environmental science</i> , 945(1), 012062. https://doi.org/10.1088/1755-1315/945/1/012062
37	Efecto de la molaridad del hidróxido de sodio y la relación molar de la solución activadora alcalina en el desarrollo de la resistencia del hormigón geopolímero	Effect of molarity of sodium hydroxide and molar ratio of alkaline activator solution on the strength development of geopolymer concrete	Reddy et al.	Reddy, S., Krishna, K., Rao, M. & Shrihari, S. (2021). Effect of molarity of sodium hydroxide and molar ratio of alkaline activator solution on the strength development of geopolymer concrete. <i>E3S Web of conferences 309</i> , 01058(2021). https://doi.org/10.1051/e3sconf/202130
38	Comportamiento a flexión de vigas combinadas de hormigón geopolímero FA/GGBFS después de la exposición a temperaturas elevadas	Flexural Behaviour of Combined FA/GGBFS Geopolymer Concrete Beams after Exposure to Elevated Temperatures	Ren et al.	Ren, J., Chen, H., Sun, T., Hao, S. & Wang, M. (2017). Flexural Behaviour of Combined FA/GGBFS Geopolymer Concrete Beams after Exposure to Elevated Temperatures. <i>Advances in Materials Science and Engineering</i> , 2017, 1–9. https://doi.org/10.1155/2017/6854043

39	La influencia del activador de bajo alcalino en la resistencia a la compresión y la trabajabilidad del hormigón geopolímero	The influence of low alkaline activator on the compressive strength and workability of geopolymer concrete	Romadhon et al.	Romadhon, E., Antonius, A. & Sumirin, N. (2023). The influence of low alkaline activator on the compressive strength and workability of geopolymer concrete. <i>IOP Conference Series</i> , 1195(1), 012027. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1195/1/012027
40	Geopolímeros En La Industria De La Construcción: Aplicaciones Con Ceniza Volante Y Puzolana Natural	Geopolymers in the Construction Industry: Applications with Fly Ash and Natural Pozzolan	Salirrosas, J.	Salirrosas, J. (2020). Geopolímeros En La Industria De La Construcción: Aplicaciones Con Ceniza Volante Y Puzolana Natural. <i>Pontificia Universidad Católica Del Perú</i> . Enlace: http://hdl.handle.net/20.500.12404/17208
41	Influencia de los residuos de granito en las propiedades mecánicas y de durabilidad del hormigón geopolímero a base de cenizas volantes	Influence of granite waste on mechanical and durability properties of fly ash-based geopolymer concrete	Saxena et al.	Saxena, R., Gupta, T., Sharma, R. & Panwar, N. (2021). Influence of granite waste on mechanical and durability properties of fly ash-based geopolymer concrete. <i>Environment, Development and Sustainability</i> , 23(12), 17810–17834. https://doi.org/10.1007/s10668-021-01414-z
42	Investigación sobre los efectos de la finura de las cenizas volantes y la relación alcalina en las propiedades mecánicas del hormigón geopolímero	Investigation on effects of fineness of flyash and alkaline ratio on mechanical properties of geopolymer concrete	Shinde et al.	Shinde, P., Patankar, S. & Sayyad, A. (2018). Investigation on effects of fineness of flyash and alkaline ratio on mechanical properties of geopolymer concrete. <i>Res. Eng. Struct. Mat.</i> , 2018; 4(1): 61-71. http://dx.doi.org/10.17515/resm2017.01ma0119
43	Comparación del rendimiento a largo plazo entre hormigones de geopolímero de escorias activadas por álcalis y cenizas volantes	Comparison of long term performance between alkali activated slag and fly ash geopolymer concretes	Wardhono et al.	Wardhono, A., Gunasekara, C., Law, D. & Setunge, S. (2017). Comparison of long term performance between alkali activated slag and fly ash geopolymer concretes. <i>Construction and Building Materials</i> , 143, 272–279. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.153
44	Factores que afectan las características del hormigón geopolímero autocompactante	Factors affecting the Characteristics of Self-Compacting Geopolymer Concrete	Younis et al.	Younis, K., Salihi, K., Mohammedameen, A., Sherwani, A. & Alzebaree, R. (2021). Factors affecting the Characteristics of Self-Compacting Geopolymer Concrete. <i>IOP Conference Series</i> , 856(1), 012028. https://doi.org/10.1088/1755-1315/856/1/012028

45	Deterioro del hormigón geopolímero de cenizas volantes curado a temperatura ambiente y termocurado por exposición a altas temperaturas y predicción de su resistencia a la compresión residual	Deterioration of ambient-cured and heat-cured fly ash geopolymer concrete by high temperature exposure and prediction of its residual compressive strength	Zhang et al.	Zhang, H., Li, L., Long, T., Sarker, P., Shi, X., Cai, G. & Wang, Q. (2019). The effect of ordinary Portland cement substitution on the thermal stability of geopolymer concrete. <i>Materials</i> , 12(16), 2501. https://doi.org/10.3390/ma12162501
46	El efecto de la sustitución ordinaria de cemento Portland en la estabilidad térmica del hormigón geopolímero	The effect of ordinary Portland cement substitution on the thermal stability of geopolymer concrete	Zhang et al.	Zhang, H., Li, L., Yuan, C., Wang, Q., Sarker, P. & Shi, X. (2020). Deterioration of ambient-cured and heat-cured fly ash geopolymer concrete by high temperature exposure and prediction of its residual compressive strength. <i>Construction and Building Materials</i> , 262(120924), 120924. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120924
47	Propiedades mecánicas del geopolímero a base de cenizas volantes con fibra natural	Mechanical Properties of Fly Ash-Based Geopolymer with Natural Fiber	Zulfiati et al.	Zulfiati, R., Saloma, & Idris, Y. (2019). Mechanical Properties of Fly Ash-Based Geopolymer with Natural Fiber. <i>Journal of Physics</i> , 1198(8), 082021. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1198/8/082021