

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA
FACULTAD DE INGENIERÍA CULIACÁN
PROGRAMA DE MAESTRÍA EN
INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN



“DISEÑO, FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE ELEMENTOS
PREFABRICADOS CON GEOPOLÍMERO BASE CENIZA VOLANTE
PARA SU POTENCIAL USO EN ENVOLVENTES DE EDIFICACIONES”

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA DE LA CONSTRUCCIÓN

PRESENTA:

Ing. Jesús Omar Beltrán Castro

DIRECTORA DE TESIS:

Dra. Susana Paola Arredondo Rea

CO-DIRECTOR DE TESIS:

Dr. Ramón Corral Higuera

Culiacán de Rosales, Sinaloa, a diciembre de 2020.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

REPOSITORIO INSTITUCIONAL



UAS- Dirección General de

Bibliotecas Repositorio Institucional

Restricciones de uso

Todo el material contenido en la presente tesis está protegido por la Ley Federal de Derechos de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

Queda prohibido la reproducción parcial o total de esta tesis. El uso de imágenes, tablas, gráficas, texto y demás material que sea objeto de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente correctamente mencionando al o los autores del presente estudio empírico. Cualquier uso distinto, como el lucro, reproducción, edición o modificación sin autorización expresa de quienes gozan de la propiedad intelectual, será perseguido y sancionado por el Instituto Nacional de Derechos de Autor.



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Compartir Igual, 4.0 Internacional.

*Le doy las gracias a Dios,
por regalarme la dicha
de concluir un paso más
en mi formación académica.*

*Les agradezco a mis padres,
por brindarme siempre su apoyo
incondicional y por motivarme
con palabras de aliento.*

*A mi esposa mil gracias,
por acompañarme durante
este camino lleno de altibajos,
de angustias y alegrías,
por estar siempre a mi lado
dándome su compañía y amor.*

*Dedico este trabajo para dos hombres que
han marcado mi vida en este 2020:*

*A mi hijo, Diego Adriel,
que aún en el vientre de Yamel, mi esposa,
ha sido mi mayor motivación
para seguir esforzándome
hasta alcanzar este objetivo.*

*Y a mi hermano, Sergio Armando,
que se nos adelantó en el camino,
pero que desde donde quiera que esté
sabe que lo amaré siempre y que
BELCAS sigue en pie.*

Resumen.

El medio ambiente se ve afectado por diversos fenómenos que se desarrollan a nivel mundial, ya sea por acciones antropogénicas y por mismos procesos naturales, debido a esto se ha buscado lograr una menor afectación al medio ambiente en la industria de la construcción. Con dicha intención se desarrolla el presente proyecto de intervención, buscando conocer las características de elementos prefabricados elaborados de geopolímeros base ceniza volante, buscando lograr una doble mitigación al daño ambiental, y así mismo conocer su potencial como un nuevo material empleado en la construcción, teniendo propiedades mecánicas y térmicas que garanticen su eficiente implementación en envolventes de edificaciones. Lo anterior se logró mediante la elaboración de especímenes prismáticos rectangulares de 40 x 40 x 160 mm, usando 6 mezclas distintas que se realizaron variando la relación solución activadora – ceniza volante y la concentración molar del hidróxido de sodio, dichas mezclas geopoliméricas desarrollaron características mecánicas superiores a las solicitadas por las normativas mexicanas para elementos de mampostería, así como una reducción en el coeficiente de transferencia de calor al proponerlo como material de construcción en envolventes de edificaciones.

Palabras claves.

Geopolímero, Ceniza Volante, Prefabricados.

Abstract.

The environment is affected by various phenomena that are developed worldwide, either by anthropogenic actions and by natural processes themselves, due to this has sought to achieve a lower impact on the environment in the construction industry. With this intention, the present intervention project is developed, seeking to know the characteristics of prefabricated elements elaborated from fly ash based geopolymers, seeking to achieve a double mitigation to environmental damage, and also to know its potential as a new material used in the construction, having mechanical and thermal properties that guarantee their efficient implementation in building envelopes. This was achieved through the elaboration of rectangular prismatic specimens of 40 x 40 x 160 mm, using 6 different mixtures that were made by varying the activator solution - fly ash ratio and the molar concentration of sodium hydroxide, said geopolymetric mixtures developed superior mechanical characteristics to those required by Mexican regulations for masonry elements, as well as a reduction in the heat transfer coefficient by proposing it as a construction material in building envelopes.

Keywords.

Geopolymer, Fly Ash, Prefabricated.

Índice General.

1.- Introducción.	11
1.1.- Presentación.	11
1.2.- Análisis situacional.	12
1.3.- Definición del problema seleccionado.	12
2.- Fundamento Teórico.	14
2.1.- Marco Histórico y Contextual.	14
2.2.- Estado del arte.	15
2.3.- Marco teórico.	29
2.3.1.- Geopolímeros.	29
2.3.1.1.- Definiciones	29
2.3.1.2.- Proceso de síntesis.....	29
2.3.2.- Agente precursor: Ceniza Volante.	30
2.3.2.1.- Definición.....	30
2.3.2.2.- Clasificación.....	31
Clase F.	31
Clase C.....	31
2.3.2.3.- Características Físicas.	31
Color.	31
Granulometría.....	31
Finura.....	31
Superficie Específica.	32
Forma de la partícula.	32
Densidad.	32
2.3.3.- Solución Activadora.	32
2.3.3.1.- Hidróxido de Sodio (NaOH).	32
2.3.3.1.- Silicato de Sodio (Na_2SiO_3).	33
2.3.4.- Prefabricación.....	33
2.3.5.- Envolverte.....	33
2.3.6.- Métodos de Caracterización.	33
2.3.6.1.- Análisis Dinámicos.	34
Método de Frecuencias fundamentales de resonancia por impacto.	34

Determinación de la variación de longitud de especímenes.....	36
2.3.6.2.- Análisis Estáticos.	37
Determinación de la resistencia a la flexión.....	37
Determinación de la resistencia a la compresión.....	37
2.4.- Marco legal.....	38
3.- Proyecto de Intervención.....	40
3.1.- Hipótesis.....	40
3.2.- Objetivo (s) General (es).....	40
3.3.- Objetivos Específicos.....	40
3.4.- Justificación.....	40
3.4.1.- Ambiental.	40
3.4.2.- Científico-técnica.	41
3.5.- Metodología.	42
3.5.1.- Materiales.	42
3.5.2.- Elaboración de especímenes.....	44
3.5.3.- Ensayos realizados.	48
3.5.3.1.- Pruebas mecánicas.	48
3.5.3.2.- Determinación de la absorción de agua, densidad y volumen de vacíos. ..	53
3.5.3.3.- Prueba de contracción por secado.	58
3.5.3.4.- Conductividad térmica.	60
3.5.3.5.- Diseño de propuestas de aplicación y evaluación del coeficiente global de transferencia de calor.....	60
3.6. Análisis de resultados	62
3.6.1.- Propiedades mecánicas.....	62
3.6.2.- Absorción de agua y densidad.....	65
3.6.3.- Contracción por secado.	66
3.6.4.- Conductividad térmica.	67
3.6.5.- Diseño de propuestas de aplicación y evaluación del coeficiente global de transferencia de calor.....	70
4.- Estrategias de implementación.....	72
4.1 Plan de acción.....	72
5.- Administración del proyecto	75
6.- Conclusiones y recomendaciones.....	75

6.1.- Conclusiones parciales.	75
6.2.- Recomendaciones.	76
Referencias documentales y bibliografía complementaria.	77
Anexos.	82

Índice de Figuras.

Figura 1. Configuración de la muestra para los modos de prueba Transversal, Longitudinal y Torsional, Adaptado de ASTM C215.....	34
Figura 2. Ruta del desarrollo general de un estudio relacionado con ladrillos.....	41
Figura 3. Morfología de FA.....	43
Figura 4. Secado de arena usando aire caliente.	44
Figura 5. Mezcla de arena- Na_2SiO_3	45
Figura 6. Mezcla de FA-NaOH	45
Figura 7. Mezcla de FA-NaOH y Arena- Na_2SiO_3	46
Figura 8. Colado y compactado de la mezcla.....	46
Figura 9. Comienzo de la fase de precurado.	47
Figura 10. Obtención de la masa de los especímenes.....	48
Figura 11. Medición de los especímenes.....	48
Figura 12. Marcado del espécimen.....	49
Figura 13. Acomodo para frecuencia fundamental en modo transversal.	49
Figura 14. Acomodo para frecuencia fundamental en modo torsional.....	49
Figura 15. Configuración de la prueba de resistencia a flexión.	51
Figura 16. Falla de espécimen en prueba de resistencia a flexión.....	51
Figura 17. Alineación de las placas para prueba de resistencia a la compresión con cubos equivalente.....	52
Figura 18. Configuración para ensayo de resistencia a la compresión.....	53
Figura 19. Modo de falla de los especímenes a compresión.	53
Figura 20. Trozos empleados para la determinación de densidad, porcentaje absorción y volumen de vacíos.	55
Figura 21. Horno eléctrico utilizado para secar las los trozos de viga de geopolímero.	55
Figura 22. Obtención de la masa seca.	56
Figura 23. Recipientes con especímenes sumergidos en agua potable a 21°C durante 48 horas.	56
Figura 24. Obtención de masa saturada superficialmente seca.	57
Figura 25. Hervido de trozos de geopolímero.	57
Figura 26. Obtención de la masa saturada superficialmente seca después de ser hervido y de la masa sumergida.....	58
Figura 27. Desmolde de piezas de geopolímero con tuerca embebida.....	58

Figura 28. Calibración del comparador de longitud.	59
Figura 29. Medición del cambio de longitud, respecto a la longitud de calibración.	59
Figura 30. Configuración de las potenciales aplicaciones del material estudiado.	60
Figura 31. Ed de las mezclas estudiadas.	62
Figura 32. Resistencia a flexión de las mezclas.	63
Figura 33. Resistencia a compresión de las mezclas.	63
Figura 34. Absorción total en 24 h.	65
Figura 35. Densidad de piezas estudiadas y piezas típicas.	66
Figura 36. Contracción por secado con respecto al tiempo.	67
Figura 37. Relaciones Conductividad Térmica-Densidad -Porosidad [75].....	69
Figura 38. Ficha técnica de la fachaleta geopolimérica.....	73
Figura 39. Ficha técnica del tabique macizo geopolimérico	74

Índice de Tablas.

Tabla 1 - Tendencias de Investigación del término “geopolymer” en Scopus del 2015 al 2020.	14
Tabla 2 - Condensado de Estado del arte.	16
Tabla 3 - Normativa aplicable al proyecto de intervención.	39
Tabla 4. Composición Química de FA.	43
Tabla 5. Granulometría de la Arena de Ottawa.	43
Tabla 6. Proporciones de mezclas preliminares	44
Tabla 7 - Matriz experimental con geopolímeros base ceniza volante.....	47
Tabla 8. Requisitos de resistencia para piezas de mampostería de uso no estructural.	64
Tabla 9. Máximos de absorción según para materiales de mampostería para uso no estructural.	65
Tabla 10. Revisión bibliográfica de conductividad térmica en morteros geopoliméricos base CV.....	68
Tabla 11. Descripción de configuraciones de superficies analizadas.....	70
Tabla 12. Valores de K para las configuraciones analizadas.	71

1.- Introducción.

1.1.- Presentación.

Con la intención presentar, tanto a los miembros partícipes activos de la industria de la construcción como a los sectores de la sociedad con interés en conocer nuevas alternativas para satisfacer las necesidades sociales actuales de una manera sustentable, es que en el presente proyecto de intervención se elaborará especímenes de mortero por un proceso conocido como geopolimerización, en el cual se genera un aglutinante con base en ceniza volante [Fly Ash (FA)], que es un desecho de la industria de generación energética, y algunas sustancias químicas (Na_2SiO_3 y NaOH); con tales morteros se moldearán probetas de 40 x 40 x 160 mm que después de recibir un tratamiento térmico ($24 + 24$ h a $82 \pm 2^\circ\text{C}$) serán analizadas física y mecánicamente, para posteriormente elaborar propuestas de aplicación como parte de la edificación de un prototipo de casa-habitación de interés social, esto con la finalidad de conocer la posibilidad de implementación de dicho material como parte de elementos estructurales otorgando características termoaislante que permita generar una disminución en las demandas de energía eléctrica generadas a la red de suministro en las épocas de temperaturas elevada, predominantes la mayor parte del año en el norte del país, y con gran importancia en la entidad.

Entre las características que se evaluarán se encuentran las resistencias a la flexión y a la compresión, determinación de la densidad, porosidad, absorción, análisis de contracción al ser expuesto a un ambiente de secado y determinación de conductividad térmica. Todo esto se llevará a cabo para un total de 6 tipos de mezclas de morteros distintas, en la cuales las principales variaciones será la relación entre la cantidad de material proveniente de la industria energética (FA) y la suma de sustancias químicas empleadas para su mezclado [Solución Activadora (SA)], y la concentración molar del NaOH usado en la SA.

En la primera sección del documento se presenta un análisis situacional del panorama de las industrias relacionadas con el tema, y la definición del problema que se pretende atender.

El Fundamento teórico en el cual se apoya esta investigación se plasma en la segunda sección y que contiene el marco histórico y contextual para darnos una perspectiva de la situación actual de la investigación del tema a nivel global, un estado del arte en el cual se reúnen las investigaciones más recientes con relación cercana al proyecto, y un marco teórico en el cual se hace mención de los conceptos a emplearse, los procedimientos a efectuar y sus explicaciones teóricas, y por último un marco legal el cual presenta las normas que rigen el desarrollo de este proyecto.

En el apartado 3 se presenta de manera detallada las particularidades del proyecto de intervención comenzando con los objetivos que se pretenden alcanzar de manera general y particular seguidos de una justificación donde se define el por qué se considera adecuado trabajar con este proyecto y buscar el cumplimiento de los objetivos, posteriormente se encuentra la metodología en donde se describe la manera en que se efectuaron los procedimientos que conforman el proyecto de intervención y se hace uso de imágenes para ilustrarlos, por último en esta sección se encuentran los resultados obtenidos de los diversos

procedimientos condensados en gráficas o tablas según convenga para interpretación y análisis.

Las estrategias que se proponen seguir para poder introducir el producto analizado en este proyecto al mercado, como parte de las alternativas de construcción sustentable con un enfoque termoaislante, se presentan en el cuarto apartado. Mientras que en el apartado número 5 se presentan el presupuesto y el cronograma que se sería necesario para poder llevar a cabo la incursión al mercado del material objeto de diseño en el proyecto.

Por ultimo las conclusiones a las que se llegaron después de desarrollar este proyecto, y las recomendaciones que se generen para aplicaciones o futuros trabajos relacionados se plasman en el sexto apartado.

1.2.- Análisis situacional.

En la actualidad la industria de la construcción se ha convertido en uno de los principales factores que afectan al medio ambiente dado a la gran cantidad de recursos que son explotados para satisfacer las necesidades de infraestructura y desarrollo de una sociedad en crecimiento constante. Uno de los principales materiales que son empleados en esta industria es el Cemento Portland (CP), se considera que la producción anual de CP es de aproximadamente 2 mil millones de toneladas al año [1], para la producción de éste se requiere calcinar roca caliza entre otros materiales para generar el clinker, esto genera una gran cantidad de emisiones de CO₂ al medio ambiente. Se calcula que por cada tonelada de cemento que es producida a nivel mundial se generan emisiones de CO₂ que oscilan entre 0.7 y 1.1 toneladas [2], con una aportación del 50% debida al proceso de calcinación de piedra caliza, 40% por la quema de combustibles en el horno, 10% por empaçado y distribución [3], por lo anterior la industria cementera es considerada el segundo mayor generador de emisiones de gas de efecto invernadero [4], solamente precedido por la industria de generación energética[2].

Con respecto a la industria energética, que como se mencionó anteriormente, es considerada la primera generadora de emisiones de gases invernaderos, se contempla que para el 2020 el 36% del combustible empleado con la finalidad de generar electricidad será carbón, lo que seguirá aportando a la generación de cenizas volantes que son sub-productos dicho proceso [5], en el 2010 se calculaba una generación de 800 millones de toneladas anuales de FA de las cuales solamente eran empleadas entre un 20 y 30%, por lo que el resto debe ser colocada en vertederos de enormes dimensiones, generando potenciales riesgos ambientales [6].

1.3.- Definición del problema seleccionado.

En la actualidad, en la industria de la construcción, uno de los principales materiales implementados tanto para la creación los elementos fabricados en sitio como para los prefabricados empleados en los distintos elementos que conforman las edificaciones, es el CP, el cual para su producción requiere de la explotación y calcinación de diversos materiales, generando así un impacto adverso en el medio ambiente debido a las grandes emisiones de CO₂ a la atmósfera y costos relativamente elevados en comparación con el de materiales alternativos, los cuales se ha demostrado que presentan ciertas características favorables tanto en resistencia, rapidez de madurez y características térmicas.

Con la finalidad de abastecer a la población de energía eléctrica, en algunas ocasiones se emplean como fuente de energía combustibles sólidos, como es el caso del carbón, posteriormente, por medio de equipos de extracción de gases y partículas, se logra precipitar un material fino al cual se le denomina “ceniza volante”. Este material debe ser almacenado de modo que no represente un riesgo de contaminación ambiental, pero debido a que las industrias deben satisfacer una alta demanda de sus servicios, es que los volúmenes de ceniza volante incrementan a cada minuto. Por ello, se pretende encontrar una nueva opción de implementación para dicho desecho industrial.

La eficiencia energética es un criterio importante en los índices de edificación sustentable. La necesidad de optimizar el consumo energético en las edificaciones ha sido cada vez mayor y se han implementado esfuerzos tanto en el sector científico como gubernamental.

El material de interés en este proyecto de intervención son los geopolímeros, que son polímeros inorgánicos que se originan mediante el proceso de geopolimerización de un agente precursor, que es la fuente de aluminosilicatos, y agentes activadores con características alcalinas, dada la naturaleza de los geopolímeros y su proceso de elaboración, son recomendables tanto en términos ambientales y económicos.

Por lo anterior en este proyecto se pretende diseñar, fabricar y determinar las características de elementos prefabricados elaborados con geopolímeros base ceniza volante, con la finalidad de contribuir a la solución de la problemática descrita.

2.- Fundamento Teórico.

2.1.- Marco Histórico y Contextual.

El concepto “sustentabilidad” es un término que comenzó a considerarse desde la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente Humano, llevada a cabo en Estocolmo, Suecia, en 1972. Sin embargo, fue hasta 1987 cuando el informe de la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo, conocido habitualmente como Informe Brundtland, definió el desarrollo sustentable como “el desarrollo que satisfaga nuestras necesidades de hoy, sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades” [7]. A partir de entonces se han venido generando políticas y esfuerzos científicos y gubernamentales para desarrollar soluciones que contribuyan al desarrollo sustentable.

Durante la década de 1950, en la Unión Soviética, se desarrollaron polímeros inorgánicos que fueron denominados como Cementos de suelo, pero fue hasta los años 70s que, en Australia, el Dr. Joseph Davidovits acuñó el término de Geopolímeros para referirse a aquellos aglutinantes activados alcalinamente elaborados a base de agentes precursores ricos en aluminosilicatos, los cuales presentan propiedades similares al cemento tradicional en términos mecánicos y una gran resistencia química y térmica.

Hoy en día es un tema que se encuentra en crecimiento, esto respaldado en una revisión llevada a cabo la base de datos de Scopus empleando como estrategia de búsqueda la palabra “geopolymer”, se encontraron 6508 documentos de los cuales, en los últimos cinco años se han registrado las siguientes cantidades de documentos publicados:

Tabla 1 - Tendencias de Investigación del término “geopolymer” en Scopus del 2015 al 2020.

<i>Año</i>	<i>Cantidad de publicaciones</i>
2020	450*
2019	1083
2018	948
2017	811
2016	657
2015	510

**Cantidad de publicaciones en lo que va del año.*

De los cuales las temáticas principales que son abordadas por dichos documentos son Ingeniería y Ciencias de Materiales.

En el caso del listado de países con mayor participación y aportaciones en el tema destacan en orden descendente, China, Australia, India, Estados Unidos y Malasia, entre otros, quedando México en el lugar 32 de dicha lista.

En el año 2018 México aportó 5 artículos, mientras que en 2019 fueron 10 los documentos registrados, por último en lo que va del 2020 se han registrado 7 publicaciones con referencia al tema.

Entre los grupos de investigación que destacan en el tema a nivel regional, está el Grupo de investigación de Materiales Sustentables, organizados como cuerpo académico UAS-CA-297 “Materiales y Procesos de Construcción Ecoeficientes” adscrito a la Universidad Autónoma de Sinaloa, quienes en colaboración con diversos colegas, interesados en el mismo tema, han desarrollado y publicado diversas investigaciones relativas a la síntesis, caracterización y aplicaciones de los geopolímeros base ceniza volante y base escoria granulada de alto horno.

2.2.- Estado del arte.

Después de haber realizado una búsqueda exhaustiva de trabajos previos relacionados con morteros geopoliméricos elaborados a base de ceniza volante y publicados en el período de 2010 a la fecha, y tras un proceso de análisis, selección y condensación, en la Tabla 2 se muestra un resumen de los hallazgos principales que se consideran de interés para este proyecto de intervención.

Tabla 2 - Condensado de Estado del arte.

FECHA [REFERENCIA]	TÍTULO DEL ARTÍCULO (PAÍS)	MATERIALES	CONDICIONES DE EXPERIMENTACIÓN	PRUEBAS REALIZADAS	RESULTADOS Y CONCLUSIONES DE INTERES PARA EL P.I.
2010 [6]	Mechanical and microstructural properties of alkali-activated fly ash geopolymers. (Serbia)	Precursor (P): Ceniza Volante (Fly Ash)(FA) Solución Activadora (SA): $\text{Ca}(\text{OH})_2$, NaOH , Na_2CO_3 , $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$	Relaciones: SA, FA, Arena, Agua 1:2:9:1.8. Dimensiones de los especímenes: Vigas de 40 x 40 x 160mm. Precurado: 24 h a $20 \pm 2^\circ\text{C}$. Curado: 6 días a $55 \pm 2^\circ\text{C}$.	• Resistencia a la compresión (f'_c) • Difracción de rayos X (DRX) • Microscopía electrónica de barrido (SEM) • Análisis de espectroscopia de energía dispersiva (EDS)	La mayor f'_c fue de 43.21 N/mm ² , conseguida empleando $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$ con $n=1.5$ y un % $\text{Na}_2\text{O}=10$. Los productos de reacción fueron en su mayoría amorfos en un rango de 25 a $35^\circ 2\theta$. Al incrementar el valor de n ($\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$) se aumentó la cantidad de sílice y aluminio en los geopolímeros, mientras que se redujo la cantidad de sodio.
2010 [8]	Preparation and characterization of fly ash based geopolymer mortars. (Australia)	P: FA SA: NaOH , Na_2SiO_3	Relaciones: SA/FA =0.35. (FA+SA)/Arena= 9, 4, 2.3, 1.5 y 1. Porcentajes de sustitución de Arena en FA+SA: 10, 20, 30, 40 y 50%. Concentración de NaOH $[\text{C}(\text{NaOH})] = 14\text{M}$ Dimensiones de los especímenes: Cilindros de 25mm de diámetro y 50mm de alto. Precurado: 24 h a 70°C . Curado: 3 días temperatura ambiente.	• f'_c • DRX • Determinación del Módulo de Young (E) • Porosidad • Densidad	La f'_c promedio de los morteros se mantuvo relativamente constante en valores cercanos a 60 MPa. El porcentaje de porosidad disminuyó de 11.6 a 6.1% mientras que la densidad aumentó de 2.02 a 2.29 gr/cm ³ , el incrementar el porcentaje de sustitución de Arena en los morteros. El módulo de Young incrementa desde los morteros con un 10% de arena (2.30 GPa) hasta el mortero con 30% de arena (2.47 GPa) y posteriormente vuelve a reducir hasta llegar a 2.44 GPa en los especímenes con 50% arena.

FECHA [REFERENCIA]	TÍTULO DEL ARTÍCULO (PAÍS)	MATERIALES	CONDICIONES DE EXPERIMENTACIÓN	PRUEBAS REALIZADAS	RESULTADOS Y CONCLUSIONES DE INTERES PARA EL P.I.
2011 [9]	Relationship between Microscopic Structures and Compressive Strength of Alkali-Activated Fly Ash Mortar. (Corea)	P: FA SA: NaOH, Na ₂ SiO ₃	Relaciones: NaOH/Na ₂ SiO ₃ =1. SA/FA=0.5. (SA+FA)/Arena=1. C (NaOH)= 9M Dimensiones de los especímenes: Cubos de 50 x 50 x 50mm. Precurado: 48h a 30, 60 o 90°C. Curado: 23±2°C durante 1, 3, 7 o 28 días.	• f'c •DRX •Porosidad •SEM •EDS	A los 7 días los especímenes curados a 90°C presentaron la mayor f'c superior a 40MPa, pero en los especímenes probados a 28 días la mayor RC fue presentada por los curados a 60°C (cercana a lo 70MPa). La porosidad se encontró entre 26% (especímenes de 28 días precurado a 30°C) y 30% (especímenes de 28 días precurado a 60 y 90°C). Todos presentaron cristalografía amorfa similar.
2011 [10]	Effect of incorporating silica fume in fly ash geopolymers. (India)	P: FA, Humo de Sílice (Silica Fume) (SF) SA: NaOH, Na ₂ SiO ₃	Relaciones: Agua/FA=0.33. SiO ₂ /Na ₂ O=1. FA/Arena=1. Dimensiones de los especímenes: 50 x 50 x 50mm (2 minutos en mesa vibratoria + 60 minutos de reposo). Curado: 48 h a 80°C (se dejaron enfriar dentro del horno, se desmoldaron y se almacenaron temperatura ambiente hasta su prueba).	• f'c •Porosidad •Aparente •Absorción •Capilaridad •Resistencia a los Sulfatos (RS)	El mortero FM (0% SF) alcanzó a los 28 días una f'c de 26MPa, su porosidad fue cercana al 23% y un 6% de absorción de agua. Mientras que la capilaridad alcanzo 9x10 ⁴ g/mm ² /min ^{0.5} . Después de ser expuestos durante 15 semanas a una solución de 10% de MgSO ₄ , los especímenes de FM presentó el mayor porcentaje de pérdida de peso >8% a las 9 semanas, tiempo en el que presentó su menor f'c residual cercana al 50% de su RC original.
2011 [11]	The effects of Na ₂ O/SiO ₂ molar ratio, curing temperature and age on compressive strength, morphology and microstructure of alkali-activated fly ash-based geopolymers. (Brasil)	P: FA SA: NaOH	Relaciones: Arena/FA=3. SiO ₂ /Al ₂ O ₃ =4.45. Na ₂ O/SiO ₂ (N/S)=0.2, 0.3 y 0.4 con H ₂ O/Na ₂ O=18.11, 11.64 y 8.55 respectivamente. Dimensiones de los especímenes: Cilindros de 50 mm de diámetro y 100 mm de altos. Precurado: 24 h a 50, 65 u 80°C Curado: 24±1°C, humedad relativa (HR) 50% durante 1, 7, 28, 91 y 180 días.	• f'c	Se obtuvieron 45 resultados de f'c donde se puede apreciar que para una edad de 1 y 7 días los resultados se encuentran entre 0MPa y un poco más de 5MPa sin importar la temperatura de precurado y la relación N/S; dicho comportamiento se mantiene para los 28, 91 y 180 días en los morteros con relación N/S=0.2. En el caso de N/S=0.3 los valores de f'c para 28, 91 y 180 días se encuentran entre 9 y 15MPa, mientras que con N/S=0.4 superaron en cada edad de prueba el rango de valores alcanzados en la anterior yendo de 9 - 14, de 16 - 18 y de 19 - 21MPa a los 28, 91 y 180 días respectivamente.

FECHA [REFERENCIA]	TÍTULO DEL ARTÍCULO (PAÍS)	MATERIALES	CONDICIONES DE EXPERIMENTACIÓN	PRUEBAS REALIZADAS	RESULTADOS Y CONCLUSIONES DE INTERES PARA EL P.I.
2012 [12]	Durability Studies on Fly Ash Based Geopolymer Mortar Under in Ambient Curing Condition. (India)	P: FA SA: NaOH, Na ₂ SiO ₃	Relaciones: SA/FA= 0.376, 0.386, 0.396 y 0.416. Arena/FA=2.5. Na ₂ SiO ₃ /NaOH=2.5. Dimensiones de los especímenes: Cubos de 50 x 50 x 50mm. Precurado: Temperatura ambiente hasta su prueba.	•Absorción de agua saturada • f'c •Resistencia a ácidos •Reducción de peso •Reducción de RC	El porcentaje de absorción de agua saturada decrece entre 3 y 2.5% conforme la relación SA/FA incrementa. El ataque por ambiente ácido se simuló con una inmersión de 12 semanas en de unos morteros en una solución de 5%HCl y otros en una solución de 5% HNO ₃ , en todos los casos la reducción de peso se encontró entre 0.25 y 0.4%, lo que se relaciona con las reducciones mínimas en la f'c, que incrementó conforme lo hizo la relación SA/FA y se encontraron cercanos a 35, 45, 50 y 65MPa
2012 [13]	Effect Of Na ₂ O/Al ₂ O ₃ , SiO ₂ /Al ₂ O ₃ And W/B Ratio On Setting Time And Workability Of Flyash Based Geopolymer. (India)	P: FA SA: NaOH, Na ₂ SiO ₃	Relaciones: Agua/Aglutinante= 0.325 y 0.365. (Aglutinante=FA+ Solidos de NaOH y Na ₂ SiO ₃). Agua/FA=0.325. Arena/FA=1.5. Dimensiones de los especímenes: N/A. Curado: N/A.	•Tiempo de Fraguado •Trabajabilidad	Se concluyó que el contenido de Na ₂ O, SiO ₂ y la relación Agua/Aglutinante, pueden generar cambios en la trabajabilidad, el tiempo de fraguado y por lo tanto en la microestructura de los morteros geopoliméricos.
2012 [14]	Strength study on fly ash-based geopolymer mortar. (India)	P: FA SA: NaOH, Na ₂ SiO ₃	Relaciones: SA/FA= 0.376, 0.386, 0.396 y 0.416. Arena/FA=2.5. Na ₂ SiO ₃ /NaOH=2.5. C(NaOH)= 16M Dimensiones de los especímenes: Cubos de 70.71 x 70.71 x 70.71mm. Curado: Sin información.	• f'c	Para las relaciones SA/FA de 0.376, 0.386, 0.396 y 0.416, y para 7, 14 y 28 días los valores de f'c fueron (0.376) 10, 13, y 15 MPa; (0.386) 12, 15 y 17 MPa; (0.396) 16, 18 y 20 MPa; y por último (0.416) 20, 23 y 26 MPa. Evidenciando un incremento de f'c conforme aumenta la relación SA/FA y la edad de las muestras.

FECHA [REFERENCIA]	TÍTULO DEL ARTÍCULO (País)	MATERIALES	CONDICIONES DE EXPERIMENTACIÓN	PRUEBAS REALIZADAS	RESULTADOS Y CONCLUSIONES DE INTERES PARA EL P.I.
2013 [15]	The mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with alkaline activators. (Corea del Sur)	P: FA SA: Serie 1: NaOH (6, 9 y 12M)+Na ₂ SiO ₃ .(50:50) Serie 2: NaOH (9M)+Na ₂ SiO ₃ (0:100, 27:75, 50:50, 75:25, 100:0)	Relaciones: SA/FA= 0.5. Arena/FA=1.5. FA/Agua=10. Na ₂ SiO ₃ /NaOH=1 (Serie 1) Dimensiones de los especímenes: Cubos de 50 x 50 x 50mm. Precurado: 24 h a 60°C. Curado: 23±2°C HR 50% durante 1, 3, 7, 14, 28, 56 y 91 días.	• f'c •SEM •EDS •DRX •Espectroscopia Infrarroja con trasformada de Fourier (FT-IR) •Análisis de distribución de porosidad (ADP)	Se logró detectar similitud entre los resultados a largo plazo (56 y 91 días) de la mezclas con solución de NaOH 9 y 12M en la Serie 1. En la Serie 2 se logró apreciar que el comportamiento de la f'c con relación a la dosificación NaOH:Na ₂ SiO ₃ cuenta con un punto de inflexión ligeramente inferior a la dosificación de 50:50. Del ADP se determinó que el volumen total de poros incrementa conforme aumenta la molaridad de la SA.
2013 [16]	Mechanical and microstructural properties of the fly-ash-based geopolymer paste and mortar. (Montenegro)	P: FA SA: NaOH, Na ₂ SiO ₃	Relaciones: SA/FA= 1. Na ₂ SiO ₃ /NaOH=1, 1.5 y 2. C(NaOH)= 7, 10 y 13M Dimensiones de los especímenes: Vigas de 40 x 40 x 160mm. Precurado: 48 h a 65°C Curado: Después se enfriaron, desmoldaron y se continuó con 14 días a temperatura ambiente.	• f'c •Resistencia a la Flexión (MR) •E •SEM •EDS	El mayor resultado de f'c (10 MPa) se obtuvo con una relación Na ₂ SiO ₃ /NaOH= 1.5, empleando una concentración de 10M en solución de NaOH, concentración para la cual se alcanzó el mayor E = 9.1 GPa. El mayor valor de MR fue alcanzado por los morteros con una relación Na ₂ SiO ₃ /NaOH= 1 con molaridad de NaOH de 7M. La fase geopolimérica de los morteros presenta las siguientes relaciones Na/Si= 0.48, Na/Al= 1.23, Si/Al= 2.65 y Ca/Si= 3.04.
2014 [5]	Synthesis and characteristics of fly ash and bottom ash based geopolymers – A comparative study. (Italia)	P: FA y Ceniza de Fondo (Bottom Ash) (BA) SA: NaOH, Na ₂ SiO ₃	Relaciones: SA/FA= 0.342. Arena/FA=2.5. Na ₂ SiO ₃ /NaOH=2.5. C (NaOH)= 14M Dimensiones de los especímenes: Cilindros de 36 mm de diámetro y 60 mm de altos. Precurado: 48 h a 65°C. Curado: 72 h a 65°C. Secado: 96 h a temperatura ambiente.	•DRX •Análisis Termogravimétrico •Análisis Térmico Diferencial (TDA) •FT-IR •SEM •Densidad •Porosidad •Conductividad Térmica • f'c •E	El mortero FAG (Fly Ash Geopolymer) alcanzó una f'c de 61.4 MPa, el E entre 2.8 y 2.9 GPa. Los valores de Densidad Aparente, Densidad a Granel, Porcentaje de Porosidad y Conductividad Térmica son 2.45 g/cm ³ , 1.454 g/cm ³ , 37% y 0.58 W/mK, respectivamente.

FECHA [REFERENCIA]	TÍTULO DEL ARTÍCULO (PAÍS)	MATERIALES	CONDICIONES DE EXPERIMENTACIÓN	PRUEBAS REALIZADAS	RESULTADOS Y CONCLUSIONES DE INTERÉS PARA EL P.I.
2014 [17]	The influence of the NaOH solution on the properties of the fly ash-based geopolymer mortar cured at different temperatures. (Turquía)	P: FA SA: NaOH, Na ₂ SiO ₃	Relaciones: Arena/FA= 3. Na ₂ SiO ₃ /NaOH= 2. C (NaOH)= 3, 6 y 9M. Dimensiones de los especímenes: Vigas de 40 x 40 x 160mm. Temperatura de curado (Te.C): 65 u 85°C. Tiempo de curado (Ti.C): 2, 5, o 24 h	• f'c •MR •Densidad •Porosidad •Absorción	Los resultados de porosidad máxima (≈30%), absorción máxima (>19%) y densidad a granel mínima (>1550kg/m ³) los alcanzó el mortero con C (NaOH)=3M, Te.C= 85°C y Ti.C=2 h. Mientras que los valores mínimos de porosidad (>25%) y absorción (≈15.5%), y el máximo de densidad a granel (>1620 kg/m ³) lo presentó el mortero con C (NaOH)=3M, Te.C= 85°C y Ti.C=24 h. En f'c el máximo valor alcanzado fue de ≈25MPa [C(NaOH)=6M, Te.C= 85°C y Ti.C=24 h] y el mínimo fue apenas >10MPa [C(NaOH)=3M, Te.C= 85°C y Ti.C=2 h]. Para la MR el máximo fue de ≈9MPa [C(NaOH)=9M, Te.C= 85°C y Ti.C=24 h], y el mínimo fue de ≈4.5MPa [C(NaOH)=9M, Te.C= 65°C y Ti.C=5h]
2014 [18]	The development of compressive strength of ground granulated blast furnace slag-palm oil fuel ash-fly ash based geopolymer mortar. (Malasia)	P: FA, Escoria Granulada de Alto Horno (Ground granulated blast furnace slag) (GGBS) y Ceniza de Combustible de Aceite de Palma (Palm Oil Fuel Ash)(POFA) SA: NaOH, Na ₂ SiO ₃	Relaciones: SA/FA=0.4. Arena/FA= 4. Na ₂ SiO ₃ /NaOH= 2.5. C (NaOH)= 12M. Dimensiones de los especímenes: Cubos de 50 x 50 x 50mm. Precurado: 24h a 65°C, 6 horas de enfriamiento y posterior desmolde. Curado: 27°C con 70% HR, hasta 3, 7, 14 o 28 días	• f'c	La f'c del mortero M3 (100% FA) incrementó para la edad de 3, 7, 14 y 28 días, alcanzando valores de 7, 7, 8 y 9 MPa, respectivamente, y presentó una relación SiO ₂ /Al ₂ O ₃ = 2.01.
2014 [19]	Compressive strength and microstructural analysis of fly ash/palm oil fuel ash based geopolymer mortar. (Malasia)	P: FA, POFA SA: NaOH, Na ₂ SiO ₃	Relaciones: POFA: FA = 0:100 SA/FA=0.5. Na ₂ SiO ₃ /NaOH= 2.5. C (NaOH)= 16M. SiO ₂ /Al ₂ O ₃ = 4.07 Na ₂ O/SiO ₂ = 0.19 Na ₂ O/Al ₂ O ₃ = 0.76 Dimensiones de los especímenes: Cubos de 50 x 50 x 50mm. Precurado: 24h a 65°C, seguido de un enfriamiento fuera del horno y posterior desmolde. Curado: 28°C con 70% HR, hasta 3, 7, 14, 21, 28, 56 y 112 días	•DRX •Densidad •Emisión de campo del análisis microscópico electrónico de barrido (FESEM) •FT-IR • f'c	La mezcla ET1 (100% FA) presentó la mayor densidad a granel con un valor de ≈ 1770 kg/m ³ , y su f'c alcanzó valores superiores a todas las demás mezclas a lo largo de todas las edades de prueba hasta alcanzar una RC ≈ 40MPa Se presenta el distintivo pico en el difractograma de la muestra ET1 a los 28° de 2θ. En el FESEM se apreció que las partículas de FA coexisten con una unión fuerte con la matriz polimerizada sin presentar grietas.

FECHA [REFERENCIA]	TÍTULO DEL ARTÍCULO (PAÍS)	MATERIALES	CONDICIONES DE EXPERIMENTACIÓN	PRUEBAS REALIZADAS	RESULTADOS Y CONCLUSIONES DE INTERES PARA EL P.I.
2014 [20]	Effect of Concentration of Sodium Hydroxide and Degree of Heat Curing on Fly Ash-Based Geopolymer Mortar. (India)	P: FA SA: NaOH, Na ₂ SiO ₃	Relaciones: Arena/FA=3 SA/FA=0.35, 0.40 y 0.45. Na ₂ SiO ₃ /NaOH= 1. C (NaOH)= 2.91, 5.61, 8.11, 11.01, 13.11 y 15.06M Dimensiones de los especímenes: Cubos de 70.7 x 70.7 x 70.7mm. Curado: 24h a 40, 60, 90 o 120 °C, Ensayo a los 3 días después del curado.	•Trabajabilidad • f'c •Densidad	Las mezclas con SA/FA= 0.45 y se demostró que conforme se aumenta la relación SA/FA y C (NaOH) aumenta el flujo de las mezclas. Conforme incrementa la temperatura de curado se incrementan los calores de f'c alcanzados por las mezclas. Para las relaciones SA/FA= 0.35 y 0.40 la mezcla con C (NaOH)=15.06M con valores máximos de $\approx$ 57 y 65 MPa, respectivamente, mientras que para el caso de SA/FA=0.40 el valor máximo de f'c lo alcanzó la mezcla con C (NaOH)= 11.01 M con $\approx$ 80 MPa. La C (NaOH)= 5.61 produjo los morteros más densos en todas las relaciones SA/FA.
2014 [21]	Effect of Sodium Silicate to Sodium Hydroxide Ratios on Strength and Microstructure of Fly Ash Geopolymer Binder. (Arabia Saudita)	P: FA SA: NaOH, Na ₂ SiO ₃	Relaciones: Arena/FA=2 SA/FA=0.40 Na ₂ SiO ₃ /NaOH= 0.5, 1, 1.5, 2 y 2.5. C (NaOH)= 10M Dimensiones de los especímenes: Cubos de 50 x 50 x 50mm Vigas de 40 x 40 x 160 mm Precurado: 24 h a 80°C Curado: Temperatura ambiente hasta 3, 7, 28 o 60 días.	• f'c •MR •DRX •FT-IR •SEM	La f'c incrementa conforme lo hace la edad de curado, presentando mayores resultados siempre el mortero M2 (Na ₂ SiO ₃ /NaOH=1), con valores relativamente constantes y superiores a 60 MPa. Así el M2 presenta la mayor MR con valores entre 4.2 y 6 MPa. En los patrones de los DRX de las muestras se aprecia los picos característicos del cuarzo, mullita y hematita. El DRX, SEM y FT-IR indican que a los 80°C ocurre la geopolimerización de la FA activada con una relación de Na ₂ SiO ₃ /NaOH.
2015 [22]	Final Setting Time and Compressive Strength of Fly Ash and GGBS-Based Geopolymer Paste and Mortar. (Arabia Saudita)	P: FA, GGBS SA: NaOH, Na ₂ SiO ₃	Relaciones: Arena/FA=1 SA/FA=0.45 Na ₂ SiO ₃ /NaOH= 2.5. C (NaOH)= 8, 12 y 16M Dimensiones de los especímenes: Cubos de 100 x 100 x 100mm Curado 1 (CC1) condiciones de exterior 35 $\pm$ 2°C y 75% HR por 28 días Curado 2 (CC2): 24 h a 60°C, aplicar Curado 1 por 27 días más.	•Consistencia Normal •Fraguado Final • f'c	La f'c de las morteros 1 (FA: GGBS=100:0) fue el menos resistente de todos los analizados, a pesar de esto ante las diferentes C(NaOH) de 8, 12 y 16M y con CC1 alcanzaron valores de 41, 44 y 45 MPa, mientras que con un CC2 los valores de RC fueron 52, 53 y 54 MPa. La consistencia normal del mortero 1 no se ve afectada por la C (NaOH), pero el tiempo de fraguado final incrementa conforme la C (NaOH) lo hace.

FECHA [REFERENCIA]	TÍTULO DEL ARTÍCULO (PAÍS)	MATERIALES	CONDICIONES DE EXPERIMENTACIÓN	PRUEBAS REALIZADAS	RESULTADOS Y CONCLUSIONES DE INTERES PARA EL P.I.
2015 [23]	Very high strength (120 MPa) class F fly ash geopolymer mortar activated at different NaOH amount, heat curing temperature and heat curing duration. (Turquía)	P: FA SA: NaOH	Relaciones: Arena/FA=3 Agua/FA=0.33 % Na= de 4 a 20% en Δ 2% Dimensiones de los especímenes: Vigas de 40 x 40 x 160 mm Te.C: de 45 a 115°C en Δ 10°C Ti.C: 24, 48 o 72 h.	• f'c • MR	Se logró generar un geopolímero con f'c = 120 MPa y una MR= 15 MPa con un 14% de Na, una Te.C= 24 h y un Ti.C= 115°C. Conforme se incrementa la duración del Ti.C incrementan los valores de f'c y MR. A temperatura de 45°C el geopolímero no desarrollo resistencia alguna.
2015 [24]	The influence of fly ash characteristics and reaction conditions on strength and structure of geopolymers. (Serbia)	P: 3 tipos de FA SA: NaOH, Na ₂ SiO ₃	Relaciones: Arena/FA=3 C(NaOH)= 10M (% Na ₂ O) _{SA} = 10% del peso de FA Dimensiones de los especímenes: Vigas de 40 x 40 x 160 mm Te.C: 55, 80 y 95°C Ti.C: 4, 8, 16 y 24 h.	• f'c	Conforme se incrementó la Te.C y el Ti.C, incrementó también la f'c de los morteros. De manera contraria conforme la relación agua/aglutinante aumentaba, las f'c eran menores.
2016 [25]	Properties of Fly Ash Based Geopolymer Mortar with Ambient Curing. (India)	P: FA SA: NaOH, Na ₂ SiO ₃ , Ca(OH) ₂	Relaciones: Arena/FA=2.75 SA/FA=0.5 C (NaOH)= 14M Na ₂ SiO ₃ /NaOH=1.5. Agua/ (SA+FA)=0.10. Dimensiones de los especímenes: Cubos de 70 x 70 x 70 mm Curado con calor: 24 h a 80°C + 24 h de reposo. Curado a tem. amb.: 24 h a 28±5°C	• f'c	La mezcla AC-1 [0% Ca (OH) ₂ , curada a temperatura ambiente] a los 7 días desarrolló una RC de 10.89 MPa, lo cual representa un 43% de la f'c alcanzada por la mezcla TC [0% Ca (OH) ₂ , curada con calor] de 25.53 MPa.

FECHA [REFERENCIA]	TÍTULO DEL ARTÍCULO (País)	MATERIALES	CONDICIONES DE EXPERIMENTACIÓN	PRUEBAS REALIZADAS	RESULTADOS Y CONCLUSIONES DE INTERÉS PARA EL P.I.
2016 [26]	The properties of fly ash based geopolymer mortars made with dune sand. (Australia)	P: FA SA: Na=NaOH+ Na ₂ SiO ₃ Na/K=NaOH+K ₂ SiO ₃ K= KOH+K ₂ SiO ₃	Arena: de Río (River Sand) (RS) de Duna (Dune Sand) (DS) Relaciones: Arena/FA=2 SA/FA=0.5 Na ₂ SiO ₃ /NaOH=2.5. K ₂ SiO ₃ /NaOH=2 K ₂ SiO ₃ /KOH=1 Na ₂ O/Al ₂ O ₃ =0.42 K ₂ O/Al ₂ O ₃ = 0.70 H ₂ O/Al ₂ O ₃ = 5.24 (Na), 5.93 (Na/K), 6.3 (K). SiO ₂ /Al ₂ O ₃ = 3.23 (Na), 3.21 (Na/K), 3.80 (K). Dimensiones de los especímenes: Cilindros de 25 mm de diámetro y 50 mm de alto. Curado: 24 h a 60°C	• f'c • E • Resistencia a la tracción por compresión diametral (RT_{CD}) • DRX • SEM • Porosimetría por Intrusión de Mercurio (MIP)	La porosidad y el volumen de vacíos aumentaron según el tipo de SA empleada en el siguiente orden Na<Na/K<K, mientras que los valores de f'c disminuyeron mostrando los siguientes resultados: f'c _{Na} = 77 MPa, f'c _{Na/K} = 55 MPa, f'c _K = 27 MPa. (Se le atribuye a la relación H ₂ O/Al ₂ O ₃). Se presentó una reducción en la f'c al emplearse DS y un incremento en el volumen de vacíos en comparación con la RS (afectado por el tipo de catión en la solución). Independientemente del tipo de arena la relación Si/Al de los geopolímeros aumentó con la misma relación Na<Na/K<K.
2016 [27]	Evaluation of fly ash geopolymer mortar incorporating calcined wastepaper sludge. (Australia)	P: FA, Lodo de desecho de papel calcinado (Calcined Wastepaper Sludge) (CWS). SA: NaOH, Na ₂ SiO ₃	Relaciones: Arena/FA=3 SA/FA=0.2 (SiO ₂ /Na ₂ O) _{SA} =1.5 (H ₂ O/Na ₂ O) _{SA} =11 Dimensiones de los especímenes: Cubos de 50 x 50 x 50 mm Vigas de 40 x 40 x 160 mm Curado: 23°C y 50% HR durante al menos 1 día (o el tiempo necesario para poder desmoldar).	• Trabajabilidad • Tiempo de Fraguado • f'c • Contracción por secado	El mortero de 100% FA presentó los mayores resultados en términos de porcentaje de flujo y tiempo de fraguado lo cual se pudo verificar ya que se desmoldó hasta el 5to día, por lo cual solo se pudo registrar su f'c del 7mo día que es la menor de toda con un valor de 3.8 MPa. Dicho rezago se vio compensado al realizar la prueba a los 91 días de edad donde todos los f'c fueron cercanos a 70 MPa. Dicho mortero presentó 12,000 micro deformaciones al cabo de 91 días.

FECHA [REFERENCIA]	TÍTULO DEL ARTÍCULO (PAÍS)	MATERIALES	CONDICIONES DE EXPERIMENTACIÓN	PRUEBAS REALIZADAS	RESULTADOS Y CONCLUSIONES DE INTERES PARA EL P.I.
2016 [28]	Utilization of Fly Ash, Red Mud, and Electric Arc Furnace Dust Slag for Geopolymer. (Indonesia)	P: FA, Barro Rojo (Red Mud)(RM), Escoria de Polvo de Horno de Arco Eléctrico (Electric Arc Furnace Dust Slag)(EAFDS) SA: NaOH, Na ₂ SiO ₃	Relaciones: Arena/FA=1.5 SA/FA=0.5 C (NaOH)= 8, 12 y 16M Dimensiones de los especímenes: Cubos de 50 x 50 x 50 mm Curados: Ambiente: Temperatura ambiente Seco= 24 h a 80°C Inmerso: Sumergido en agua.	• f'c • Porosidad • DRX • FTIR	Los morteros FAF (100% FA) presentaron su mayor f'c cuando la C (NaOH)=12M y sus valores no fueron muy distintos a pesar de método de curado 37.5 MPa (Ambiente), 44 MPa (Seco) y 32 MPa (Inmerso). La porosidad promedio para FAF con curado Inmerso y C (NaOH)=12M fue de 26.84%. Empleando FAF con curado Seco y C (NaOH)=12M, por haber presentado la mayor f'c se llevó a cabo el DRX, que determino que el mortero geopolimérico presenta una mayor cantidad de área semicristalinas que la FA por si sola.
2017 [29]	Fire Resistant Properties of Alumino Silicate Geopolymer cement Mortars. (India)	P: FA, GGBS, SF y Arcilla Calcinada (Calcined Clay) (CC) SA: NaOH, Na ₂ SiO ₃	Relaciones: Arena/FA=3 SA/FA=0.6 Na ₂ SiO ₃ /NaOH= 2 C(NaOH)= 14M Dimensiones de los especímenes: Cubos de 75 x 75 x 75mm Precurado: 2 h a 80°C Curado: 2 h a 80°C (en horno convencional o en horno de microondas)	• f'c • Resistencia al fuego (empleando horno de mufla a 600, 800 y 1000°C)	La mezcla-1 (100%FA) alcanzó una f'c 36.7 MPa y 38.5 MPa después de ser curada en horno convencional y en microondas, respectivamente. Después de ser expuestos a 600, 800 y 1000°C, los cubos de mezcla-1 perdieron el 3.51, 12.3 y 13.2% de su peso, respectivamente. El comportamiento de su f'c fue variante ya que incremento al ser expuesto a 600°C (41.8 MPa) y redujo abruptamente ante 800 y 1000°C (12.8, y 8.32 MPa, respectivamente).
2017 [30]	Effect of Partial Replacement of Fly Ash by Metakaolin on Strength Development of Fly Ash Based Geopolymer Mortar. (Malasia)	P: FA (clase F y clase C), MK SA: NaOH, Na ₂ SiO ₃	Relaciones: Arena/FA=0.5 SA/FA=0.45 Na ₂ SiO ₃ /NaOH= 2. C (NaOH)= 8M Dimensiones de los especímenes: Cubos de 50 x 50 x 50mm Precurado: 24 h a temperatura ambiente. Curado: Después de desmoldar y envolver en plástico, 24 h a 60°C	• f'c	El mortero MF (100% FA Clase F) presentó una f'c de 55.95 MPa, inmediatamente después de completar el curado. La incorporación de MK aumentó la f'c de los morteros con FA clase F, pero redujo la f'c de aquellos con clase C cuando se sustituyeron 5 y 10%.

FECHA [REFERENCIA]	TÍTULO DEL ARTÍCULO (PAÍS)	MATERIALES	CONDICIONES DE EXPERIMENTACIÓN	PRUEBAS REALIZADAS	RESULTADOS Y CONCLUSIONES DE INTERÉS PARA EL P.I.
2017 [31]	Effect of aggregate properties on the mechanical and absorption characteristics of geopolymer mortar. (Turquía)	P: FA SA: NaOH, Na ₂ SiO ₃	Arena: Natural de río Triturada de Caliza Combinada (50:50) Graduaciones: 0-4, 2-4, 1-2, 0-1. Relaciones: SA/FA=0.5 Na ₂ SiO ₃ /NaOH= 2.5. C (NaOH)= 12M Dimensiones de los especímenes: Cubos de 50 x 50 x 50mm Curado: 24 h a 90°C	•Trabajabilidad •Peso Unitario •f _c •RT _{CD} •Absorción •Capilaridad	La arena natural presentó la mejor fluidez, mientras que la triturada presentó la menor; a pesar de eso todas las muestras se encontraron en un rango rígido o muy rígido. El mayor peso unitario fresco lo presentó un mortero con arena natural con un valor superior a los 2200 kg/m ³ , y el menor fue seco a 2150 kg/m ³ alcanzado por un mortero con arena triturada. La graduación 2-4 presentó los mayores valores relativos de f _c para los 3 tipos de arena: ≈47MPa (Triturada), 45 MPa (Combinada) y ≈ 40 MPa (Natural). Lo mismo sucedió para la RT _{CD} : 6.9MPa (Triturada), 6.7 MPa (Combinada) y 6.6 MPa (Natural). Tanto la capilaridad como la absorción fue mayor en los morteros con graduación 0-1 y los respectivos valores fueron: >0.026 mm/min ^{0.5} y ≈ 11% (Natural); > 0.025 mm/min ^{0.5} y ≈9.5% (Triturada); y >0.023 mm/min ^{0.5} y 9% (Combinada)
2018 [32]	Influence of alkali solutions on properties of pond fly ash-based geopolymer mortar cured under different conditions. (India)	P: FA SA: NaOH, KOH, Na ₂ SiO ₃ , Li ₂ SiO ₃	Relaciones: Arena/FA=3 SA/FA=0.6 (Na ₂ SiO ₃ o Li ₂ SiO ₃)/ (NaOH o KOH) = 2 C (NaOH o KOH)= 8, 10, 12 y 14M Dimensiones de los especímenes: Cubos de 75 x 75 x 75mm Precurado: 30 min. a 80°C Curado: 4, 8 o 12 h a 80°C (Horno convencional), o de 10, 20, 30, 40, 50 o 60 min. (Horno de microondas)	• f _c	Conforme incrementa la C (NaOH o KOH) y el tiempo de curado en horno convencional la resistencia de los morteros es mayor siendo la mezcla 12 (KOH+Na ₂ SiO ₃) la que alcanzó mayor f _c =40.6 MPa a las 12 h de curado en horno, y 42.4 MPa a partir de los 50 min en el microondas. Si bien la incorporación de Li ₂ SiO ₃ no representa un cambio considerable en la resistencia de los morteros, el uso de KOH si lo hace.

FECHA [REFERENCIA]	TÍTULO DEL ARTÍCULO (País)	MATERIALES	CONDICIONES DE EXPERIMENTACIÓN	PRUEBAS REALIZADAS	RESULTADOS Y CONCLUSIONES DE INTERÉS PARA EL P.I.
2018 [33]	An experimental study on factors influencing the compressive strength of geopolymer mortar. (India)	P: FA SA: NaOH, Na ₂ SiO ₃	Relaciones: Arena/FA=1 SA/FA=0.5 Na ₂ SiO ₃ /NaOH= 2.5. C (NaOH)= de 8 a 16M Dimensiones de los especímenes: Cubos de 70.6 x 70.6 x 70.6mm Precurado: 24 h a alta temperatura. Te.C.: entre 40 y 90°C Ti.C: de 24 a 96 h Edad de ensayo: 3 y 7 días	• f'c	Al incrementar la C (NaOH) de 8 a 16M la f'c incrementó alrededor de un 80% para especímenes ensayados a los 3 y 7 días, curados a 75°C. De C (NaOH)= 8M a 10M la f'c incrementó entre 50 y 60 %. Al incrementar Te.C. de 40 a 90°C la f'c incremento 285% de 10.4 a 40MPa a los 7 días. Se mantuvo constante la C (NaOH)=10M y Ti.C.= 48h. Si Ti.C. aumenta de 24 a 94 h, f'c incrementa un 137% (11.49 a 27.2 MPa) y 115% (13.98 a 30.1 MPa) para 3 y 7 días respectivamente. En el primer incremento de 24 a 48 h de cuando se incrementó un 91% de la f'c en los 2 casos.
2019 [34]	Material properties, processing & characterization of fly ash based geopolymer. (India)	P: FA [Procesada: P (tamaño uniforme de 75μ) y No Procesada NP] SA: NaOH, Na ₂ SiO ₃	Relaciones: Arena/FA=3 SA/FA=0.55 Na ₂ SiO ₃ /NaOH= 1.5. C (NaOH)= 2M Dimensiones de los especímenes: Cubos de 70.7 x 70.7 x 70.7 mm Curado; sin información.	•Trabajabilidad • f'c •DRX •SEM •EDS •Escaneo Diferencial de Calorimetría (DSC)	Los morteros con FA-P y FA-NP presentaron flujos de 120 y 105%, y f'c a los 28 días de 18.12 y 12.12 MPa, respectivamente. Los análisis DRX, SEM-EDS, DSC demostraron que en los morteros aparecen elementos y/o minerales característicos de los geopolímeros los cuales permitirán incrementar las propiedades mecánicas de los concretos geopoliméricos.
2019 [2]	Thermo-mechanical characteristics of geopolymer mortar. (India)	P: FA, GGBS SA: NaOH, Na ₂ SiO ₃	Relaciones: Arena/FA=3 SA/FA=0.45 Na ₂ SiO ₃ /NaOH= 2.5. C (NaOH)= 8, 10, 12 y 14M Sustitución de FA por GGBS: 0 a 40% en Δ10% Dimensiones de los especímenes: Cubos de 70.6 x 70.6 x 70.6mm Precurado: 24 h a 60, 70, 80, 90 o 100°C Curado: 35±2°C hasta 3, 7 o 28 días de edad.	•Tiempo de Fraguado •Densidad a granel • f'c • f'c después de exposición al fuego. •DRX •SEM	En la mezcla M1 (100% FA) el tiempo inicial de fraguado fue de 140 a 216 min conforme aumentó la C (NaOH) de 8 a 14M, con tiempos finales de fraguado de 205 y 291 min. respectivamente. La densidad a granel de M1 a los 28 días fue de 1883 kg/m ³ , siendo este el menor valor. Los mayores valores de f'c para M1 se alcanzaron cuando la Te.C. fue de 90°C, pero en específico la f'c máxima se alcanzó con una C (NaOH)= 12M, en morteros de 28 días ya sea curados en horno o a temperatura ambiente. Al exponerse a temperaturas de 200 a 1000°C los morteros M1 perdieron el 15% de su masa. Así mismo la f'c reduce en aproximadamente 60%.

FECHA [REFERENCIA]	TÍTULO DEL ARTÍCULO (PAÍS)	MATERIALES	CONDICIONES DE EXPERIMENTACIÓN	PRUEBAS REALIZADAS	RESULTADOS Y CONCLUSIONES DE INTERÉS PARA EL P.I.
2019 [35]	Synthesis and Characteristics of Local Fly Ash Based Geopolymers Mixed with Natural Aggregates. (Rumanía)	P: FA SA: NaOH, Na ₂ SiO ₃	Relaciones: Arena/FA=2.33 SA/FA=0.67. Na ₂ SiO ₃ /NaOH= 1.5. C (NaOH)= 10M Dimensiones de los especímenes: Cubos de 50 x 50 x 50 mm Vigas de 40 x 40 x 160 mm Precurado: 8 h a 70°C Curado: 35±2°C hasta 7, 28 o 56 días de edad.	• f'c •MR •SEM •EDS	Del análisis microestructural se aprecian varias partículas sin reaccionar que afectan las características mecánicas de los morteros. Las f'c fueron 12.36, 20.30 y 24.8 MPa, para 7, 28 y 56 días, respectivamente. En ese mismo orden la MR incrementó de la siguiente forma: 5.68, 7.06 y 9.89 MPa.
2020 [36]	Mechanical properties of class C and F fly ash geopolymer mortars. (Turquía)	P: FA (clase F y clase C) SA: NaOH, Na ₂ SiO ₃	Relaciones: Arena/FA=2.61 Na ₂ O/SiO ₂ =0.2 Agua/FA=0.35 Dimensiones de los especímenes: Vigas de 40 x 40 x 160 mm Precurado: 48 h a 50 - 100 °C Curado: ±22°C durante 3, 7, 14, 28, 90, 180 y 360 días.	•Trabajabilidad •Peso Unitario •Absorción •Porosidad • f'c •MR •Velocidad de Pulso Ultrasónico (UPV)	El flujo de los morteros con FA-clase F fue de 122mm. Mientras que sus pesos unitarios variaron entre 1.57 y 2.05 g/cm ³ fue relativamente constante sin importar la temperatura del precurado. La absorción varió entre 0.39 % y 6.91 %, y el rango de porosidad fue de 0.68 % a 13.15 % con incrementos conforme aumentaba la temperatura de precurado y reducciones particulares al aumentar el tiempo de curado. Los valores de f'c pasó de un rango entre 3.21 y 48.96 MPa (3 días) a 28.75 y 56.44 MPa (360 días). Comportamiento que se presentó de igual forma en los valores de MR. A mayor edad de los especímenes y temperatura de precurado, los morteros presentaron una mayor UPV que significa una menor cantidad de espacios vacíos en su interior.

FECHA [REFERENCIA]	TÍTULO DEL ARTÍCULO (PAÍS)	MATERIALES	CONDICIONES DE EXPERIMENTACIÓN	PRUEBAS REALIZADAS	RESULTADOS Y CONCLUSIONES DE INTERÉS PARA EL P.I.
2020 [37]	Experimental Investigations on Fly Ash Geopolymer Mortar. (India)	P: FA SA: NaOH, Na ₂ SiO ₃	Relaciones: Arena/FA=3 SA/FA=0.4, 0.45, 0.5, 0.6 y 0.7 Na ₂ SiO ₃ /NaOH= 2.5. C (NaOH)= 8, 10, 12, 14, 16 y 18M Dimensiones de los especímenes: Cubos de 70.5 x 70.5 x 70.5 mm Precurado: 1.- con calor: 24 h a 70°C 2.- 24 h a temperatura ambiente. Curado: temperatura ambiente hasta su ensaye.	• f'c • SEM	Al modificar a C (NaOH) de 8 hasta 14M se mejoró la f'c, debido a la mayor cantidad de NaOH, pero de 14 a 18M, la RC redujo por la alta viscosidad de la SA. Al incrementar SA/FA de 0.4 a 0.6 se aumentó un 43% de la f'c. Pero para 0.7 f'c tuvo una reducción. Los valores de f'c aumentan conforme incrementa la edad de los especímenes. Los morteros con precurado 1 alcanzaron f'c de casi el doble que los expuestos a precurado 2, en todas las edades de prueba. En todas las modificaciones antes mencionadas los valores de f'c aumentan conforme incrementa la edad de los especímenes. Del SEM se concluyó que al aumentar la relación SA/FA se generan una matriz más densa y compacta.

2.3.- Marco teórico.

2.3.1.- Geopolímeros.

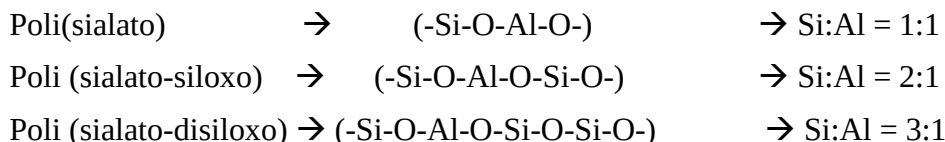
2.3.1.1.- Definiciones

Durante la década de 1950, en búsqueda de una alternativa para implementar dentro de los procesos de construcción de la extinta Unión Soviética, el científico ucraniano Victor Glukhovsky desarrolló ciertos aglutinantes basados en la activación alcalina de materiales con elevados contenidos de aluminosilicatos, a los que denominó como “soil cements” (Cementos de Suelo) [38]. Posteriormente en Francia durante los años 70s, el Dr. Joseph Davidovits, de origen australiano, acuñó el término Geopolímeros, el cual se utiliza para hacer referencia a materiales sólidos producto de la síntesis de agentes precursores (polvo rico en aluminosilicatos) y soluciones alcalinas [39]. El silicato y el hidróxido ya sean de sodio o de potasio son los agentes alcalinos más usados; mientras que entre los materiales más empleados como agentes precursores tenemos arcillas calcinadas (metacaolín), escorias siderúrgicas y cenizas volantes [40], sin embargo no son los únicos materiales con dichas características y en el campo científico se han analizado las posibilidades de producir geopolímeros a base de ceniza de cascara de arroz, humo de sílice, tierras diatomeas gastadas y puzolanas naturales [41].

2.3.1.2.- Proceso de síntesis.

El proceso de síntesis de dichos materiales ha sido objeto de estudio iniciando con un mecanismo modelado por Glukhovsky que constaba de tan solo 3 etapas que son: i) destrucción-coagulación, ii) coagulación-condensación y iii) condensación-cristalización; conforme se ha estudiado las teorías de Glukhovsky y se ha recabado mayor información con respecto a la síntesis de la zeolita se ha legado a describir el proceso de geopolimerización siguiendo distintos modelos, entre ellos podemos encontrar uno conformado por 5 etapas, la primera de ella conocida como disolución en la cual el aluminosilicato (material precursor) entra en contacto con la solución activadora (solución alcalina) y los enlaces existentes entre en su fases vítreas son diluidos, generándose aluminatos y silicatos dentro de la fase acuosa de la mezcla. En seguida los silicatos que la solución activadora contiene participan en un equilibrio de dichas especies al interior de la fase líquida, conocida como fase de equilibrio de especies [42]. Posteriormente en la gelación, se cuenta con las especies reactivas Si^{4+} y Al^{3+} , las cuales comienzan a formar núcleos y oligómeros de aluminosilicatos con coordinación cuádruple con átomos de oxígeno (SiO_4 y AlO_4), dando lugar a la fase de nucleación o reorganización. Por último acontece la etapa de polimerización y endurecimiento en la cual se sintetiza un aluminosilicato artificial, el cual en su composición contiene estructuras tridimensionales [42; 43].

Los oligómeros que se generan en el proceso, forman cadenas de poli-sialatos, donde sialatos es empleado para abreviar un silicato-oxo-aluminato, y el tamaño y nombre de la cadena formada depende de la cantidad de silicatos que existe por cada aluminato dentro del gel formado, los cuales se determinan de la siguiente manera:



Para poder mitigar la carga negativa presentes en las uniones antes mencionadas es necesaria la presencia de un catión tal como potasio, sodio o calcio, entre otros [44].

Las estructuras tridimensionales semicristalinas y amorfas que se producen en el proceso antes mencionado tienen como fórmula empírica [45]:

$$M_n[(-Si - O_2)_z - Al - O_2]_n \cdot wH_2O \quad (1)$$

Donde:

M = Metal alcalino empleado en para su activación (Na, K, Li, etc.)

n = grado de polimerización

z = relación Si/Al presentes en el geopolímero

w = contenido de agua.

Recientemente se le ha conocido a los geopolímeros como un subconjunto de los materiales activados alcalinamente (MAA), siendo estos últimos materiales sólidos y estables, producto de la activación de precursores por medio de hidróxidos y/o silicatos alcalinos. De acuerdo a los orígenes del material precursor especialmente su contenido de óxidos de calcio, y los principales productos de su reacción, los MAA se dividen en 3 tipos, el primero con elevado contenido de CaO, como la escoria de alto horno; el segundo con bajos contenido de calcio, como las cenizas volantes tipo F, metacaolín, entre otros; y un tercer tipo que consta de una combinación de los 2 primeros. Los geopolímeros son considerados MAA del tipo 2 debido a que sus principales productos de reacción son polímeros tridimensionales inorgánicos alcalinos, hidrato de aluminosilicato sódico o potásico (N-A-S-H o K-A-S-H, respectivamente), son consideran como precursores de la zeolita; por otra parte los MAA tipo 1 generan hidrato de aluminosilicato cálcico (C-A-S-H) como su principal producto de reacción, y como los MAA del tipo 3 se trata de una combinación de precursores de los 2 tipos es posible la presencia simultánea los geles N-A-S-H, K-A-S-H, y C-A-S-H [42].

2.3.2.- Agente precursor: Ceniza Volante.

2.3.2.1.- Definición.

Este subproducto de la generación de energía eléctrica en las centrales termoeléctricas abastecidas con carbón triturado para su funcionamiento, son los elementos sólidos que acompañan a los gases de combustión, son captados por medios mecánicos o precipitados por sistemas electrostáticos [46], sus principales componentes químicos están presentes en forma de óxidos amorfos y cristalinos o bien formando parte de algún diversos minerales y son SiO₂, Al₂O₃, CaO y Fe₂O₃ [43].

2.3.2.2.- Clasificación

De acuerdo a la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (por sus siglas en inglés ASTM) las cenizas volantes se clasifican en Clase F y Clase C, de acuerdo al contenido de óxidos que la ceniza presente, en ambas clases se busca que el contenido de trióxido de sulfuro no sea mayor al 5%, que el contenido de humedad sea del 3% como máximo y de álcalis no mayor al 1.5% [47].

Clase F.

Es un tipo de ceniza con características puzolánicas, las cuales son productos de la combustión de carbón bituminoso y antracita, y que además cumple con los requisitos de que la suma de SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3 sea mínimamente igual al 70% [47].

Clase C.

Este tipo de ceniza posee características tanto cementicias como puzolánicas, son producto de la combustión de carbón sub-bituminoso y lignito, para ser considerada de esta clase, la ceniza debe cumplir con el requisito de que la suma de SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3 sea al menos del 50%. En ocasiones el contenido de las cenizas volantes de clase C presenta un contenido de CaO mayor al 10% [47].

2.3.2.3.- Características Físicas.

Color.

El color que la ceniza volante presenta puede variar en una escala de grises dependiendo del contenido de Fe_2O_3 [48].

Granulometría.

Para la determinación de la granulometría de las cenizas volantes se hace uso de un granulómetro de rayo láser. Esta característica física depende tanto de los procesos de molienda por los que pasa el carbón antes de empleado, como de los mecanismos de captación y ciertos procesos térmicos por los cuales pasa la ceniza. El tamaño de las partículas es menor a $250\mu\text{m}$ y se han encontrado partículas de hasta $1\mu\text{m}$, pero entre el 60 y 90% son partículas de tamaño menor a $75\mu\text{m}$ [48; 49].

Finura.

Empleando el criterio de la cantidad de material retenido por el tamiz con tamaño de apertura de $45\mu\text{m}$, de las cenizas clase F se retiene un 17.5%, mientras que de las cenizas de clase C el porcentaje retenido es de 19.7% [50].

Superficie Específica.

De acuerdo al tipo de sistema empleado para la recolección de la ceniza volante es posible encontrar variaciones en el rango superficie específica, por ejemplo, de 4,000 a 7,000 cm²/g en precipitadores electrostáticos, de 1,500 a 2,000 cm²/g en captadores mecánicos, mientras que en los sistemas un tanto más sofisticado la superficie específica llega a ser mayor que 10,000 cm²/g [49; 51].

Forma de la partícula.

Al realizar un análisis de la forma de las partículas de la ceniza volante es posible distinguir que en su mayoría está conformada por partículas esféricas con cierta variedad de formas e imperfecciones [49], entre las variaciones se distinguen las cenosferas, que son partículas esféricas macizas o huecas (estas se forman al atrapar gases dentro de una cubierta de material fundido), y las plerosferas, son iguales a una cenosfera hueca que en su interior contiene esferas de menor tamaño [52].

Densidad.

La densidad de la ceniza volante es una característica física que puede ser modificada mediante la implementación de una etapa de molienda y el resultado varía según el tipo y tiempo de molienda, así mismo, existe variación en las densidades de distintas cenizas volantes debido a la predominancia de las distintas formas de partículas, por ejemplo, será mucho más densa una ceniza donde se presenten en su mayoría cenosferas macizas, que aquella en la que las partículas predominantes sean completamente huecas. De manera general la densidad de la ceniza volante es de entre 1.88 y 2.84 g/cm³ [49].

2.3.3.- Solución Activadora.

Se ha demostrado que los agentes más usuales como parte de la solución activadora de un aluminosilicato para la formación de geopolímeros son el silicato de sodio y el hidróxido de sodio y de potasio, de los cuales han sido preferidos los dos primeros, dada su accesibilidad en el mercado y su bajo costo [53].

2.3.3.1.- Hidróxido de Sodio (NaOH).

De acuerdo a lo señalado en la Hoja Informativa sobre Sustancias Peligrosas, emitida por el Departamento de Salud y Seguridad de Nueva Jersey, EE.UU., el hidróxido de sodio, también conocido como sosa caustica, hidrato de sodio o lejía, es un material sólido que es empleado en diversas industrias para la fabricación de papel, pulpa, textiles, celofán, detergentes, jabones, galvanoplastias, etc. Es un sólido de color blanco, inodoro e higroscópico (absorbe la humedad del medio ambiente). El NaOH es una sustancia manufacturada al ser subproducto de la elaboración del cloro. La reacción exotérmica (que genera calor) que el NaOH produce al ser disuelto en agua o bien neutralizado por un ácido, es tan fuerte que puede ser el estímulo de ignición para un material combustible. Además es un sólido altamente corrosivo. Al entrar en contacto con el agua, o con la propia humedad del suelo, el

hidróxido de sodio comienza a degradarse en cationes de sodio y aniones de hidrógeno, reduciendo el pH del agua. Su empleo es llevado a cabo comúnmente en forma sólida ya sea en gránulos u hojuelas con purezas entre el 96 y 98% (lo cual hace variar su precio en el mercado), o bien en una solución de 50%. Para ser empleado como parte de la solución alcalina activadora de un geopolímero se recomienda su disolución previa al menos 24 horas antes de ser utilizado. [54; 55].

2.3.3.1.- Silicato de Sodio (Na_2SiO_3).

Cuando el silicato de sodio se presenta en forma líquida (waterglass) se trata de una solución que es manufacturada mediante la variación de óxido de sodio (Na_2O) y óxido de silicio (SiO_2). Para su elaboración se requiere de la fundición de carbonato de sodio (Na_2CO_3) y arena silícea, dando como resultado un cristal de características amorfas, el cual es posteriormente disuelto generando una solución alcalina. Las soluciones de Na_2SiO_3 deben encontrarse dentro del rango de $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ entre 1.6 y 3.5. Para los fines de su aplicación como agente de la solución alcalina activadora se recomienda que la relación de $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ se encuentre entre 2 y 2.5 [54; 56].

2.3.4.- Prefabricación.

Hablar de prefabricación en la construcción se hace referencia a aquellos elementos y componentes que son diseñados y elaborados en serie en un lugar distinto al de ubicación final, buscando de esta manera reducir los desperdicios de material producidos en obra y además volver más eficiente los trabajos en campo.

De manera puntual las piezas de mampostería como los bloques, ladrillos y tabicones, representan unos de los principales elementos prefabricados que se han implementado a lo largo de la historia en la industria de la construcción dada su practicidad y sus excelentes características de interés para los edificadores, los materiales que se emplean para su elaboración son, en entre otros silicato de calcio y concreto, pero las arcillas son las más usuales [57].

2.3.5.- Envoltente.

La envoltente de una edificación es el separador físico entre el entorno acondicionado y desacondicionado de una construcción, que incluye la resistencia al aire, agua, calor, luz y transferencia de ruido [58].

2.3.6.- Métodos de Caracterización.

Para evaluar las características las distintas mezclas que se elaborarán se emplearán análisis dinámicos y estáticos, que si bien han sido diseñados originalmente para evaluar propiedades de especímenes de concreto hidráulico, los procedimientos servirán de pauta para los objetivos de esta investigación. En el caso de los análisis dinámicos, se distinguen por no destruir los especímenes, permitiendo así su posterior uso o su permanencia durante esta la fase; por otra parte, al hacer referencia a los métodos estáticos para la caracterización de los materiales, se habla de aquellas pruebas en las cuales los especímenes son destruidos.

2.3.6.1.- Análisis Dinámicos.

Método de Frecuencias fundamentales de resonancia por impacto.

Este método tiene como finalidad el conocer con cierta exactitud el módulo de elasticidad de un material a partir de la frecuencia natural de vibración de un cuerpo de prueba y sus características físicas y geométricas. El espécimen es excitado mediante el choque de un martillo con una masa de impacto adecuada al tamaño de la muestra a evaluar, la excitación provocada por el impacto generará una onda de esfuerzo la cual será captada por un acelerómetro, las posiciones tanto del acelerómetro como del punto de impacto varían dependiendo de cuál de los tres modos de prueba se esté efectuando, modo longitudinal, transversal o torsional, donde las dos primeras permiten conocer el módulo de elasticidad y la última es empleada para evaluar el módulo de rigidez y el coeficiente de Poisson. Los acomodos de los distintos elementos del sistema de prueba para los diferentes modos de excitación se presentan en la Figura 1. La información que es detectada por el acelerómetro se registra en función del tiempo de la vibración, posteriormente, haciendo uso de la transformada rápida de Fourier se logra hacer una conversión a términos de frecuencia de resonancia natural del espécimen. El pico más alto en la gráfica representa la frecuencia de resonancia natural del material probado, pero se deben consideraciones y además mediante la práctica se genera experiencia que permite detectar casos de perturbación que arrojen valores inciertos. En resumen el método se puede dividir en dos grandes etapas, la primera de ellas consistente en generar la vibración del espécimen y determinar la resonancia, mientras que la segunda parte incluye el uso de un sistema de cómputo y una serie de cálculos matemáticos que permiten conocer los módulos de interés [59].

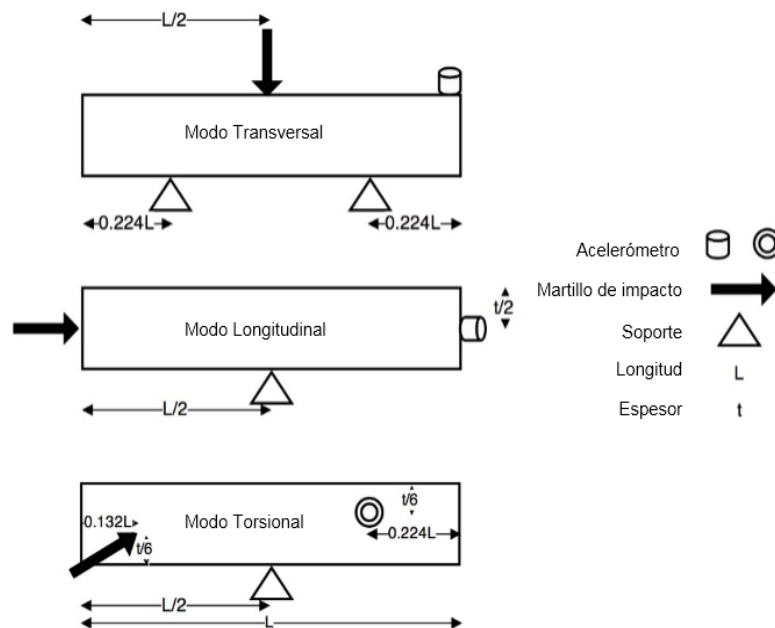


Figura 1. Configuración de la muestra para los modos de prueba Transversal, Longitudinal y Torsional, Adaptado de ASTM C215.

De acuerdo al modo de en qué se lleve a cabo la lectura de la frecuencia fundamental de vibración del espécimen se puede conocer el módulo de elasticidad dinámico (módulo de Young dinámico) (E_d) o el módulo de rigidez (G_d), aplicando las siguientes ecuaciones:

Para el E_d determinado con base en la configuración transversal la ecuación es:

$$E_d = CMn^2 \quad (2)$$

Donde:

E_d = Módulo de elasticidad dinámico en pascales.

M = Masa del espécimen, kg.

n = Frecuencia transversal fundamental, Hz.

C = Factor de forma, m^{-1} .

Para el caso de implementar la frecuencia longitudinal fundamental, la ecuación empleada será:

$$E_d = DM(n')^2 \quad (3)$$

Donde:

M = Masa del espécimen, kg.

n' = Frecuencia longitudinal fundamental, Hz.

D = Factor de forma, m^{-1} .

Si lo que se desea conocer es G_d se deberá realizar por medio de la siguiente ecuación:

$$G_d = BM(n'')^2 \quad (4)$$

Donde:

M = Masa del espécimen, kg.

n'' = Frecuencia torsional fundamental, Hz.

$B = (4LR/A)$, m^{-1} .

R = Factor de forma.

L = Longitud del espécimen, m.

A = Área de la sección transversal del espécimen, m^2 .

Determinación de la variación de longitud de especímenes.

Al ser expuesto a condiciones en las que el medio ambiente presenta una menor humedad que el espécimen analizado, éste por medio de la evaporación del agua alojada en sus poros buscará alcanzar un equilibrio de humedad, generando así una reducción de su longitud.

Para este análisis de características dinámicas se emplean especímenes que han alcanzado el punto de fraguado, posteriormente se exponen a condiciones de temperatura y humedad ambientales. Para determinar la variación en su longitud es necesario conocer la longitud inicial del espécimen y compararlo objeto que presente una longitud constante, para esto se hace uso de un dispositivo que consta de una base firme a la cual está sujeto un apoyo inferior, sobre dicho apoyo se coloca una vara calibradora la cual mantiene la longitud específica son variar con respecto a la temperatura, en la parte superior y apoyado sobre el extremo de la vara se ubica un apoyo superior que permite sujetar el objeto medido y además, por estar conectado a un micrómetro se puede determinar las longitudes de los especímenes mediante la diferencia que exista entre la lectura de calibración y el espécimen en estudio. Para cada espécimen se registra una lectura inicial (L_i), la cual es la diferencia que existe entre la longitud para la cual se ha calibrado el dispositivo (G) y la longitud real del espécimen, esto se efectúa posicionando la vara calibradora entre los dos apoyos, enseguida se registra el valor indicado en el micrómetro (o de ser posible se coloca el indicador en ceros) acto seguido se retira la vara calibradora y coloca el espécimen a medir, finalmente se calcula la diferencia entre el registro de calibración (o el cero) y el valor indicado en el micrómetro; posteriormente dicho procedimiento se repite para cada una de las lecturas que se desee realizar al espécimen (L_x). La ecuación 5 presenta el cálculo a seguir para conocer el cambio de longitud de un espécimen a cualquier edad:

$$L = \frac{L_x - L_i}{G} * 100 \quad (5)$$

Donde:

L = Cambio de longitud a la edad x , %.

L_x = Lectura de longitud a la edad x después de calibrar el micrómetro, mm.

L_i = Lectura inicial después de calibrar el micrómetro, mm.

G = Largo nominal de la barra calibradora, mm.

Como resultado de este análisis se realiza una comparación del porcentaje de contracción – tiempo [60].

2.3.6.2.- *Análisis Estáticos.*

Determinación de la resistencia a la flexión.

Para conocer la resistencia a la flexión de un mortero se emplea una viga simple de 40x40x160 mm elaborada con un mortero con relación arena/cementante de 2.75 en moldes donde el eje longitudinal de las vigas se encuentre horizontal. Después de su etapa de curado la viga es desmoldada y dispuesta a ser ensayada, para esto se coloca con su eje longitudinal en posición horizontal y manteniendo los extremos se encuentran simplemente apoyados se aplica gradualmente una carga en el centro del claro, a la velocidad estipulada por la norma.

Se registra la carga máxima soportada por la viga, y se procede a calcular su Módulo de Ruptura o Resistencia a la flexión, al afectar a P por un factor de corrección:

$$MR = (P * L) / (b * d^2) \quad (6)$$

Donde:

MR = Módulo de Ruptura o Resistencia a Flexión, MPa.

P = Carga máxima aplicada, N.

L = Distancia entre los apoyos, mm.

b = Ancho promedio del espécimen, mm.

d = Peralte promedio del espécimen, mm.

El factor de variación aceptado para especímenes del mismo material y la misma edad ensayados en el mismo laboratorio es de 5.1%, mientras que para aquellos ensayados en distintos laboratorios es de 8.4% [61].

Determinación de la resistencia a la compresión.

Con la intención de facilitar los trabajos de investigación y aprovechar los trozos de viga generados en el ensayo antes mencionado para la determinación de la resistencia a flexión usando una viga de mortero los cuales poseen una sección transversal cuadrada, se desarrolló el ensayo de cubos equivalentes.

Para este ensayo se procede localizando verticalmente alineadas tanto por encima como por debajo de uno de los trozos de la viga, dos placas cuadradas con las mismas dimensiones que la sección transversal de la viga, asegurando así una aplicación de carga uniforme sobre una porción cubica del elemento ensayado. La presencia de las excedentes del cubo equivalente puede generar un incremento en el resultado es por ello que se deben aplicar ciertos factores para corregir dicho aumento.

Se registra la carga máxima soportada por el cubo equivalente (P), y se procede a calcular su Resistencia a la compresión (f'_c) al afectar a P por un factor de corrección:

$$f'_c = P/A \quad (7)$$

Donde:

$f'c$ = Resistencia a la compresión, MPa.

P = Carga máxima aplicada, N.

A = Área expuesta a la carga, mm.

Si bien los valores arrojados por esta prueba no son sustitutos de aquellos que pudieran obtenerse empleando un método normalizado de ensayo para la determinación de su resistencia a la compresión, si pueden ser usados como referencia de la resistencia esperada. Debido a las partes sobresalientes que presenta el cubo equivalente se puede esperar que la resistencia a la compresión se vea favorecida hasta en un 5% en comparación con un cubo colado con las mismas dimensiones.

El factor de variación aceptado para especímenes del mismo material y la misma edad ensayados en el mismo laboratorio es de 3.5%, mientras que para aquellos ensayados en distintos laboratorios es de 6.3% [62].

2.4.- Marco legal.

La normalización para la eficiencia energética en edificios para uso habitacional representa un esfuerzo encaminado a mejorar el diseño térmico de edificios, y lograr la comodidad de sus ocupantes con el mínimo consumo de energía.

En México el acondicionamiento térmico de estas edificaciones repercute en gran medida en la demanda pico del sistema eléctrico, siendo mayor su impacto en las zonas norte y costeras del país, en donde es más común el uso de equipos de enfriamiento que el de calefacción.

En este sentido, en 2011 se aprueba la Norma Oficial Mexicana NOM-020-ENER-2011, Eficiencia energética en edificaciones. Envoltente de edificios para uso habitacional, la cual busca optimizar el diseño desde el punto de vista del comportamiento térmico de la envoltente, obteniéndose como beneficios, entre otros, el ahorro de energía por la disminución de la capacidad de los equipos de enfriamiento. Esta norma se apoya en la NOM-018-ENER que tiene por objeto establecer los métodos de prueba para evaluar la conductividad o resistencia térmica, densidad aparente, permeabilidad al vapor de agua, la adsorción de humedad y absorción de agua, que se indiquen en los materiales homogéneos que se comercialicen en el país con propiedades de aislantes térmicos.

Estas normas responden a la necesidad de incrementar el ahorro de energía y la preservación de los recursos energéticos a través de la utilización de mejores materiales, así como a la de proteger al consumidor, orientándole en la selección de los materiales que le ofrezcan la mejor alternativa para su necesidad de aislar térmicamente su edificación. En la tabla 3 se muestra el marco legal al que se circunscribe este proyecto de intervención.

Tabla 3 - Normativa aplicable al proyecto de intervención.

Clave	Descripción
<i>NOM-020-ENER</i>	Eficiencia energética en edificaciones. Envolvente de edificios para uso habitacional
<i>NOM-018-ENER</i>	Aislantes térmicos para edificaciones. Características y métodos de prueba.
<i>NMX-C-089</i>	Determinación de las frecuencias fundamentales, transversal, longitudinal y torsional de especímenes de concreto. – Método de ensayo
<i>NMX-C-303</i>	Determinación de la resistencia a la flexión usando una viga simple con carga en el centro del claro.
<i>NMX-C-235</i>	Determinación de la resistencia a la compresión empleando porciones de vigas ensayadas a flexión.
<i>NMX-C-263</i>	Concreto Hidráulico endurecido – Determinación de la Masa Específica, Absorción y Vacíos
<i>NMX-C-173</i>	Determinación de la variación de longitud de Especímenes de Cemento y de Concreto endurecidos.
<i>NMX-C-404</i>	Mampostería - Bloques, Tabiques o Ladrillos y Tabicones para uso estructural – Especificaciones y métodos de ensayo
<i>NMX-C-441</i>	Mampostería - Bloques, Tabiques o Ladrillos y Tabicones para uso no estructural – Especificaciones y métodos de ensayo
<i>NMX-C-189</i>	Determinación de la transmisión térmica (método de placa caliente aislada)

3.- Proyecto de Intervención.

3.1.- Hipótesis

Los elementos prefabricados con geopolímero base ceniza volante presentan características físicas que garantizan su potencial uso en envolventes de edificaciones térmica y mecánicamente eficientes.

3.2.- Objetivo (s) General (es).

Diseñar, fabricar y caracterizar piezas prefabricadas de geopolímeros base ceniza volante para su potencial uso en envolventes de edificaciones.

3.3.- Objetivos Específicos.

- Obtener y caracterizar la ceniza volante como agente precursor y los reactivos para la solución activadora.
- Diseñar y elaborar distintas mezclas de concreto geopolimérico.
- Diseñar y fabricar las piezas para las pruebas
- Realizar pruebas para determinar las propiedades mecánicas (resistencia a compresión, resistencia a flexión y módulo de elasticidad) de las piezas fabricadas.
- Realizar pruebas para determinar parámetros de durabilidad de las piezas fabricadas (absorción, densidad y porosidad).
- Realizar pruebas para determinar la contracción por secado de las piezas fabricadas.
- Realizar pruebas para determinar la conductividad térmica de las piezas fabricadas.
- Analizar y comparar resultados.
- Diseñar propuestas de implementación del material y evaluar el coeficiente global de transferencia de calor.
- Analizar y comparar resultados y proponer estrategias de implementación del diseño más eficiente.

3.4.- Justificación.

3.4.1.- Ambiental.

Hoy en día el concreto a base de cemento Portland es la segunda sustancia más empleada a nivel global, sólo después del agua, dicha importancia se ve reflejada en el crecimiento exponencial que presentan los países en desarrollo. La producción de cemento Portland es una de las industrias más contaminantes a nivel mundial representando un 5% de las emisiones de CO₂ al ambiente [63], dado que para su elaboración es necesario la explotación, carbonización y calcinación de distintos minerales como son la roca caliza, yeso, cal, entre otros. Por lo cual es considerado como una industria agresiva para el medio ambiente.

Por otra parte, dentro de los procesos de generación de energía eléctrica por medio del calor generado por la quema de combustibles fósiles en las centrales termoeléctricas, se han

implementados sistemas en las chimeneas de las calderas que permiten captar las partículas sólidas que acompañan a los gases productos de la combustión del carbón ya sea por medio de sistemas de precipitación electrostáticos o bien por medios mecánicos, lo cual es conocido como ceniza volante, dentro de la composición química de ambas clases de ceniza volante (clase F y C), se encuentran en diferente proporción algunos óxidos que les brindan propiedades puzolánicas (Clase F) o puzolánicas y cementicias. El problema de dicho material es que su velocidad de generación ha rebasado por mucho a su consumo generando una deficiencia en el control de su disposición, aunado a esto el contenido de algunos otros materiales altamente tóxicos dentro de su composición (como lo son Ti, V, Cr, Mn, CO, As, Sr, Mo, Pb y Hg, dioxinas, entre otros), han convertido a la ceniza volante en un material peligroso al cual durante décadas se le ha tratado de encontrar un uso adecuado y eficiente, ya que se ha convertido no solo en una amenaza debido a su ocupación de terreno de disposición sino que además es un agente que pone en riesgo la ecología y el medio ambiente [43].

3.4.2.- Científico-técnica.

Hablando en términos de avances tecnológicos y científicos Zhang entre otros, en el 2018 [64] , llevó a cabo una revisión de todos los estudios que hablan acerca de la implementación materiales alternativos para la elaboración de ladrillos, después de analizar el texto se puede apreciar que existe una total carencia de estudios de geopolímeros con fines aplicativos directos en la construcción por medio de elementos de mampostería, ya que únicamente se lograron detectar dos estudios realizados con elementos de dimensiones similares a las de un ladrillo tradicional elaborado con geopolímeros a base ceniza de cáscara de arroz [65] y otro a base de ceniza volante y arcilla [66]. En ese mismo documento se hace mención de las oportunidades que existe de desarrollar investigaciones relacionadas con el tema en base a las rutas de investigación que se presentan en la Figura 2.

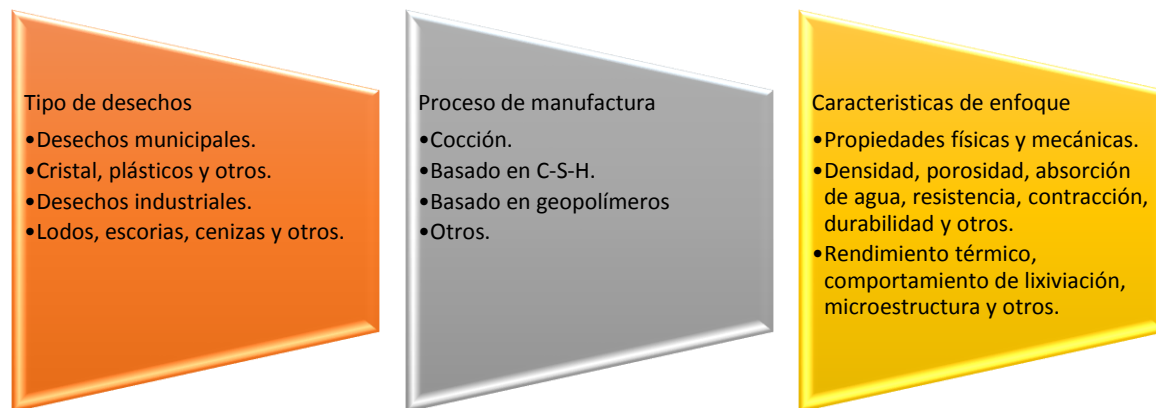


Figura 2. Ruta del desarrollo general de un estudio relacionado con ladrillos.

Siendo estos puntos recomendables al realizar la elección de un tema de investigación, y considerando que además en el artículo de Zhang se concluye que los geopolímeros son una

forma preferente de desarrollar ladrillos, se considera que el tema es algo viable al tener como finalidad el brindar conocimientos recientes en un área que a pesar de ser considerablemente explorada a nivel de laboratorio no se ha consolidado una aplicación tangible en el área de la construcción.

De manera conjunta, con éste proyecto de intervención se pretende realizar una doble mitigación de los daños generados al medio ambiente. Por un lado se busca reducir la cantidad de concreto tradicional empleado en la industria de la construcción, ofreciendo una opción en la cual no se requiera del uso de cemento Portland; dicha opción a su vez será benéfica para el medio ambiente dado que se le brindará un uso a la ceniza volante, que se encuentra depositada de forma poco controlada en las inmediaciones de las centrales termoeléctricas, mediante su implementación como agente precursor en la fabricación de concreto geopolimérico para su uso en la elaboración de piezas de mampostería para la construcción de muros.

Los resultados de este proyecto servirán como base para que los industriales del sector de la mampostería tengan datos técnicos del uso de concretos geopoliméricos en sus productos y así puedan brindar nuevas ofertas con un enfoque amigable con el ambiente y con el bolsillo del cliente.

De implementarse la utilización de geopolímeros en la elaboración de prefabricados para la construcción de muros como una alternativa general para la sustitución de los materiales tradicionales se verán beneficiados todos los habitantes del planeta ya que se logrará una reducción al impacto ambiental a nivel global por el menor consumo de recursos naturales, el menor consumo energético y la menor emisión del CO₂.

3.5.- Metodología.

3.5.1.- Materiales.

Como agente precursor para la geopolimerización se empleó ceniza volante (FA, por sus siglas en inglés) proveniente de la central termoeléctrica “José López Portillo” ubicada en Nava, Coahuila, México. Por medio de un análisis de Fluorescencia de Rayos X se determinó su composición química, la cual se presenta en porcentajes de peso en la Tabla 4, y que de acuerdo a la norma ASTM C618, cumple con los requisitos para considerarse una FA clase F. Su densidad es de 2.29g/cm³ y se determinó por picnometría. Empleando el método de absorción física de gas N₂ y haciendo uso del modelo Brunauer-Emmett-Teller se obtuvo su superficie específica que es de 975 m²/kg. Por último mediante una microscopía electrónica de barrido se determinó que está mayormente compuesta por partículas de diversos tamaños menores a 10µm y de geometrías esféricas, en la Figura 3 se presenta una imagen de su morfología.

Para preparar la solución activadora (SA) se utilizó Hidróxido de Sodio (NaOH) de grado reactivo analítico, en presentación de lentejas, de la marca Faga Lab, con una pureza de 99 - 100% y una densidad de 2.13 g/cm³. De la misma manera se empleó Silicato Sódico (Na₂SiO₃) marca SIGMA-ALDRICH, de grado reactivo, con una densidad de 1.39g/ml y una composición del 10% de Na₂O, 27% de SiO₂ y 63% de H₂O. Por último pero no menos importante se empleó agua destilada de alta pureza para la disolución de las lentejas de NaOH a las molaridades deseadas.

La arena que se utilizó para la realización de las mezclas fue arena de Ottawa que cumple con la norma ASTM C778, y cuya granulometría se presenta en la Tabla 5.

Tabla 4. Composición Química de FA.

Compuesto	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	TiO ₂	LOI
% por peso	56.9	26.24	5.56	4.25	0.72	1.21	0.346	0.71	1.21	2.47

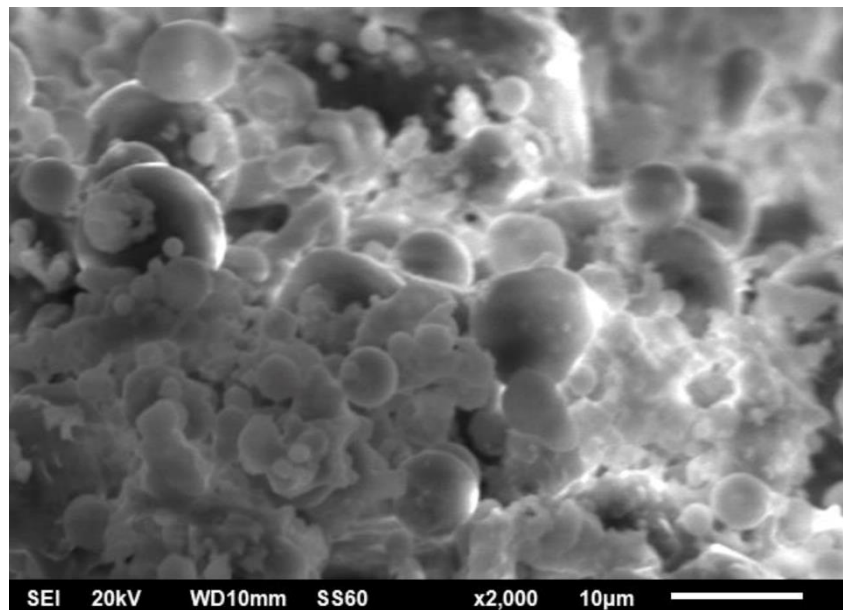


Figura 3. Morfología de FA.

Tabla 5. Granulometría de la Arena de Ottawa.

Tamiz	% que pasa el tamiz
1.18 mm (No. 16)	100
600 µm (No. 30)	96 a 100
425 µm (No. 40)	65 a 75
300 µm (No. 50)	20 a 30
150 µm (No. 100)	0 a 4

3.5.2.- Elaboración de especímenes.

Las primeras mezclas con ceniza volate como material precursor se hicieron conforme a las proporciones de la Tabla 6, donde además de variar la relación SA/FA, se emplearon 2 molaridades distintas de NaOH: 8 y 10 M.

Tabla 6. Proporciones de mezclas preliminares

Nomenclatura	Relación SA/FA	Relación Arena/FA	FA (partes)	SA (partes)	Na ₂ SiO ₃	NaOH	Pre-curado	Curado
FA58	0.50	2.75	1	0.50	55%	45% (8M)	24 horas, 80±2°C, 100% HR	24 horas en CDL.
FA610	0.60			0.60		45% (10M)		

FA: Fly Ash (Ceniza Volante). SA: Solución Activadora. Na₂SiO₃: Silicato de sodio. NaOH: Hidróxido de sodio. HR: Humedad Relativa. CDL: Condiciones De Laboratorio

Para la fabricación de los especímenes se siguió el procedimiento que a continuación se describe, empleando 500 g de ceniza volante para cada mezcla así como sus respectivas cantidades de arena y sustancias activadoras:

1. Se pesaron el material precursor (FA), la arena de Ottawa y se depositaron, en dos probetas plásticas, el NaOH con cada una de las molaridades y el Na₂SiO₃ correspondiente.
2. Se saturó la arena sumergiéndola durante 20 minutos en agua potable, posteriormente se decantó el excedente de agua y se procedió a secarla con aire caliente hasta alcanzar su estado saturado superficialmente seco (Figura 4).



Figura 4. Secado de arena usando aire caliente.

3. Se procedió al mezclado manual simultáneo durante 5 minutos de arena- Na_2SiO_3 (Figura 5) y FA- NaOH (Figura 6).



Figura 5. Mezcla de arena- Na_2SiO_3 .



Figura 6. Mezcla de FA- NaOH .

4. Se depositó la mezcla de arena- Na_2SiO_3 dentro del recipiente que contenía la mezcla FA- NaOH y se mezcló manualmente durante 5 minutos más (Figura 7).

Una vez finalizada la elaboración de las mezclas, se procedió a la fabricación de los especímenes para esto se colocó el material en 2 capas dentro de los moldes y se compactó con la ayuda de una prisma rectangular de acrílico, como se muestra en la Figura 8.



Figura 7. Mezcla de FA-NaOH y Arena-Na₂SiO₃.



Figura 8. Colado y compactado de la mezcla.

Para llevar a cabo el precurado, el molde se colocó en un recipiente al cual se le añadió agua y posteriormente se selló con una película de papel plástico y se introdujo al horno durante 24 horas a una temperatura de $80 \pm 2^\circ\text{C}$ (Figura 9).

Transcurrido el periodo de precurado se desmoldaron los especímenes y se observó que las probetas presentaban características aceptables para dar continuidad a la elaboración de las mezclas subsecuentes. Se optó por trabajar con seis mezclas en un rango de relación SA/FA de 0.5 a 0.6 con incrementos de 0.05 y variaciones de la concentración molar del NaOH de 8 y 10M como en las mezclas preliminares, teniendo como resultado la matriz experimental que se presenta en la Tabla 7.



Figura 9. Comienzo de la fase de
 precurado.

Tabla 7 - Matriz experimental con geopolímeros base ceniza volante

Nomenclatura	Relación SA/FA	Relación Arena/FA	FA (partes)	SA (partes)	Na ₂ SiO ₃	NaOH	Pre-curado	Curado
FA58	0.50	2.75	1	0.50	55%	45% (8M)	24 horas, 80±2°C, 100% HR	24 horas en CDL.
FA510	0.50	2.75	1	0.50	55%	45% (10M)		
FA558	0.55	2.75	1	0.55	55%	45% (8M)		
FA5510	0.55	2.75	1	0.55	55%	45% (10M)		
FA68	0.60	2.75	1	0.60	55%	45% (8M)		
FA610	0.6	2.75	1	0.60	55%	45% (10M)		

FA: Fly Ash (Ceniza Volante). SA: Solución Activadora. Na₂SiO₃: Silicato de sodio. NaOH: Hidróxido de sodio. HR: Humedad Relativa. CDL: Condiciones De Laboratorio

Para la fabricación de los especímenes definitivos se siguió el mismo procedimiento utilizado para las mezclas preliminares.

3.5.3.- Ensayos realizados.

Se llevaron a cabo las pruebas mecánicas, la determinación de densidad, absorción y vacíos y la medición de contracción por secado de los especímenes prismáticos rectangulares de 40 x 40 x 160mm y se moldearon además especímenes cilíndricos de 50 mm de diámetro y 2.5 cm de espesor para el ensayo de conductividad térmica.

3.5.3.1.- Pruebas mecánicas.

Una vez que las piezas prismáticas de 40 x 40 x 160 mm alcanzaron la edad de curado establecida con anterioridad, para cada tipo de mezcla sobre tres piezas se determinó de manera dinámica el módulo de elasticidad de los especímenes mediante la interpretación de su frecuencia fundamental, para lo cual se procedió de acuerdo a lo plasmado en la NMX-C-089. Para esto se obtiene la masa de las piezas (Figura 10) y se promediaron 4 mediciones de las 3 dimensiones de los especímenes, largo, ancho y alto (Figura 11), en base a las dimensiones promedios se realizaron marcas sobre las caras de los especímenes señalando los puntos donde se colocará el receptor del acelerómetro, el o los soportes y el punto donde será impactado el espécimen (Figura 12) de acuerdo a los 3 modos de pruebas ya sea longitudinal, transversal (Figura 13) o torsional (Figura 14). Una vez ubicado el espécimen se impacta con el martillo y se realizan una serie de las lecturas en el sistema de cómputo, las cuales se promedian y posteriormente se procede a realizar los cálculos para determinar el módulo de elasticidad o de Young dinámico (E_d) en base a frecuencias fundamentales transversales o longitudinal, mediante las ecuaciones (2) y (3), respectivamente.



Figura 10. Obtención de la masa de los especímenes.



Figura 11. Medición de los especímenes.



Figura 12. Marcado del espécimen.



Figura 13. Acomodo para frecuencia fundamental en modo transversal.



Figura 14. Acomodo para frecuencia fundamental en modo torsional.

Las ecuaciones (2), (3) y (4) son:

$$Ed = CMn^2 \quad (2)$$

Donde:

E_d = Módulo de elasticidad dinámico en pascales.

M = Masa del espécimen, kg.

n = Frecuencia transversal fundamental, Hz.

C = Factor de forma = $0.9464 (L^3T/bt^3)$ para un prisma, m^{-1} .

L = Longitud del espécimen, m

t y b = Dimensiones de la sección transversal, m.

T = Factor de corrección que depende de la relación K/L y de una relación de Poisson propuesta en base a la literatura.

K = radio de giro de la sección transversal = $t/3.464$

$$Ed = DM(n')^2 \quad (3)$$

Donde:

M = Masa del espécimen, kg.

n' = Frecuencia longitudinal fundamental, Hz.

D = Factor de forma = $4(L/bt)$ para un prisma, m^{-1} .

L = Longitud del espécimen, m.

t y b = Dimensiones de la sección transversal, m.

Después del ensayo no destructivo, sobre las mismas tres piezas, para la evaluación de la resistencia a flexión (MR) se siguió el procedimiento NMX-C-303, para lo cual se apoyó cada viga sobre los apoyos cilíndricos del dispositivo de adaptación para la prueba el cual se coloca al interior de la Estación de ensaye a compresión, marca Controls, el cual aplica la carga en el centro del claro de los especímenes de 160 mm de largos (Figura 15). La carga se aplicó a una velocidad tal que el esfuerzo en la fibra extrema incrementa a una razón entre 0.9 y 1.2 MPa/min, hasta llegar a la falla (Figura 16). La resistencia a flexión se determinó utilizando la ecuación (6).

$$MR = 0.0028 * P \quad (6)$$

Donde:

MR = Módulo de Ruptura o Resistencia a Flexión, MPa.

P = Carga máxima aplicada, N.

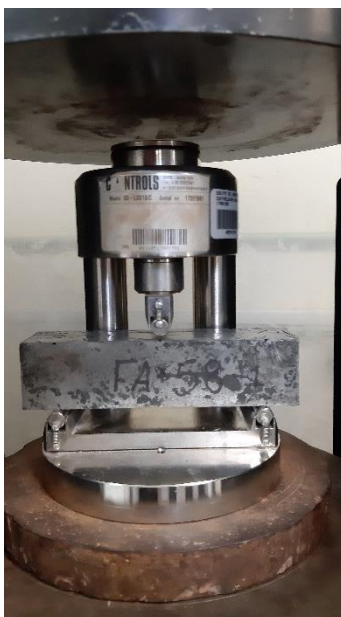


Figura 15. Configuración de la prueba de resistencia a flexión.



Figura 16. Falla de espécimen en prueba de resistencia a flexión.

El factor 0.0028 depende de la geometría de la probeta, de los apoyos de la misma y punto de aplicación de la carga

Posteriormente siguiendo el procedimiento NMX-C-235 se determinó la resistencia a compresión de cada una de las mezclas, usando 3 trozos alternados resultantes del ensayo a flexión, cada trozo se posicionó sobre una placa alargada de 40 mm de ancho y sobre el trozo de geopolímero se colocó una placa de 40 x 40 mm, se empleó una placa guía para asegurar la alineación de las placas superior e inferior (Figura 17). Una vez alineadas las placas y el trozo de viga de geopolímero se colocan y centran dentro de la Estación de ensaye a compresión, para lo cual fue necesario utilizar un dispositivo fijo que eleva el nivel de la base de apoyo de los especímenes (Figura 18), una vez colocados correctamente se aplica la carga hasta alcanzar la carga máxima de resistencia (Figura 19), posteriormente se afecta la carga máxima resistida por el cubo equivalente por el factor de corrección debido a la forma del mismo, este procedimiento se repite para cada uno de los trozos ensayados. La resistencia a compresión fue calculada con la ecuación (7).

$$f'c = 0.00062 * P \quad (7)$$

Donde:

$f'c$ = Resistencia a la compresión, MPa.

P = Carga máxima aplicada, N.

El factor 0.00062 depende de la sección transversal de la probeta incluyendo un factor de corrección.



Figura 17. Alineación de las placas para prueba de resistencia a la compresión con cubos equivalente.



Figura 18. Configuración para ensayo de resistencia a la compresión.



Figura 19. Modo de falla de los especímenes a compresión.

3.5.3.2.- Determinación de la absorción de agua, densidad y volumen de vacíos.

Densidad de las probetas así como sus porcentajes de absorción y porcentajes de vacíos fueron calculados de acuerdo a lo indicado en la norma NMX-C-263, para cada tipo de mezcla se utilizaron dos especímenes (Figura 20), los cuales procedían de los extremos restantes del ensayo de determinación de la resistencia a la flexión. Para comenzar con el proceso las piezas se secaron en el horno eléctrico que se muestra en la figura 21, a una temperatura de $105 \pm 5^{\circ}\text{C}$ durante 24 horas y se obtuvo su masa seca (Figura 22), posteriormente se sumergieron los especímenes durante 48 horas en agua potable a una temperatura de 21°C tal como se presenta en la figura 23, transcurrido ese tiempo se retiran del agua y se procede a retirar el exceso de agua acumulado en su exterior para a continuación

conocer su masa saturada superficialmente seca (Figura 24). Después de esto, se colocaron las piezas en análisis dentro de un recipiente metálico el cual fue llenado con agua potable, acto seguido dicho recipiente se expuso al fuego y se permitió que el agua estuviera hirviendo durante 5 horas continuas con la intención de expulsar todo aire y que el agua alcance a penetrar en los vacíos del geopolímero (Figura 25), después de esto se permite enfriar las piezas aproximadamente 14 horas y se secan superficialmente para conocer su masa saturada superficialmente seca después de ser hervidos (Figura 26). Por último después de haber sido obtenida la masa antes mencionada se mide la masa sumergida de los especímenes usando una báscula equipada con una canasta la cual se sumerge en agua potable (Figura 26). Al finalizar, con todos los datos de las masas de los especímenes de geopolímero se procede a realizar los cálculos para conocer el porcentaje de absorción después de inmersión y después de inmersión y hervido, la densidad (o masa específica) a granel seca, después de inmersión, después de inmersión y hervido, así como la densidad aparente y el volumen de espacios de poros permeables (o volumen de vacíos). Las ecuaciones utilizadas para los cálculos son las siguientes:

$$\text{Absorción después de inmersión, \%} = [(B-A)/A]*100 \quad (8)$$

$$\text{Absorción después de inmersión y hervido, \%} = [(C-A)/A]*100 \quad (9)$$

$$\text{Densidad a granel seca, g/cm}^3 = g_1 = [A/(C-D)]*\rho \quad (10)$$

$$\text{Densidad a granel después de inmersión, g/cm}^3 = [B/(C-D)]*\rho \quad (11)$$

$$\text{Densidad a granel después de inmersión y hervido, g/cm}^3 = [C/(C-D)]*\rho \quad (12)$$

$$\text{Densidad aparente, g/cm}^3 = g_2 = [A/(A-D)]*\rho \quad (13)$$

$$\text{Volumen de espacios vacíos, \%} = (g_2 - g_1)/g_2 * 100 = (C-A)/(C-D)*100 \quad (14)$$

Donde:

A = Masa secada, g.

B = Masa saturada superficialmente seca después de inmersión, g.

C = Masa saturada superficialmente seca después de inmersión y hervido, g.

D = Masa aparente sumergida después de inmersión y hervido, g.

g_1 = Densidad a granel, Ton/m³.

g_2 = Densidad aparente, Ton/m³.

ρ = Densidad del agua = 1 g/cm³ = 1 Ton/m³.



Figura 20. Trozos empleados para la determinación de densidad, porcentaje absorción y volumen de vacíos.



Figura 21. Horno eléctrico utilizado para secar las los trozos de viga de geopolímero.



Figura 22. Obtención de la masa seca.



Figura 23. Recipientes con especímenes sumergidos en agua potable a 21°C durante 48 horas.



Figura 24. Obtención de masa saturada superficialmente seca.



Figura 25. Hervido de trozos de geopolímero.



Figura 26. Obtención de la masa saturada superficialmente seca después de ser hervido y de la masa sumergida.

3.5.3.3.- Prueba de contracción por secado.

Para esta prueba fue necesario elaborar piezas especiales, si bien se empleó el mismo procedimiento para la elaboración de las mezclas, la cantidad de piezas disminuyó ya que solo se emplearon dos vigas de 40 x 40 x 160 mm por cada mezcla, lo que se traduce a una menor cantidad de materiales, empleando para este proceso sólo 300 g de FA y sus respectivas proporciones tanto de arena, NaOH y Na_2SiO_3 . Las vigas se elaboraron en moles especiales que cuentan con un tornillo en cada extremo de las vigas, los cuales son usados para colocar una tuerca la cual quedará embebida en el espécimen después de retirar los tronillos y desmoldar completamente la pieza (Figura 27), una vez cumplidos 1 días de precurado se siguió el procedimiento de la norma NMX-C-173 para medir su cambio de longitud mientras están expuesta a ambiente de laboratorio de $23 \pm 2^\circ\text{C}$ con una humedad relativa entre 40 y 60%.



Figura 27. Desmolde de piezas de geopolímero con tuerca embebida.

Para la medición de los cambios de longitud se realizaron comparaciones con una vara calibradora de 160 mm, la cual para ser correctamente posicionada se utilizó una esfera metálica en cada una de sus extremos cóncavos, como se muestra en la figura 28; al posicionar los especímenes de geopolímero las esferas metálicas antes mencionadas se colocaron en el interior del hueco expuesto de las tuercas embebidas; del otro lado de las esferas metálicas se encontraba el apoyo inferior y el micrómetro de la parte superior (Figura 29). Una vez registradas las diferencias entre los 160 mm que en teoría deben medir las piezas y su longitud real, en cada edad de exposición a un ambiente de laboratorio, se hace un registro en el cual se incluyó, además de las lecturas obtenidas y la edad de las piezas, la humedad relativa y temperatura al momento de realizar el procedimiento. La medición de cambios de longitud se prolongó hasta observar una estabilización en las variaciones y se utilizó la ecuación (5) para expresar el cambio de longitud en %.

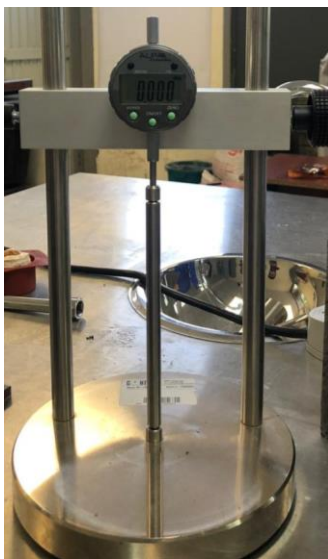


Figura 28. Calibración del comparador de longitud.



Figura 29. Medición del cambio de longitud, respecto a la longitud de calibración.

$$L = \frac{L_x - L_i}{G} * 100 \quad (5)$$

Donde:

L = Cambio de longitud a la edad x, %.

L_x = Lectura de longitud a la edad x después de calibrar el micrómetro, mm.

L_i = Lectura inicial después de calibrar el micrómetro, mm.

G = Largo nominal de la barra calibradora= 160 mm.

3.5.3.4.- Conductividad térmica.

Debido a las complicaciones y cambio de planes que fueron derivados de la contingencia sanitaria por el SARS-CoV-2 (COVID-19), y mediante la aprobación del H. Comité Evaluador, se optó por realizar una revisión bibliográfica en búsqueda de publicaciones que cumplen con características similares a la investigación realizada en este proyecto de intervención, y que hayan obtenido el valor de coeficiente de conductividad térmica de los geopolímeros base ceniza volante.

3.5.3.5.- Diseño de propuestas de aplicación y evaluación del coeficiente global de transferencia de calor.

Una vez determinado los valores de conductividad térmica, se analizó el coeficiente global de transferencia de calor (K) de tres potenciales aplicaciones del material en envoltorio de un edificio para uso habitacional (vivienda tipo interés social): una para techos (como placa aislante tipo recubrimiento) y dos para muros (como placa aislante tipo recubrimiento y como piezas sólidas tipo mampostería) y se comparó con los valores de 3 sistemas constructivos tradicionales para envoltorios de edificaciones, dos para muros (de ladrillo rojo cocido y de block de concreto hueco) y uno para losas (losa maciza de concreto armado). En la Figura 30 se muestran las configuraciones de las potenciales aplicaciones del material geopolimérico.

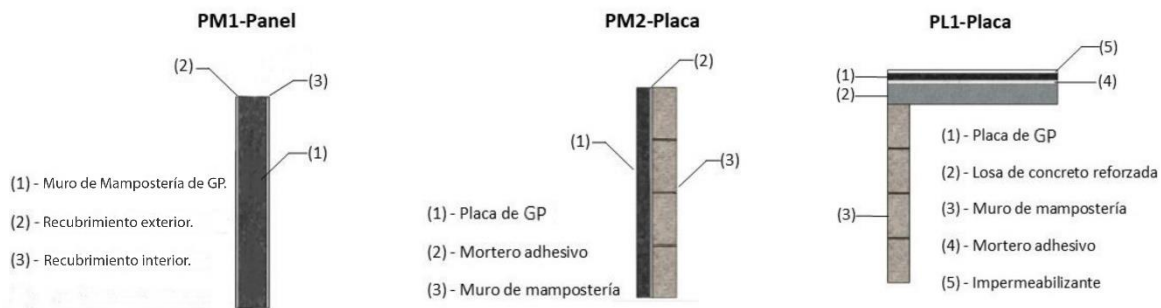


Figura 30. Configuración de las potenciales aplicaciones del material estudiado.

Los cálculos de K se realizaron aplicando la metodología propuesta en el apéndice B de la norma NOM-020-ENER-2011, donde se presentan las siguientes ecuaciones:

$$K = \frac{1}{M} \quad (15)$$

Donde:

K: Coeficiente global de transferencia de calor de una porción de la envoltorio del edificio para uso habitacional, de superficie a superficie (W/m²K).

M: Aislamiento térmico total de una porción de la envoltorio del edificio, de superficie a superficie (m²K/W).

Cuando la envoltorio está conformada por capas homogéneas y perpendiculares al flujo de calor, se emplea la ecuación 16 para calcular M.

$$M = \frac{1}{h_e} + \frac{1}{h_i} + \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{\lambda_i} \quad (16)$$

Donde:

h_e : Conductancia superficial exterior, es igual a 13 W/m²K.

h_i : Conductancia superficial interior, es igual a :

- 8.1 W/m²K para superficies verticales.
- 9.4 W/m²K para superficies horizontales con flujo de calor ascendente.
- 6.6 W/m²K para superficies horizontales con flujo de calor descendente.

n : Número de capas que componen la envolvente.

l_i : Espesor de cada una de las capas que conforman la envolvente (m).

λ_i : Conductividad térmica del material que constituye cada una de las capas homogéneas de la envolvente (W/mK).

Y bien, si la envolvente está conformada por capas homogéneas y heterogéneas, perpendiculares al flujo de calor, se emplea la ecuación 17 para calcular M.

$$M = \sum_{j=1}^m \frac{\frac{1}{F_j}}{\frac{M_{parcial} + \frac{g}{\lambda_j}}}{\quad (17)}$$

Donde:

m : número de materiales que conforman la capa heterogénea.

F_j : Fracción del área total que está conformada por cada material en la capa heterogénea.

g : Espesor de la capa heterogénea (m).

λ_j : Conductividad térmica del material que constituye cada una de las porciones de la capa heterogénea de la envolvente (W/mK).

$$M_{parcial} = \frac{1}{h_e} + \frac{1}{h_i} + \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{\lambda_i} \quad (18)$$

h_e : Conductancia superficial exterior, es igual a 13 W/m²K.

h_i : Conductancia superficial interior, es igual a :

- 8.1 W/m²K para superficies verticales.
- 9.4 W/m²K para superficies horizontales con flujo de calor ascendente.
- 6.6 W/m²K para superficies horizontales con flujo de calor descendente.

n : Número de capas que componen la envolvente.

l_i : Espesor de cada una de las capas que conforman la envolvente (m).

λ_i : Conductividad térmica del material que constituye cada una de las capas homogéneas de la envolvente (W/mK).

3.6. Análisis de resultados

3.6.1.- Propiedades mecánicas.

Los resultados obtenidos en las pruebas mecánicas para módulo de elasticidad dinámico (E_d), resistencia a compresión (f'_c) y resistencia a flexión (MR) se muestran en las Figuras 31, 32 y 33, respectivamente.

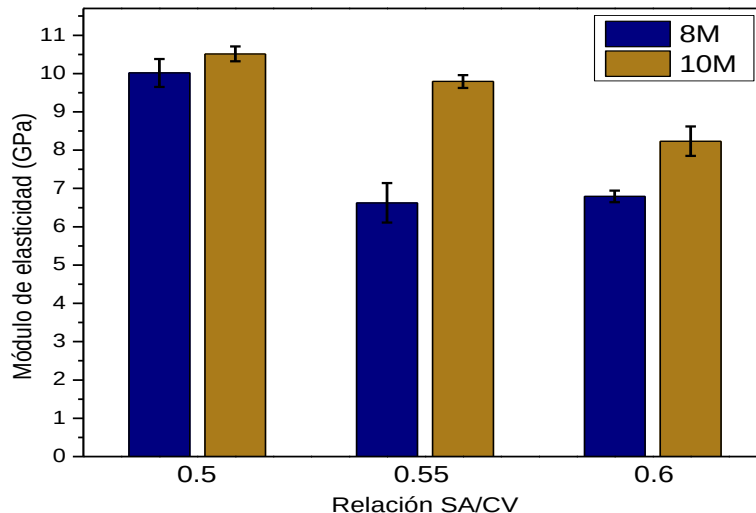


Figura 31. E_d de las mezclas estudiadas

Puede observarse en la Figura 31 que E_d para las mezclas cuya concentración de NaOH es de 10M, tiende a decrecer conforme se aumenta la relación SA/FA, pasando de los 10.51 GPa para SA/CV=0.5 hasta los 8.23 GPa para SA/CV=0.6, lo cual representa un 22% de reducción.

Respecto a las mezclas 8M, también se observa una reducción de E_d conforme se aumenta la relación SA/FA; sin embargo, la reducción de E_d para SA/CV=0.6 con respecto a E_d para SA/CV=0.55 es insignificante.

Para las tres relaciones SA/CV estudiadas, los valores de E_d son superiores cuando se usó una concentración de NaOH de 10M, lo cual es más notorio para las relaciones SA/CV=0.55 y 0.6.

En la Figura 32 puede observarse que MR presentó los mayores valores cuando se usó una relación SA/CV=0.5 y concentración de NaOH de 8M y 10M llegando hasta alrededor de 5 MPa y 5.5 MPa, respectivamente. Para la concentración de 8M, cuando se incrementó la relación SA/CV a 0.55 y 0.6, los valores de MR se redujeron significativamente hasta alrededor de los 3 MPa, representando un 40% de reducción de MR con respecto a

SA/CV=0.5. En cuanto a la concentración de 10M la reducción de MR para SA/CV=0.55 y 0.6 fue de 13% y 28%, respectivamente.

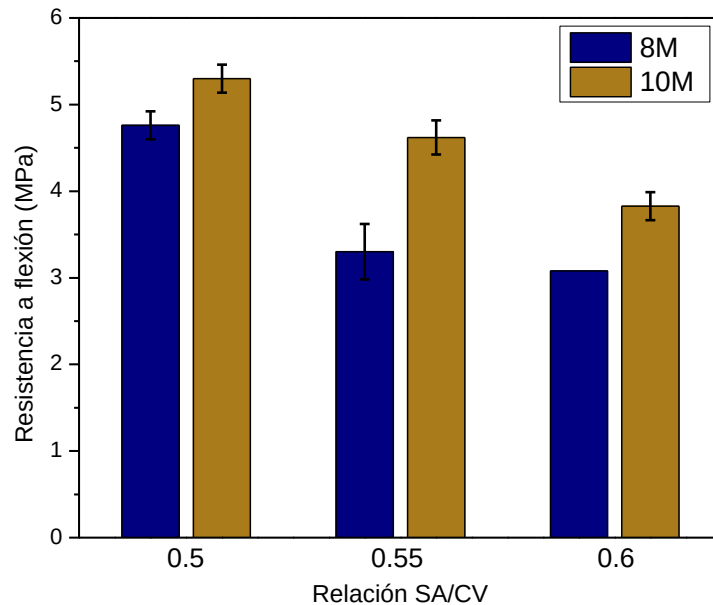


Figura 32. Resistencia a flexión de las mezclas.

En la Figura 33 puede observarse que los mayores valores de f'_c (entre 18 y 20 MPa) se obtuvieron cuando se usó una relación SA/CV=0.5 para ambas molaridades y cuando se usó una relación SA/CV=0.55 y 10M. Para la concentración de NaOH de 8M, los valores de f'_c se redujeron significativamente cuando se incrementó la relación SA/CV a 0.55 y 0.6. Los porcentajes de reducción con respecto a f'_c alcanzada para SA/CV=0.5 fueron de 35% y 47% para SA/CV=0.55 y SA/CV=0.6, respectivamente. Con respecto a la concentración de NaOH

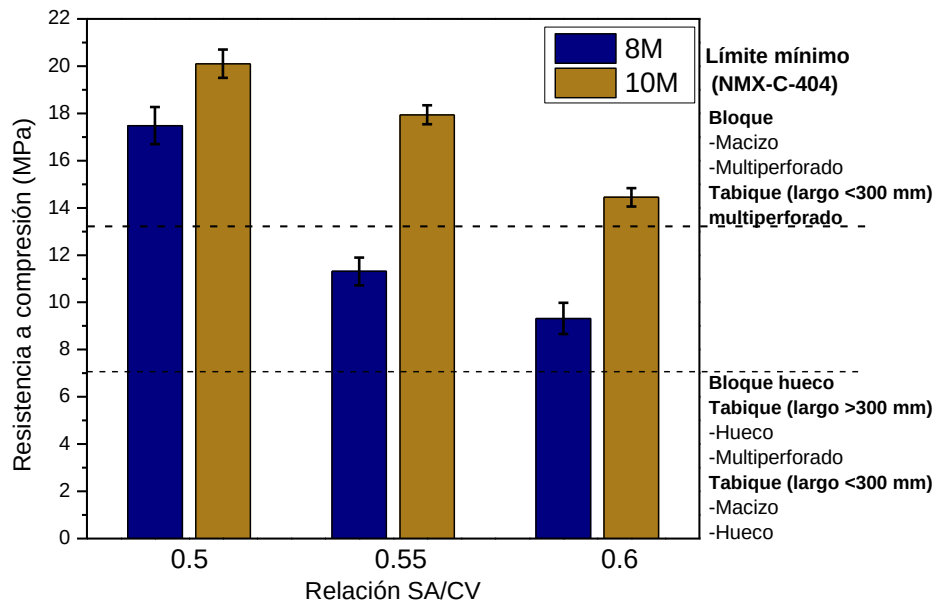


Figura 33. Resistencia a compresión de las mezclas.

de 10M, la reducción de $f'c$ fue menos significativa, siendo esta de 11% y 28% para $SA/CV=0.55$ y $SA/CV=0.6$, respectivamente.

Conforme a los límites mínimos de $f'c$ requeridos por la norma NMX-C-404 para piezas de mampostería de uso estructural (muros portantes), puede observarse que prácticamente todas las mezclas estudiadas rebasan el límite de 7 MPa requerido para piezas de mampostería tradicional (bloque hueco de concreto, tabique hueco, macizo y multiperforado). Sin embargo, para el límite de 12 MPa correspondiente a bloque macizo (de concreto), bloque multiperforado y tabique multiperforado (largo <300 mm), sólo cuatro mezclas rebasan dicho límite: las tres mezclas de concentración 10M y la mezcla de relación $SA/CV=0.5$ y 8M de concentración de NaOH.

Conforme a los límites mínimos de $f'c$ requeridos por la norma NMX-C-441 para piezas de mampostería de uso no estructural (muros no portantes) que se muestran en la Tabla 8, puede observarse que todas las mezclas estudiadas rebasan los límites mínimos para cada tipo de pieza.

De acuerdo a los resultados obtenidos por Barbosa y Hanai en el 2004 [67], para las mezclas con resistencias similares a las alcanzadas en este proyecto, se encontró una gran similitud de los valores reportados de $f'c$ tanto por las piezas de block de concreto hueco como para los cilindros de ensaye de 10 x 20 cm. Por otra parte, Nalon et al. en el 2017 [68] presenta una comparativa de las resistencias a la compresión de distintos tipos de prismas elaborados con las mismas mezclas de mortero, donde se logra observar que los valores de $f'c$ de los cilindros de ensaye de 10 x 20 cm son prácticamente iguales a los valores de $f'c$ obtenidos por medio del ensayo de trozos de prismas rectangulares de 4 x 4 x 16 cm. Razones por las cuales se consideró viable realizar una comparativa de resistencia a la compresión de trozo de prismas rectangulares y los requisitos de resistencia a la compresión indicados en las normas NMX-C-404 y NMX-C-441.

Tabla 8. Requisitos de resistencia para piezas de mampostería de uso no estructural.

Tipo de pieza	Configuración	Resistencia Media $\bar{f}_p$ MPa (kg/cm ²)	Resistencia mínima individual f_{pMn} MPa (kg/cm ²)
Bloque	Macizo o hueco	3.5 (35)	2.8 (28)
Tabique extruido	Macizo o hueco	4.0 (40)	3.2 (32)
Tabique artesanal	Macizo	3.0 (30)	2.4 (24)
Celosía	Cara rectangular	2.5 (25)	2.0 (20)
	Cara no rectangular	2.5 (25)	2.0 (20)

3.6.2.- Absorción de agua y densidad.

En las Figuras 34 y 35 se muestran los resultados de absorción total en 24 h y de densidad seca, respectivamente.

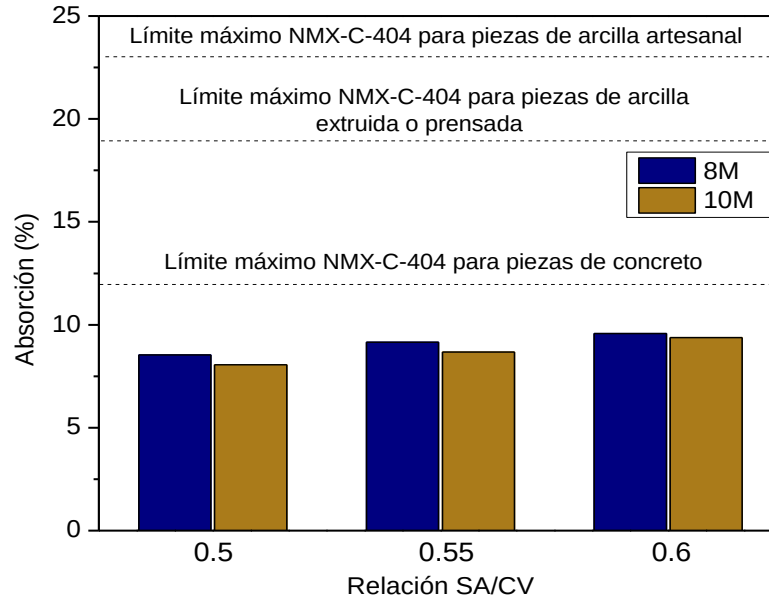


Figura 34. Absorción total en 24 h.

En la Figura 34 puede observarse que para ambas molaridades (8M y 10M) a medida que se incrementó la relación SA/CV, la absorción también se incrementó ligeramente. Los valores de absorción de todas las mezclas oscilan entre 8 y 10% y resultaron ligeramente mayores cuando se usó una concentración de 8M.

En cuanto a los límites máximos de absorción que establece NMX-C-404, se observa que ninguna de las mezclas estudiadas rebasa los límites máximos para cualquier tipo de piezas de mampostería estructural. De la misma forma con base en la Tabla 9 se logra apreciar que ninguna de las mezclas supera los límites máximos estipulados por la NMX-C-441 para piezas de mampostería de uso no estructural.

Tabla 9. Máximos de absorción según para materiales de mampostería para uso no estructural.

Tipo de material	Absorción total en 24 h en porcentaje
Concreto	25
Arcilla artesanal	25
Arcilla extruida o prensada	20

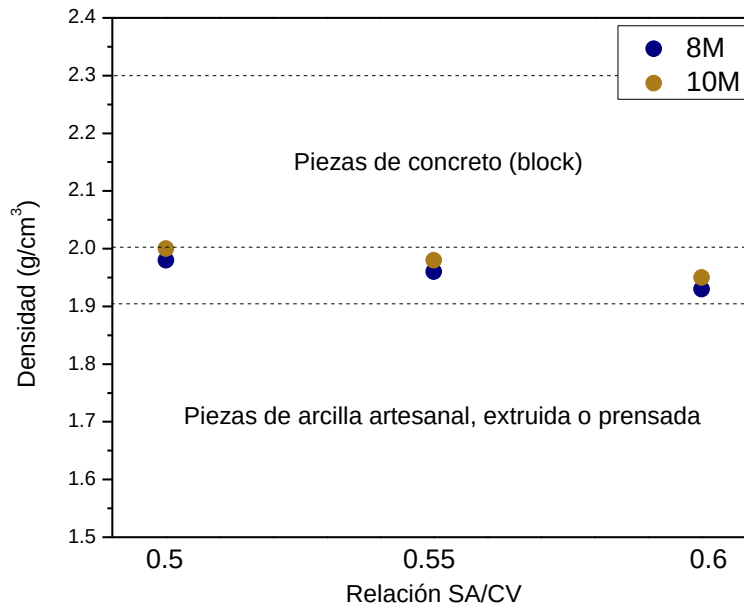


Figura 35. Densidad de piezas estudiadas y piezas típicas.

En lo que concierne a la densidad, se observa en la Figura 35 que el rango de densidades entre todas las mezclas es muy estrecho oscilando entre 1.9 y 2.0 g/cm³. Las densidades mostradas por las mezclas geopoliméricas son superiores a las densidades típicas de piezas de mampostería de arcilla artesanal, extruida o prensada; sin embargo, son menores a las densidades típicas de las piezas de block de concreto. La normativa NMX-C-404 no establece límites para los valores de densidad; sin embargo este parámetro cobra especial relevancia en la conductividad térmica del material, pues ambos parámetros son inversamente proporcionales.

3.6.3.- Contracción por secado.

Los resultados de contracción por secado de las piezas de geopolímero se presentan en la Figura 36, en la cual puede apreciarse que a partir del día 6 se comienza a ver una estabilidad en la variación volumétrica de las piezas. Respecto al porcentaje de contracción máxima aceptable para piezas de mampostería estructural estipulado en la NMX-C-404 (0.065%), puede observarse que sólo dos mezclas presentan contracciones por debajo de dicho límite: la mezcla hecha con relación SA/CV=0.5 y 8M, y la mezcla hecha con relación SA/CV=0.55 y 8M. Las mezclas que presentaron mayor contracción fueron la de relación SA/CV=0.55, 10M y la de relación SA/CV=0.6, 10M. Por su parte, la NMX-C-441 no hace mención de algún límite con respecto al porcentaje de la contracción por secado.

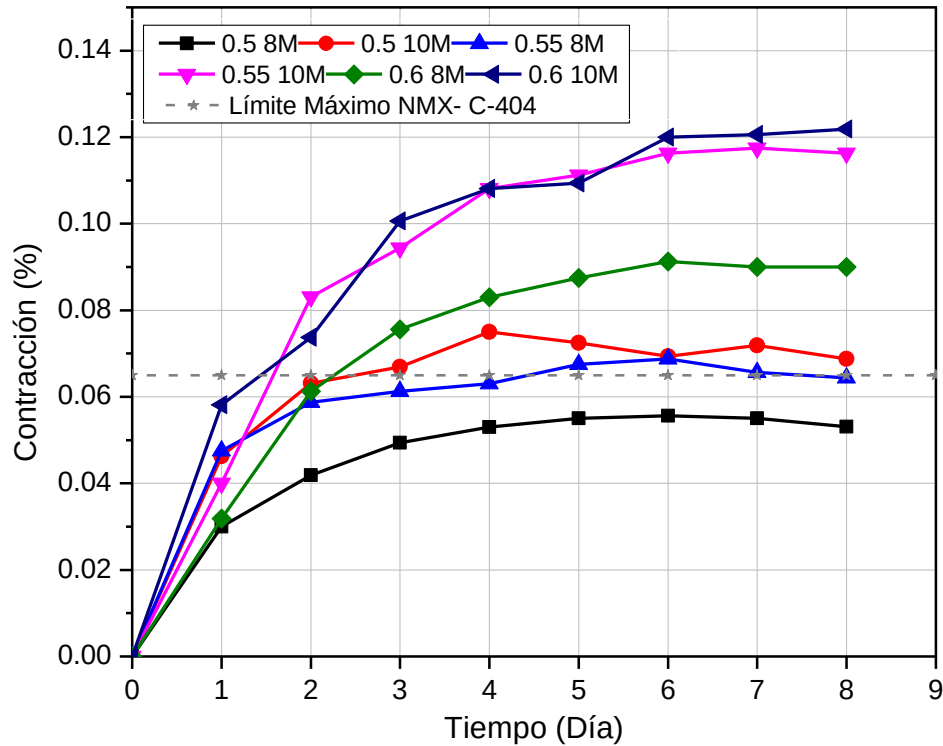


Figura 36. Contracción por secado con respecto al tiempo.

3.6.4.- Conductividad térmica.

Una vez autorizada la revisión bibliográfica con el fin de determinar un valor de conductividad térmica (λ) a las mezclas de geopolímero, se procedió a su realización y se seleccionaron aquellas publicaciones en las que se elaboraron morteros por medio del proceso de geopolimerización de ceniza volante clase F, similares a las elaboradas en este proyecto de intervención. En la tabla 10 se presentan de manera condensada los resultados de dicha búsqueda.

Tabla 10. Revisión bibliográfica de conductividad térmica en morteros geopoliméricos base CV.

FECHA [REF.]	TÍTULO DEL ARTÍCULO (PAÍS)	MATERIALES	CONDICIONES DE EXPERIMENTACIÓN	RESULTADOS DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA
2014 [69]	In-situ carbonation of alkali activated fly ash geopolymer (Italia)	P: FA SA: NaOH, Na ₂ SiO ₃ , NaHCO ₃	Relaciones: (Na ₂ SiO ₃ +NaHCO ₃)/NaOH=2.57 NaHCO ₃ = 2% al 5% de la pasta SA/FA= 0.34 C (NaOH)= 14M Dimensiones de los especímenes: Cilindros de 36 mm de diámetro y 60 mm de altos Precurado: 24 h a 65°C. Curado: 2 h a 150 ± 2°C	En el mortero de control (0% NaHCO ₃) se alcanzó λ= 0.11 W/mK
2016 [70]	Optimizing and Characterizing Geopolymers from Ternary Blend of Philippine Coal Fly Ash, Coal Bottom Ash and Rice Hull Ash. (Filipinas)	P: FA, Ceniza de fondo (Bottom Ash)(BA), Ceniza de Cáscara de Arroz (Rice Hull Ash) (RAH) SA: NaOH y Na ₂ SiO ₃	Relaciones: Na ₂ SiO ₃ /NaOH=20/80 FA/Agregado= 1:0.75, 1:1 y 1:2 C (NaOH)= 10M Dimensiones de los especímenes: Prismas de 50 x 50 x 100 mm Precurado: 24 h a 65°C. Curado: 2 h a 150 ± 2°C	A1 (100% FA): λ= 0.469 W/mK
2017 [71]	An Experimental Investigation on Flyash-based Geopolymer Mortar under different curing regime for Thermal Analysis. (India)	P: FA SA: NaOH, Na ₂ SiO ₃	Relaciones: Na ₂ SiO ₃ /NaOH=2.5 C (NaOH)= 10M Dimensiones de los especímenes: Cubos de 70.6 x 70.6 x 70.6 mm. Precurado: 24 h a temperatura ambiente. Curado 1: 24 h a 80°C aprox. en Cámara de calentamiento. Curado 2: 24 h a 80°C aprox. en Esterilizador de vapor tipo horizontal Curado 3: 24 h a 80°C aprox. en Horno de aire caliente. Curado 4: 24 h a temperatura ambiente.	Curado 1: λ= 0.573 W/mK Curado 2: λ= 0.664 W/mK Curado 3: λ= 0.363 W/mK Curado 4: λ= 0.910 W/mK
2017 [72]	Thermal cycling stability of fly ash based geopolymer mortars. (Italia)	P: FA y Escoria granulada de alto horno (Ground Granulated Blast Furnace Slag) (GGBFS) SA: NaOH y Na ₂ SiO ₃	Relaciones: Na ₂ SiO ₃ :NaOH:FA = 1:1:3 FA/Arena= 1:0.75, 1:1 o 1:2 GGBFS (% Reemplazo de FA)= 0, 10 o 20% C(NaOH)= 10M Dimensiones de los especímenes: Discos de 50 mm de diámetro y 12.5 mm de alto Precurado: Temperatura: 25, 40 o 60°C Tiempo: 24, 48 o 168 h Curado: hasta los 28 días a temperatura ambiente	Mortero 6 (100% FA, FA/Arena= 1:1, 60°C por 48h) λ= 0.657 ± 0.026 W/mK
2019 [73]	Insulating and fire-resistant behaviour of metakaolin and fly ash geopolymer mortars. (Egipto)	P: FA, MK. SA: Na ₂ SiO ₃ Agregado: Arena y Perlita Expandida	Relaciones: Agregado/P=2 Fibra de vidrio/ P= 0.02 SA/P= 0.652 Dimensiones de los especímenes: Placa de 200 x 200 x 50 mm Precurado: 24 h a 50 ± 2°C. Curado: a temperatura ambiente	Para el motero de FA y arena se obtuvo un λ≈ 0.8 W/mK

En la búsqueda realizada se encontraron valores de λ en un rango de 0.11 a 0.91 W/mK en función de ciertas condiciones experimentales; sin embargo, se encontró que independientemente de las condiciones experimentales, λ tiene una muy estrecha y directa relación con la densidad del material. Por ejemplo, el Dr. Davidovits [74] concluyó que los valores de λ de un geopolímero se encuentran relacionados de manera directa y proporcional con la densidad del mismo. Esta relación puede ser confirmada en los resultados obtenidos por Jaya et al. en el 2020 [75], donde se reporta la gráfica de la figura 37 que relaciona densidad con λ y porosidad. De la gráfica que relaciona densidad y λ se obtuvo la ecuación (Ec. 19) de la línea recta con pendiente ascendente, que permite conocer un aproximado del valor de conductividad térmica (λ) a partir del valor de densidad (g_1) del geopolímero.

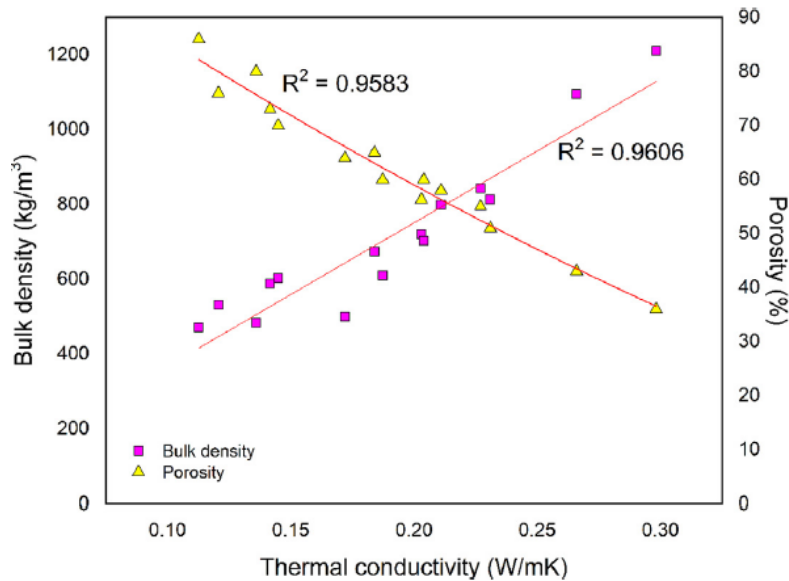


Figura 37. Relaciones Conductividad Térmica-Densidad -Porosidad [75]

$$\lambda = \frac{g_1 + 15.814}{3542.338} \quad (19)$$

Donde:

λ = Conductividad térmica del geopolímero (W/mK).

g_1 = Densidad del geopolímero (kg/m³)

Empleando la ecuación 19 se determinó el valor de λ para las mezclas geopoliméricas FA58 y FA558 (únicas que cumplieron con todos los requerimientos de la NMX-C-441 y NMX-C-404) las cuales cuentan con una densidad (g_1) de 1980 kg/m³ y 1960 kg/m³, respectivamente. Los valores de λ obtenidos para dichas mezclas fueron de 0.563 W/mK para FA58 y 0.558 W/mK para FA558, los cuales se consideran aceptables dado que están dentro del rango de valores que fueron encontrados durante la revisión bibliográfica para este tipo de morteros geopoliméricos.

3.6.5.- Diseño de propuestas de aplicación y evaluación del coeficiente global de transferencia de calor.

Una vez teniendo el resultado de conductividad térmica de los morteros geopoliméricos FA58 y FA558, se realizó el cálculo del coeficiente global de transferencia de calor (K) aplicando la metodología propuesta en el apéndice B y los valores del apéndice D (Anexo 1) de la norma NOM-020-ENER-2011, para cada una de las siguientes configuraciones de superficies envolventes propuestas (Tabla 11).

Tabla 11. Descripción de configuraciones de superficies analizadas.

CLAVE	DESCRIPCIÓN DE LA CONFIGURACIÓN
MURO 1	Muro de tabique rojo cocido de 6 x 12 x 24 cm, con junta de mortero cemento arena de 1.5 cm, castillos de 12 x 12 cm y dala de cerramiento de 12 x 20 cm, recubrimiento de mortero cemento arena de 1.5 cm por ambos lados.
MURO 2	Muro de block de concreto 20 x 20 x 40 cm, con juntas de mortero cemento arena de 2 cm, castillos y dalas de 20 x 20 cm, con recubrimiento de mortero cemento arena de 1.5cm a ambos lados.
LOSA 1	Losa de concreto armado de 10 cm de espesor, con entortado de mortero cemento arena, con un espesor promedio de 10 cm, impermeabilizado con membrana asfáltica de 5 mm de espesor.
MURO-GP-1	Muro de tabique rojo cocido de 6 x 12 x 24 cm, con junta de mortero cemento arena de 1.5 cm, castillos de 12x12cm y dala de cerramiento de 12x20cm, recubrimiento de mortero cemento arena de 1.5cm al interior, recubierto en la parte exterior con fachaleta de mortero geopolimérico de 2.5cm de espesor adherida con mortero cemento arena de 1.5cm de espesor.
MURO-GP-2	Muro de block de concreto 20 x 20 x 40 cm, con juntas de mortero cemento arena de 2 cm, castillos y dalas de 20 x 20 cm, con recubrimiento de mortero cemento arena de 1.5 cm al interior, recubierto en la parte exterior con fachaleta de mortero geopolimérico de 2.5 cm de espesor adherida con mortero cemento arena de 1.5 cm de espesor.
MURO-GP-3	Muro de tabique geopolimérico de 6 x 12 x 24 cm, con junta de mortero cemento arena de 1.5 cm, castillos de 12 x 12 cm y dala de cerramiento de 12 x 20 cm, recubrimiento de mortero cemento arena de 1.5 cm por ambos lados.
LOSA-GP-1	Losa de concreto armado de 10 cm de espesor, con entortado de mortero cemento arena con un espesor promedio de 7 cm, con losetas geopoliméricas de 2.5 cm asentadas con boquilla de mortero cemento arena de 1.5 cm de espesor, impermeabilizado con membrana asfáltica de 5 mm de espesor.

Los valores de K obtenidos se presentan en la tabla 12, donde puede observarse que K para ambas mezclas es muy similar dado que sus densidades también son muy parecidas.

Tabla 12. Valores de K para las configuraciones analizadas.

SISTEMA	K (W/m ² K)	
MURO 1	2.78	
MURO 2	2.61	
LOSA 1	2.33	
MEZCLA GEOPOLIMÉRICA	FA58	FA558
MURO-GP-1	2.48	2.47
MURO-GP-2	2.34	2.34
MURO-GP-3	2.50	2.49
LOSA-GP-1	2.19	2.18

Con los resultados de K de las configuraciones propuestas, se pueden observar las siguientes comparativas:

Para FA58:

- MURO 1 vs. MURO-GP-1: Reducción de 0.30 W/m²K representando un -10.8%.
- MURO 1 vs. MURO-GP-3: Reducción de 0.28 W/m²K representando un -10.1%.
- MURO 2 vs. MURO-GP-2: Reducción de 0.27 W/m²K representando un -10.3%.
- LOSA 1 vs. LOSA-GP-1: Reducción de 0.14 W/m²K representando un -6%.

Para FA558:

- MURO 1 vs. MURO-GP-1: Reducción de 0.31 W/m²K representando un -11.2%.
- MURO 1 vs. MURO-GP-3: Reducción de 0.29 W/m²K representando un -10.4%.
- MURO 2 vs. MURO-GP-2: Reducción de 0.27 W/m²K representando un -10.3%.
- LOSA 1 vs. LOSA-GP-1: Reducción de 0.15 W/m²K representando un -6.4%.

Las tres propuestas de aplicación en muro (MURO-GP-1, MURO-GP-2 y MURO-GP-3), con ambas mezclas geopoliméricas (FA58 y FA558), representan reducciones de K significativas (>10%), con respecto a los sistemas de muro tradicionales (MURO 1 y MURO 2).

La propuesta de aplicación en losa (LOSA-GP-1), representa una reducción de K de 6% y 6.4% para FA58 y FA558, respectivamente, comparado con el sistema tradicional de losa (LOSA 1).

4.- Estrategias de implementación

Del análisis de los resultados es evidente que en cuanto a propiedades físicas y funcionales las tres configuraciones más eficientes para su potencial uso en envolventes de edificaciones son las mostradas en la Tabla 13.

Tabla 13. Configuraciones más eficientes en cuanto a propiedades físicas y funcionales

CLAVE	DESCRIPCIÓN DE LA CONFIGURACIÓN
MURO-GP-1	Muro de tabique rojo cocido de 6 x 12 x 24 cm, con junta de mortero cemento arena de 1.5 cm, castillos de 12x12cm y dala de cerramiento de 12x20cm, recubrimiento de mortero cemento arena de 1.5cm al interior, recubierto en la parte exterior con fachaleta de mortero geopolimérico de 2.5cm de espesor adherida con mortero cemento arena de 1.5cm de espesor.
MURO-GP-2	Muro de block de concreto 20 x 20 x 40 cm, con juntas de mortero cemento arena de 2 cm, castillos y dalas de 20 x 20 cm, con recubrimiento de mortero cemento arena de 1.5 cm al interior, recubierto en la parte exterior con fachaleta de mortero geopolimérico de 2.5 cm de espesor adherida con mortero cemento arena de 1.5 cm de espesor.
MURO-GP-3	Muro de tabique geopolimérico de 6 x 12 x 24 cm, con junta de mortero cemento arena de 1.5 cm, castillos de 12 x 12 cm y dala de cerramiento de 12 x 20 cm, recubrimiento de mortero cemento arena de 1.5 cm por ambos lados.

De las tres configuraciones mostradas, MURO-GP-1 y MURO-GP-2 el producto a implementar (fachaleta) consiste en una placa de mortero geopolimérico de 2.5 cm de espesor que podrá ser adherida al muro de mampostería (block o tabique) con mezcla de mortero común.

Para la configuración MURO-GP-3, el producto a implementar consiste en tabiques macizos de mortero geopolimérico que podrán ser unidos entre sí con mezcla de mortero común.

4.1 Plan de acción

El plan de acción para lograr la implementación contiene una serie de estrategias que se describen en el siguiente apartado, sin embargo, el plan estará completo cuando se haga un estudio de factibilidad técnica, operacional y económica de una planta para producción de prefabricados a base de mortero geopolimérico, con lo cual se podrán determinar otras variables importantes para lograr la implementación como la rentabilidad, el costo de producción y precio de las piezas y el periodo de recuperación de la inversión. Esto es necesario debido a que el proceso de producción de prefabricados geopoliméricos es diferente al proceso de producción de mampostería tradicional, lo cual quedó de manifiesto en la metodología.

Como primera estrategia del plan hacia la implementación, se elaboraron fichas técnicas de los dos productos, las cuales incluyen características generales, características técnicas, características físicas y otras especificaciones. En las Figuras 38 y 39 se muestran las fichas técnicas de la fachaleta geopolimérica y del tabique geopolimérico, respectivamente.



BELCAS
Prefabricados Sustentables

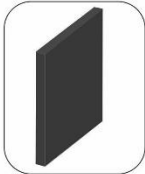
Calle Jaboncillo #2907
 Urbivilla del Cedro
 Culiacán, Sinaloa

FICHA TÉCNICA

MANUAL DE APOYO
FACHALETA GEOPOLIMÉRICA

CARACTERÍSTICAS GENERALES

Denominación del Bien	: FACHALETA		
Denominación Técnica	: FACHALETA GEOPOLIMÉRICA		
Grupo/Clase/Familia	: RECUBRIMIENTO TERMOAISLANTE		
Dimensiones (mm)	LARGO 300	ANCHO 300	ESPESOR 25
Peso	: 4.46 kg		
Unidades m ²	: 11		



ANEXOS ADJUNTOS

Descripción General: Fachaleta fabricada con geopolímero base ceniza volante, vibrocompactada y curada en horno a temperatura elevada y humedad relativa del 100%.

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

Según la Norma Oficial Mexicana NOM-020 la fachaleta es considerada un material termoislante debido a la reducción que genera en el coeficiente global de transferencia de calor (K).

Además cumple con todas las características solicitadas en la Norma NMX-C-441 para elementos prefabricados de uso no estructural.

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

	según NMX	según muestra
Variación de espesor (mm):	± 3.0	± 3.0
Variación de largo y ancho (mm):	± 2.0	± 2.0
Absorción:	<12%	8.5%
Resistencia a la Compresión (kg/cm ²):	N/A	178.4

OTRAS ESPECIFICACIONES

- Proceso de fabricación con altos estándares de control.
- Riguroso control de calidad en cada proceso.
- Curado en Horno.
- Mezcla libre de cemento Portland (menor generación de CO₂).
- Cementante (subproducto de la generación eléctrica) activado alcalinamente.
- Genera una reducción de K superior a un 10%.
- Material con alta resistencia a la compresión.

EL CONTENIDO DE LA FICHA PUEDE VARIAR POR CAMBIOS EN LOS PROCEDIMIENTOS O EN LAS ESPECIFICACIONES TÉCNICAS.
www.belcasprefabricadossustentables.com.mx

Figura 38. Ficha técnica de la fachaleta geopolimérica



BELCAS
Prefabricados Sustentables

Calle Jaboncillo #2907
 Urbivilla del Cedro
 Culiacán, Sinaloa

FICHA TÉCNICA

MANUAL DE APOYO

TABIQUE MACIZO GEOPOLIMÉRICO

CARACTERÍSTICAS GENERALES

Denominación del Bien	: TABIQUE MACIZO		
Denominación Técnica	: TABIQUE MACIZO GEOPOLIMÉRICO		
Grupo/Clase/Familia	: MAMPOSTERÍA ESTRUCTURAL TERMOAISILANTE		
Dimensiones (mm)	: LARGO 240	: ANCHO 120	: ALTO 60
Peso	: 3.42 kg		
Unidades m ²	: 52		



ANEXOS ADJUNTOS

Descripción General: Tabique Macizo fabricado con geopolímero base ceniza volante, vibrocompactado y curado en horno a temperatura elevada y humedad relativa del 100%.

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

Según la Norma NMX-C-404 este elemento cumple con las características necesarias para ser considerado un elemento de mampostería para uso estructural.

Además, de acuerdo a la Norma Oficial Mexicana NOM-020 el tabique macizo geopolimérico es considerado un material termoaislante debido a la reducción que genera en el coeficiente global de transferencia de calor (K).

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

	según NMX	según muestra
Variación de altura (mm):	± 3.0	± 3.0
Variación de largo y ancho (mm):	± 2.0	± 2.0
Absorción:	<12%	8.5%
Contracción por secado:	<0.065%	0.053%
Resistencia a la Compresión (kg/cm ²):	70	178.4

OTRAS ESPECIFICACIONES

- Proceso de fabricación con altos estándares de control.
- Riguroso control de calidad en cada proceso.
- Curado en Horno.
- Mezcla libre de cemento Portland (menor generación de CO₂).
- Cementante (subproducto de la generación eléctrica) activado alcalinamente.
- Genera una reducción de K superior a un 10%, con respecto a la mampostería tradicional.
- Material con alta resistencia a la compresión.

EL CONTENIDO DE LA FICHA PUEDE VARIAR POR CAMBIOS EN LOS PROCEDIMIENTOS O EN LAS ESPECIFICACIONES TÉCNICAS.
www.belcasprefabricados sustentables.com.mx

Figura 39. Ficha técnica del tabique macizo geopolimérico

Como segunda estrategia, una vez elaborado el estudio de factibilidad técnica, operacional y económica, se buscará el financiamiento para la construcción de la planta de prefabricados. Las posibles fuentes de financiamiento son accionistas que deseen invertir o instituciones financieras mediante la obtención de un crédito para proyectos productivos.

Como tercera estrategia, se hará una campaña de publicidad por redes sociales difundiendo las fichas técnicas de los productos y difundiendo videos demostrativos de la instalación de los productos.

Como cuarta estrategia, se harán presentaciones de los productos en la reuniones gremiales de colegios de ingenieros, arquitectos y en cámaras como CMIC, CANACO y CANACINTRA.

5.- Administración del proyecto

El estudio de factibilidad de la planta de prefabricados deberá incluir como apartado final un presupuesto de inversión y una calendarización de las distintas actividades a realizar para la construcción de la planta y para ejecutar las estrategias descritas en el apartado anterior.

6.- Conclusiones y recomendaciones

6.1.- Conclusiones.

En base a los resultados experimentales y a los cálculos realizados, se puede concluir lo siguiente:

- Para las tres relaciones SA/CV estudiadas, los valores de E_d son superiores cuando se usó una concentración de NaOH de 10M, lo cual es más notorio para las relaciones SA/CV=0.55 y 0.6.
- Los mayores valores de resistencia a flexión se presentaron cuando se usó una relación SA/CV=0.5 y concentración de NaOH de 10M llegando hasta los 5.5 MPa.
- Los mayores valores de resistencia a compresión (entre 18 y 20 MPa) se obtuvieron cuando se usó una relación SA/CV=0.5, para ambas concentraciones de NaOH, y cuando se utilizó una relación SA/CV=0.55 y una concentración de 10M.
- Todas las mezclas estudiadas rebasan el límite NMX-C-404 de 7 MPa requerido para piezas de mampostería tradicional (bloque hueco de concreto, tabique hueco, macizo y multiperforado) de uso estructural.
- Para el límite NMX-C-404 de 12 MPa correspondiente a bloque macizo (de concreto), bloque multiperforado y tabique multiperforado (largo <300 mm), sólo cuatro mezclas cumplen: las tres mezclas de concentración 10M y la mezcla de relación SA/CV= 0.5 y 8M de concentración de NaOH.
- Conforme a los límites mínimos de resistencia a compresión requeridos por la norma NMX-C-441 para piezas de mampostería de uso no estructural (muros no portantes), todas las mezclas estudiadas rebasan los límites mínimos para pieza tradicionales.

- Ninguna de las mezclas estudiadas rebasa los límites máximos de absorción que establece NMX-C-404 para piezas de mampostería estructural y la NMX-C-441 para piezas de mampostería no estructural.
- Las densidades de las mezclas estudiadas son superiores a las densidades de piezas de mampostería de arcilla artesanal, extruida o prensada pero son menores a las densidades típicas de las piezas de block de concreto.
- Sólo dos mezclas cumplen con el límite de contracción establecido por NMX-C-404 ($<0.065\%$): la mezcla hecha con relación SA/CV=0.5 y 8M, y la mezcla hecha con relación SA/CV=0.55 y 8M.
- Dos mezclas (SA/CV=0.5 – 8M, y SA/CV=0.55 – 8M) cumplen con todas las características físicas dentro de los límites NMX-C-404 para ser usadas como mampostería estructural para edificaciones.
- Todas las mezclas cumplen con todas las características físicas dentro de los límites NMX-C-441 para ser usadas como mampostería no estructural para edificaciones.
- Las tres propuestas de aplicación en muro (MURO-GP-1, MURO-GP-2 y MURO-GP-3), con las mezclas geopoliméricas que cumplen NMX-C-404 (FA58 y FA558), representan reducciones de K significativas ($>10\%$), con respecto a los sistemas de muro tradicionales (MURO 1 y MURO 2).
- La propuesta de aplicación en losa (LOSA-GP-1), representa una reducción de K de 6% y 6.4% para FA58 y FA558, respectivamente, comparado con el sistema tradicional de losa (LOSA 1).
- Los elementos prefabricados con geopolímero base ceniza volante presentan características físicas y funcionales que garantizan su potencial uso en envolventes de edificaciones térmica y mecánicamente eficientes, con lo cual se confirma la hipótesis planteada.

6.2.- Recomendaciones.

La principal recomendación es que como trabajo futuro se realice un estudio de factibilidad técnica, operacional y económica de una planta para producción de prefabricados (placas y mampostería) a base de mortero geopolimérico, con lo cual se podrán determinar otras variables importantes para la implementación como la rentabilidad, el costo de producción y precio de las piezas y el periodo de recuperación de la inversión.

Referencias documentales y bibliografía complementaria.

- [1] GARTNER, E. Industrially interesting approaches to “low-CO₂” cements. *Cement and concrete research*, 2004, 34(9), 1489-1498.
- [2] CHITHAMBARAM, S. J., S. KUMAR AND M. PRASAD Thermo-mechanical characteristics of geopolymer mortar. *Construction and Building Materials*, 2019, 213, 100-108.
- [3] BOSOGA, A., O. MASEK AND J. E. OAKLEY CO₂ capture technologies for cement industry. *Energy procedia*, 2009, 1(1), 133-140.
- [4] MALHOTRA, V. M. AND P. K. MEHTA *High-performance, high-volume fly ash concrete: materials, mixture proportioning, properties, construction practice, and case histories*. Edtion ed.: Supplementary Cementing Materials for Sustainable Development, Incorporated, 2002. ISBN 097315070X.
- [5] UL HAQ, E., S. K. PADMANABHAN AND A. LICCIULLI Synthesis and characteristics of fly ash and bottom ash based geopolymers—A comparative study. *Ceramics International*, 2014, 40(2), 2965-2971.
- [6] KOMLIJENOVIC, M., Z. BAŠČAREVIC AND V. BRADIC Mechanical and microstructural properties of alkali-activated fly ash geopolymers. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 181(1-3), 35-42.
- [7] MEBRATU, D. Sustainability and sustainable development: historical and conceptual review. *Environmental impact assessment review*, 1998, 18(6), 493-520.
- [8] TEMUJIN, J., A. VAN RIESSEN AND K. MACKENZIE Preparation and characterisation of fly ash based geopolymer mortars. *Construction and Building Materials*, 2010, 24(10), 1906-1910.
- [9] KANG, H. J., G. S. RYU, G. T. KOH, S. T. KANG, et al. Relationship between microscopic structures and compressive strength of alkali-activated fly ash mortar. In *Key Engineering Materials*. Trans Tech Publ, 2011, vol. 452, p. 737-740.
- [10] THOKCHOM, S., D. DUTTA AND S. GHOSH Effect of incorporating silica fume in fly ash geopolymers. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 2011, 60, 243-247.
- [11] DE VARGAS, A. S., D. C. DAL MOLIN, A. C. VILELA, F. J. DA SILVA, et al. The effects of Na₂O/SiO₂ molar ratio, curing temperature and age on compressive strength, morphology and microstructure of alkali-activated fly ash-based geopolymers. *Cement and Concrete Composites*, 2011, 33(6), 653-660.
- [12] SREEVIDYA, V., R. ANURADHA, T. THOMAS AND R. VENKATASUBRAMANI Durability Studies on Fly Ash Based Geopolymer Mortar Cured in Ambient Condition. *Asian Journal of Chemistry*, 2012, 25(4), 0000-0000.
- [13] GHOSH, K. AND P. GHOSH Effect Of Na₂O/Al₂O₃, SiO₂/Al₂O₃ And W/B ratio on setting time and workability of flyash based geopolymer. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 2012, 2(4), 2142-2147.
- [14] SREEVIDYA, V., R. ANURADHA AND R. VENKATASUBRAMANI Strength study on fly ash-based geopolymer mortar. *Asian Journal of Chemistry*, 2012, 24(7), 3255.
- [15] RYU, G. S., Y. B. LEE, K. T. KOH AND Y. S. CHUNG The mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with alkaline activators. *Construction and Building Materials*, 2013, 47, 409-418.

- [16] LASTNOSTI, M. I. M., G. V. I. M. I. LETE AND E. PEPELA Mechanical and microstructural properties of the fly-ash-based geopolymer paste and mortar. *Materiali in tehnologije*, 2013, 47(4), 535-540.
- [17] GÖRHAN, G. AND G. KÜRKLÜ The influence of the NaOH solution on the properties of the fly ash-based geopolymer mortar cured at different temperatures. *Composites part b: engineering*, 2014, 58, 371-377.
- [18] ISLAM, A., U. J. ALENGARAM, M. Z. JUMAAT AND I. I. BASHAR The development of compressive strength of ground granulated blast furnace slag-palm oil fuel ash-fly ash based geopolymer mortar. *Materials & Design (1980-2015)*, 2014, 56, 833-841.
- [19] RANJBAR, N., M. MEHRALI, A. BEHNIA, U. J. ALENGARAM, et al. Compressive strength and microstructural analysis of fly ash/palm oil fuel ash based geopolymer mortar. *Materials & Design*, 2014, 59, 532-539.
- [20] PATANKAR, S. V., Y. M. GHUGAL AND S. S. JAMKAR Effect of concentration of sodium hydroxide and degree of heat curing on fly ash-based geopolymer mortar. *Indian Journal of Materials Science*, 2014, 2014.
- [21] MORSY, M., S. ALSAYED, Y. AL-SALLOUM AND T. ALMUSALLAM Effect of sodium silicate to sodium hydroxide ratios on strength and microstructure of fly ash geopolymer binder. *Arabian journal for science and engineering*, 2014, 39(6), 4333-4339.
- [22] RAO, G. M. AND T. G. RAO Final setting time and compressive strength of fly ash and GGBS-based geopolymer paste and mortar. *Arabian journal for science and engineering*, 2015, 40(11), 3067-3074.
- [23] ATIŞ, C., E. GÖRÜR, O. KARAHAN, C. BILIM, et al. Very high strength (120 MPa) class F fly ash geopolymer mortar activated at different NaOH amount, heat curing temperature and heat curing duration. *Construction and Building Materials*, 2015, 96, 673-678.
- [24] NIKOLIĆ, V., M. KOMLIJENOVIC, Z. BAŠČAREVIĆ, N. MARJANOVIĆ, et al. The influence of fly ash characteristics and reaction conditions on strength and structure of geopolymers. *Construction and Building Materials*, 2015, 94, 361-370.
- [25] SHINDE, B. AND K. KADAM. Properties of Fly Ash Based Geopolymer Mortar with Ambient Curing. In *Proceeding of the 2nd National Conference of Innovations in Civil Engineering*. 2016, p. 203-206.
- [26] CHUAH, S., W. DUAN, Z. PAN, E. HUNTER, et al. The properties of fly ash based geopolymer mortars made with dune sand. *Materials & Design*, 2016, 92, 571-578.
- [27] YAN, S. AND K. SAGOE-CRENTSIL Evaluation of fly ash geopolymer mortar incorporating calcined wastewater sludge. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 2016, 5(6), 370-380.
- [28] HARMAJI, A. AND B. SUNENDAR. Utilization of Fly Ash, Red Mud, and Electric Arc Furnace Dust Slag for Geopolymer. In *Materials Science Forum*. Trans Tech Publ, 2016, vol. 841, p. 157-161.
- [29] SAXENA, S., M. KUMAR AND N. SINGH Fire resistant properties of alumino silicate geopolymer cement mortars. *Materials Today: Proceedings*, 2017, 4(4), 5605-5612.
- [30] ZAHID, M., N. SHAFIQ, M. F. NURUDDIN, E. NIKBAKHT, et al. Effect of partial replacement of fly ash by metakaolin on strength development of fly ash based geopolymer mortar. In *Key Engineering Materials*. Trans Tech Publ, 2017, vol. 744, p. 131-135.

- [31] MERMERDAŞ, K., S. MANGURI, D. E. NASSANI AND S. M. OLEIWI Effect of aggregate properties on the mechanical and absorption characteristics of geopolymer mortar. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 2017, 20(6), 1642-1652.
- [32] SAXENA, S. K., M. KUMAR AND N. B. SINGH Influence of alkali solutions on properties of pond fly ash-based geopolymer mortar cured under different conditions. *Advances in Cement Research*, 2018, 30(1), 1-7.
- [33] MURALI, K., T. MEENA AND P. P. SAI An experimental study on factors influencing the compressive strength of geopolymer mortar. *Technology*, 2018, 9(1), 608-616.
- [34] BOHRA, V. K. J., R. NERELLA AND S. R. C. MADDURU Material properties, processing & characterization of fly ash based geopolymer. *Materials Today: Proceedings*, 2019, 19, 2617-2621.
- [35] NERGIS, D. D. B., P. VIZUREANU AND O. CORBU Synthesis and characteristics of local fly ash based geopolymers mixed with natural aggregates. *Rev. Chim. Bucharest*, 2019, 70(4).
- [36] KAYA, M., M. UYSAL, K. YILMAZ, O. KARAHAN, et al. Mechanical properties of class C and F fly ash geopolymer mortars. *GRADEVINAR*, 2020, 72(4), 297-309.
- [37] JENA, S. AND R. PANIGRAHI. Experimental Investigations on Fly Ash Geopolymer Mortar. In *Advances in Sustainable Construction Materials and Geotechnical Engineering*. Springer, 2020, p. 29-37.
- [38] GLUKHOVSKY, V. Soil silicates. Gosstroyizdat, Kiev, 1959, 154.
- [39] DAVIDOVITS, J. Transfer and Exploitation of Scientific and Technical Information. EUR, 1982, 7716, 316.
- [40] PROVIS, J. L. AND J. S. J. VAN DEVENTER *Geopolymers: structures, processing, properties and industrial applications*. Edition ed.: Elsevier, 2009. ISBN 1845696387.
- [41] ROBAYO-SALAZAR, R. A. AND R. M. DE GUTIÉRREZ Natural volcanic pozzolans as an available raw material for alkali-activated materials in the foreseeable future: A review. *Construction and Building Materials*, 2018, 189, 109-118.
- [42] VU, T. H. AND N. GOWRIPALAN Mechanisms of heavy metal immobilisation using geopolymerisation techniques—a review. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2018, 16(3), 124-135.
- [43] ZHUANG, X. Y., L. CHEN, S. KOMARNENI, C. H. ZHOU, et al. Fly ash-based geopolymer: clean production, properties and applications. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 125, 253-267.
- [44] DAVIDOVITS, J. Properties of geopolymer cements. In *First international conference on alkaline cements and concretes*. Scientific Research Institute on Binders and Materials Kiev, Ukraine, 1994, vol. 1, p. 131-149; DAVIDOVITS, J. *Geopolymer chemistry and applications*. Edition ed.: Geopolymer Institute, 2008. ISBN 2951482019.
- [45] DAVIDOVITS, J. Mineral polymers and methods of making them. In.: Google Patents, 1982; PALOMO, A., M. GRUTZECK AND M. BLANCO Alkali-activated fly ashes: a cement for the future. *Cement and concrete research*, 1999, 29(8), 1323-1329.
- [46] DEL GOBIERNO, P. Real Decreto 1247/2008, de 18 de julio, por el que se aprueba la instrucción de hormigón estructural (EHE-08). *Boletín Oficial del Estado*, 2008, (203), 35176-35178.
- [47] STANDARD, A. C618. ASTM International: Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. West Conshohocken, PA, 2012.

- [48] ASINEL. Las cenizas volantes y sus aplicaciones (Fly Ashes and their Applications. In.: Asociación de Investigación Industrial Eléctica Madrid, 1987.
- [49] ALONSO RAMÍREZ, J. AND M. L. C. D. E. Y. M. CENTRO DE ESTUDIOS Y EXPERIMENTACION DE OBRAS PUBLICAS-CEDEX Origenes, tipos y caracterización de las cenizas volantes. Mopu CEDEX. Madrid, 1990.
- [50] MINNICK, L. Reactions of calcium and magnesium compounds with pulverized coal fly ash. The Ann Meet. of Amer. Inst.-Minnig, Metallurgical and Petroleum Engrs. New York, 1-968.
- [51] GARCIA ROSSELLÓ, J. Las cenizas volantes en los hormigones para presas. In.: Madrid, 1987.
- [52] CABRERA, J. AND A. CUSENS *The use of PFA in concrete*. Edtion ed.: Leeds University, Department of Civil Engineering, 1982.
- [53] DUTT, K. S., K. V. KUMAR, I. S. KISHORE AND C. M. CHOWDARY A case study on fly ash based geo-polymer concrete. International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT), 2016, 34.
- [54] DAS, S., A. MOHAPATRA AND A. RATH Geopolymer concrete—green concrete for the future—a review. International Journal of Civil Engineering Research, 2014, 5(1), 21-28.
- [55] DEPARTAMENTO DE SALUD Y SERVICIOS HUMANOS DE LOS EE.UU., S. D. S. P. A. P. S. T. Y. E. R. D. E. HYDRÓXIDO DE SODIO (Sodium Hydroxide) CAS # 1310-73-2. In., 2002.
- [56] SILICATOS Y DERIVADOS, S. A. D. C. V. In. Insurgentes Sur 1070, Col. Insurgentes San Borja 2018, vol. 2020.
- [57] ABDULLAH, M., W. IBRAHIM AND M. TAHIR. The properties and durability of fly ash-based geopolymeric masonry bricks. In *Eco-Efficient Masonry Bricks and Blocks*. Elsevier, 2015, p. 273-287.
- [58] CLEVELAND, C. J. AND C. G. MORRIS. Building envelopergy. Expanded Edition. In.: Burlington: Elsevier, 2009.
- [59] ASTM, C. Standard test method for fundamental transverse, longitudinal, and torsional resonant frequencies of concrete specimens. Annual book of ASTM standards, 2008; GAIDIS, J. AND A. ROSENBERG New test for determining fundamental frequencies of concrete. Cement, concrete and aggregates, 1986, 8(2), 117-119.
- [60] ASTM Standard practice for use of apparatus for the determination of length change of hardened cement paste, mortar, and concrete 2009.
- [61] ASTM, A. C348-14 Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars, ASTM Int. West Conshohocken.
- [62] ASTM. ASTM C349-08: Standard test method for compressive strength of hydraulic-cement mortars (using portions of prisms broken in flexure). In.: ASTM International West Conshohocken, PA, USA, 2008; NEVILLE, A. Tecnología del concreto. Tomo I. Ciudad de México, México, Limusa, 1998.
- [63] WORRELL, E., L. PRICE, N. MARTIN, C. HENDRIKS, et al. Carbon dioxide emissions from the global cement industry. Annual review of energy and the environment, 2001, 26(1), 303-329.
- [64] ZHANG, Z., Y. C. WONG, A. ARULRAJAH AND S. HORPIBULSUK A review of studies on bricks using alternative materials and approaches. Construction and Building Materials, 2018, 188, 1101-1118.

- [65] HWANG, C.-L. AND T.-P. HUYNH Investigation into the use of unground rice husk ash to produce eco-friendly construction bricks. *Construction and Building Materials*, 2015, 93, 335-341.
- [66] SUKMAK, P., S. HORPIBULSUK, S.-L. SHEN, P. CHINDAPRASIRT, et al. Factors influencing strength development in clay-fly ash geopolymer. *Construction and Building Materials*, 2013, 47, 1125-1136.
- [67] BARBOSA, C. AND J. HANAI. Strength and deformability of hollow concrete blocks and their correlation to mechanical properties of constituent material. MSc Thesis, University of Sao Paulo, Sao Carlos, Brazil. 153 pp. Available ..., 2004.
- [68] NALON, G. H., R. O. G. MARTINS, R. D. C. S. S. A. ALVARENGA, G. E. S. D. LIMA, et al. Effect of specimens' shape and size on the determination of compressive strength and deformability of cement-lime mortars. *Materials Research*, 2017, 20, 819-825.
- [69] HAQ, E. U., S. K. PADMANABHAN AND A. LICCIULLI In-situ carbonation of alkali activated fly ash geopolymer. *Construction and Building Materials*, 2014, 66, 781-786.
- [70] KALAW, M. E., A. CULABA, H. HINODE, W. KURNIAWAN, et al. Optimizing and characterizing geopolymers from ternary blend of Philippine coal fly ash, coal bottom ash and rice hull ash. *Materials*, 2016, 9(7), 580.
- [71] NARAYANAN, A. AND P. SHANMUGASUNDARAM An experimental investigation on flyash-based geopolymer mortar under different curing regime for thermal analysis. *Energy and Buildings*, 2017, 138, 539-545.
- [72] COLANGELO, F., R. CIOFFI, G. ROVIELLO, I. CAPASSO, et al. Thermal cycling stability of fly ash based geopolymer mortars. *Composites part b: engineering*, 2017, 129, 11-17.
- [73] RASHAD, A. M. Insulating and fire-resistant behaviour of metakaolin and fly ash geopolymer mortars. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Construction Materials*, 2019, 172(1), 37-44.
- [74] FAN, F., Z. LIU, G. XU, H. PENG, et al. Mechanical and thermal properties of fly ash based geopolymers. *Construction and Building Materials*, 2018, 160, 66-81.
- [75] JAYA, N. A., L. YUN-MING, H. CHENG-YONG, M. M. A. B. ABDULLAH, et al. Correlation between pore structure, compressive strength and thermal conductivity of porous metakaolin geopolymer. *Construction and Building Materials*, 2020, 247, 118641.

Anexos

Anexo 1. Valores de Conductividad y Aislamiento Térmico de Diversos Materiales

(Apéndice D - NOM-020-ENER-2011)

Material	Material Densidad kg/m ³	Conductividad térmica (λ) W/mK	Aislamiento térmico (M) m ² K/W
TABIQUE ROJO COCIDO COMÚN			
* al exterior	2000	0.87	-----
* con recubrimiento impermeable por fuera	-----	0.77	-----
* al interior	-----	0.70	-----
TABIQUE DE BARRO EXTRUIDO			
* Sólido vidriado, para acabado exterior	2050	1.28	-----
* Bloque hueco vertical (60 a 67% sólido)	2050	1.00	-----
* Bloque hueco vertical, relleno con vermiculita	2050	0.58	
TABIQUE LIGERO CON RECUBRIMIENTO IMPERMEABLE POR FUERA			
* densidad	1600	0.70	-----
* densidad	1400	0.58	-----
* densidad	1200	0.52	-----
* densidad	1000	0.41	-----
Tabique ligero al exterior	1600	0.81	-----
BLOQUE DE CONCRETO CELULAR CURADO C/AUTOCLAVE			
* densidad	450	0.12	-----
* densidad	500	0.19	-----
* densidad	600	0.21	-----
BLOQUE DE CONCRETO			
* 20 cm de espesor, 2 o 3 huecos	1700	-----	0.18
* el mismo con perlita	1700	-----	0.36
* el mismo con vermiculita	1700	-----	0.3
CONCRETO			
* armado	2300	1740.00	-----
* simple al exterior	2200	1650.00	-----
* ligero al exterior	1250	0.70	-----
* ligero al interior	1250	0.58	-----
MORTERO			
* cemento arena	2000	0.87	-----
* con vermiculita	500	-----	-----
* con arcilla expandida	750	-----	-----
Asbesto cemento, placa	1800	0.58	-----
Asbesto cemento, placa	1800	0.58	-----

Material	Material Densidad kg/m ³	Conductividad térmica (λ) W/mK	Aislamiento térmico (M) m ² K/W
Asbesto cemento, placa	1360	0.25	-----
BLOQUE			
* de tepetate o arenisca calcárea al exterior	-----	1.05	-----
* de tepetate o arenisca calcárea al interior	-----	0.93	-----
* de adobe al exterior	-----	0.93	-----
* de adobe al interior	-----	0.58	-----
PIEDRA			
* Caliza	2180	1.40	-----
* Granito, basalto	2600	1.50	-----
* Mármol	2500	2.00	-----
* Pizarra	2700	2.00	-----
* Arenisca	2000	1.30	-----
MADERA			
* Viruta aglutinada (Pamacón)	700	0.16	-----
* Blanda	610	0.13	-----
* dura	700	0.15	-----
VIDRIO			
* Sencillo	2200	0.93	-----
* Sencillo	2700	1.16	-----
METALES			
* Aluminio	2700	204.00	-----
* Cobre	8900	372.20	-----
* Acero y fierro	7800	52.30	-----
MATERIAL DE RECUBRIMIENTO			
Tablero de triplay	-----	0.12	-----
* Espesor 0,64 cm	-----	-----	0.055
* Espesor 0,96 cm	-----	-----	0.083
* Espesor 1,27 cm	-----	-----	0.11
* Espesor 1,60 cm	-----	-----	0.137
* Espesor 1,90 cm	-----	-----	0.165
TABLERO DE YESO			
* Espesor 0,96 cm	-----	-----	0.057
* Espesor 1,27 cm	-----	-----	0.083
* Espesor 1,69 cm	-----	-----	0.11
APLANADOS			
* Yeso	800	0.37	-----
* Mortero de cal al exterior	-----	0.87	-----
* Mortero de cal al interior	-----	0.70	-----
* Tezontle	-----	0.19	-----

Material	Material Densidad kg/m ³	Conductividad térmica (λ) W/mK	Aislamiento térmico (M) m ² K/W
* Arena seca, limpia	1700	0.41	-----
PLACAS			
* Tierra, arena o grava expuesta a la lluvia	-----	2.36	-----
* Terrados secos en azoteas	-----	0.58	-----
Azulejos y mosaicos	-----	1.05	-----
Ladrillo exterior	-----	0.87	-----
Ladrillo exterior con recubrimiento impermeabilizado por fuera	-----	0.77	-----
MADERA (HUMEDAD 12%)			
* Pino	663	0.16	-----
* Cedro	505	0.13	-----
* Roble	753	0.18	-----
* Fresno	674	0.16	-----
AISLANTES TÉRMICOS			
Membranas asfálticas	1127	0.17	-----
Asfalto bituminoso	1050	0.17	-----
Fieltro de papel permeable	-----	-----	0.011