

**MORTERO GEOPOLIMERICO ALIGERADO CON ESPUMA
RIGIDA DE POLIURETANO**

RICHARD GONZÁLEZ ZULUAGA

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniería Civil

**José William Restrepo Montoya Docente-Investigador
área de materiales**

Ingeniero de Metalúrgico, PhD.



**UNIVERSIDAD EIA
PROGRAMAS ACADÉMICOS EN LOS QUE SE ENMARCA
ENVIGADO
2018**

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN.....	1
1. PRELIMINARES.....	3
1.1 Planteamiento del problema	3
1.2 Objetivos del proyecto	5
1.2.1 Objetivo General.....	5
1.2.2 Objetivos Específicos	5
1.3 Marco de referencia.....	5
1.3.1 Mezcla de concreto	5
1.3.2 Espuma de poliuretano.....	7
1.3.3 Cenizas Volantes.....	10
1.3.4 Geopolímeros.....	12
1.3.5 Prefabricados	15
2. METODOLOGÍA.....	17
2.1 Proceso elaboración mortero geopolimérico.....	18
2.2 Diseño de la mezcla geopolimérica de referencia.....	18
2.3 Reglamentación vigente para asegurar calidad de los resultados.....	21
2.4 Caracterización de las materias primas	23
2.4.1 Ceniza Volante	23
2.4.2 Agregado o árido pétreo.....	23
2.4.3 Espuma rígida de poliuretano - PUR	26
2.4.4 Silicato de sodio Na_2SiO_3	27
2.4.5 Hidróxido de sodio - NaOH.....	27

2.5	Procesos	27
2.5.1	Proceso de elaboración de solución alcalina 14 M	27
2.6	Dosificación	27
2.6.1	Elaboración de las probetas para ensayos	29
2.6.2	Conformación de probetas.	33
2.7	Curado	34
2.8	Ensayos.....	35
3.	PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	37
3.1	Caracterización de las materias primas	37
	Ceniza volante	37
	Granulometría.....	38
	Densidad seca aparente	39
3.2	Comportamiento mecánico de morteros geopoliméricos	40
3.2.1	Densidad de mortero geopolimérico de referencia y sustituciones parciales de arena por PUR curado a temperatura ambiente	40
3.2.2	Resistencia de mortero geopolimérico de referencia y sustituciones parciales de arena por PUR curado a temperatura ambiente.....	42
3.2.3	Influencia de la densidad sobre la resistencia a compresión.....	45
3.2.4	Influencia de la variable curado al horno de las muestras.....	47
3.2.5	Ensayo de conductividad térmica	48
3.3	Análisis de resultados	50
3.3.1	Influencia del contenido de PUR sobre la densidad.....	50
3.3.2	Influencia del contenido de PUR sobre la resistencia a la compresión	51
3.3.3	Variación de la resistencia específica en función del contenido de PUR	52
3.3.1	Influencia del método de curado sobre la resistencia a la compresión.....	52

3.3.2	Influencia del contenido de residuos de PUR sobre la conductividad térmica	54
3.3.3	Influencia del contenido de residuos de PUR sobre el aislamiento acústico	55
4.	CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES	56
5.	REFERENCIAS	58
6.	ANEXOS	60

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Valores de resistencia térmica en $m^2 K / W$, Tabla tomada de ATEPA.....	8
Tabla 2. Coeficiente de absorción de poliuretano proyectado en función de la frecuencia, Tabla tomada de ATEPA	8
Tabla 3. Especificaciones químicas y físicas recomendadas por la ASTM C618-05, para la utilización de cenizas volantes como adición en el hormigón. Tomado de (Tesina Erich Rodríguez, 2009)	12
Tabla 4. NTC guías para ésta tesis.....	16
Tabla 5. Referencias bibliográficas consultadas para determinar muestra geopolimérica de referencia	18
Tabla 6. Fuentes bibliográficas y Resultados obtenidos.....	19
Tabla 7. Proporciones y condiciones de mezcla geopolimérica de referencia diseñada ..	20
Tabla 8. Norma NTC asociada a cada proceso para la elaboración y ensayo de una mezcla	22
Tabla 9. Dosificación de la mezcla.....	29
Tabla 10. Distribución de mezclas a experimentar	29
Tabla 11. Volumen de probetas a usar	30
Tabla 12. Cantidades por cada probeta para resistencia a la compresión	30
Tabla 13. Cantidades por cada probeta para ensayo de conductividad térmica.....	30
Tabla 14. Composición elemental de la ceniza volante EDS	37
Tabla 15. Límites agregado fino.....	38
Tabla 16. Curva granulométrica Arena y PUR	38
Tabla 17. Densidad seca aparente de las materias primas.....	39
Tabla 26. Compendio de información mezclas geopoliméricas.....	45
Tabla 27. Resistencia a compresión muestras curadas al horno	47

Tabla 28. Recopilación de datos experimentales placas calientes en la cara fría	49
Tabla 18. Densidad muestra geopolimérica patrón en 3, 14 y 28 días	74
Tabla 20. Densidad muestra geopolimérica PUR25 en 3, 14 y 28 días.....	74
Tabla 22. Densidad muestras geopoliméricas PUR30 en función del periodo de curado.	74
Tabla 24. Densidad muestras geopoliméricas PUR40 en función del periodo de curado.	75
Tabla 19. Resistencia muestras geopoliméricas patrón en función del periodo de curado	75
Tabla 21. Resistencia muestras geopoliméricas PUR25 en función del periodo de curado	75
Tabla 23. Resistencia muestras geopoliméricas PUR30 en función del periodo de curado	76
Tabla 25. Resistencia muestras geopoliméricas PUR40 en función del periodo de curado	76

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Efecto de la relación agua-cemento en la resistencia a compresión y flexión del concreto (Nilson A. H, 2001)	6
Figura 2. Procesos de instalación láminas de PUR en viviendas y hogares. Imágenes tomadas de Archiexpo, Aislaconpoliuretano y Etelta.....	9
Figura 4. Diseño metodológico, tomado de fuente propia	17
Figura 5. Proceso toma de humedad de la muestra.....	24
Figura 6. Arena sin compactar en Beaker de volumen conocido. Imagen tomada de tecnoedificacion2014	25
Figura 8. Tamices para ensayo de granulometría	25
Figura 10. Proceso de transformación del residuo de PUR a materia prima para usar en la mezcla geopolimérica	26
Figura 11. Proceso elaboración mezcla geopolimérica	32
Figura 12. Proceso conformación de probetas.....	33
Figura 13. Muestras geopoliméricas para su dimensionamiento con pie de rey.....	34
Figura 14. Resistencia para curado en agua.....	35
Figura 15. Máquina a compresión del laboratorio de materiales EIA	35
Figura 16. Montaje ensayo de conductividad térmica	36
Figura 17. Microscopía SEM. FOV: 86.6 μm , Mode: 15kV - Image Full, Detector: BSD, Time: APR 16 2018 09:43	37
Figura 18. Distribución granulométrica de las muestras de arena y residuos de PUR usados en la mezcla geopolimérica	39
Figura 20. Curva granulométrica Arena y PUR	39
Figura 21. Densidad geopolimérica patrón mezcla en función del periodo de curado	40
Figura 22. Densidad mezcla geopolimérica PUR25 en función del periodo de curado.....	41
Figura 19. Densidad mezcla geopolimérica PUR30 en función del periodo de curado.....	41

Figura 24. Densidad mezcla geopolimérica PUR40 en función del periodo de curado.....	42
Figura 25. Resistencia mezcla geopolimérica patrón en función del tiempo de curado....	43
Figura 26. Resistencia mezcla geopolimérica PUR25 en función del tiempo de curado...	43
Figura 27. Resistencia mezcla geopolimérica PUR30 en función del tiempo de curado....	44
Figura 28. Resistencia mezcla geopolimérica PUR40 en función del tiempo de curado...	45
Figura 29. Variación de la resistencia con respecto a la densidad según el contenido de PUR a diferentes edades de curado	46
Figura 30. Resistencia compresión de morteros geopoliméricos curados a 80°por 24 horas	48
Figura 31. Conductividad térmica de morteros geopoliméricos conteniendo diferentes proporciones de residuos de PUR.	49
Figura 32. Densidad de cada una de las mezclas en los diferentes periodos de tiempo..	50
Figura 33. Resistencia a la compresión promedio en función del contenido de PUR para diferentes edades de curado	51
Figura 34. Variación de la resistencia de las muestras geopoliméricas en función de su densidad.....	52
Figura 35. Resistencia compresión de morteros geopoliméricos curados a 3 días a temperatura ambiente y curados a 80°por 24 horas	53
Figura 36. Resistencia compresión de morteros geopoliméricos curados a 14 días a temperatura ambiente y curados a 80°por 24 horas	54
Figura 37. Variación de la temperatura en las muestras geopoliméricas con la inclusión de residuos de PUR.....	55

GLOSARIO

Aditivo: material distinto del agua, de los agregados o del cemento hidráulico, utilizado como componente del concreto, y que se añade a éste antes o durante su mezclado con el fin de modificar sus propiedades.

Agregado: material granular, como arena, grava, piedra triturada y escoria de hierro de alto horno, empleado con un medio cementante para formar concreto o mortero hidráulico.

Asentamiento: resultado del ensayo de manejabilidad de una mezcla de concreto

Concreto: mezcla de cemento portland o cualquier otro cemento hidráulico, agregado fino, agregado grueso y agua, con o sin aditivos.

Concreto Liviano: concreto con agregado liviano que tiene una densidad de equilibrio, entre 1440 y 1840 kg/cm³

Pasta cementicia mezcla de conglomerante, agua, aire (naturalmente atrapado o intencionalmente incluido) y aditivos (cuando son añadidos).

Fraguado: proceso químico. Consiste en la evaporación del exceso de agua empleado en amasar la pasta, seguido de una sustitución del agua por el CO₂ de la atmósfera, pasando de nuevo del hidróxido del carbonato cálcico, cerrando de este modo el ciclo. Como el anhídrido carbónico seco no reaccionaría con el hidróxido cálcico seco, es necesario que exista algo de humedad presente.

Plasticidad: facilidad con que una mezcla se deja extender con la llana.

Granulometría: distribución de los tamaños de las partículas que constituyen una masa de agregados. Se determina mediante el análisis granulométrico que consiste en dividir una muestra de agregado en fracciones de igual tamaño. La medida de la cuantía de cada una de estas fracciones es lo que se conoce como granulometría.

Módulo de Finura: factor empírico que permite estimar qué tan fino o grueso es un material. Está definido como la suma de los porcentajes retenidos acumulados en los tamices de la serie “estándar” que cumplen la relación 1:2, desde el tamiz de 149 (Nº 100) en adelante, hasta el máximo tamaño que se encuentre, dividido por 100.

Manejabilidad o Trabajabilidad: se determina por su capacidad para colocar la mezcla apropiadamente o su facilidad de dejarse moldear o trabajar sin perder sus propiedades mecánicas.

Consistencia: estado de fluidez del mortero, es decir, que tan dura (seca) o blanda (fluida) es una mezcla de mortero cuando se encuentra en estado plástico.

Relación Agua – Cemento: cantidad de agua utilizada por cantidad unitaria de cemento, para un conjunto dado de materiales y de condiciones. Esta dada en peso.

Durabilidad: resistencia a los agentes externos tales como las bajas temperaturas, la penetración de agua, desgaste por abrasión, retracción al secado, eflorescencias, agentes corrosivos, o choques térmicos, entre otros, sin deterioro de sus condiciones físico – químicas con el tiempo.

Retracción: se debe principalmente a las reacciones químicas de hidratación de la pasta, sobretodo en pastas puras con una alta relación agua-cemento.

Resistencia: una vez aplicado en obra, el mortero debe actuar como unión resistente. Se requiere una alta resistencia a la compresión cuando el mortero deba soportar cargas altas y sucesivas. Siendo ésta un indicio de las resistencias a tensiones de corte y a tensiones de tracción.

Porosidad: propiedad que tiene un cuerpo de presentar poros o huecos que pueden estar llenos de un líquido o un gas.

Permeabilidad: propiedad de dejarse atravesar por un fluido por filtración

RESUMEN

El sector moderno de la construcción es dinámico; de modo que constantemente, está buscando nuevas alternativas constructivas que contribuyan a introducir materiales de mejores prestaciones funcionales y favorecer al desarrollo de una construcción sostenible como lo pueden ser la sustitución de materiales comunes basados en los cementos hidráulicos tipo Portland y diferentes agregados, por geopolímeros y materiales de baja recuperación y contaminantes como lo son la espuma rígida de poliuretano (PUR) usado, para aislamiento térmico en edificaciones y plantas industriales, sistemas de calefacción y de refrigeración y sector automotor. En la mayoría de situaciones el PUR termina su ciclo de vida útil en los rellenos sanitarios, y dado que su degradación es muy lenta, genera una problemática ambiental y social por el tiempo tan elevada. El trabajo exploratorio presentado en este informe de trabajo de grado, se alinea con la tendencia global de la construcción verde y sostenible, desarrollando un material ambiental y económicamente sostenible que doten la edificación de viviendas y otros espacios físicos de resiliencia y ofrezcan a sus habitantes y usuarios mayor confort. Por lo tanto, se presenta como objetivo, de este trabajo de grado exploratorio, la posibilidad del uso de residuos de poliuretano expandido aglomerado con una mezcla geopolimérica de cenizas volantes del carbón activadas alcalinamente, para producir un concreto aligerado con propiedades de aislamiento térmico y acústico, que permita la confección de productos prefabricados o in situ para el sector constructor.

Palabras clave: Geopolímero, Resistencia, Mezcla, Activador Alcalino, Puzolana natural, Espuma rígida de poliuretano.

ABSTRACT

The modern construction sector is dynamic; so that constantly, is looking for new constructive alternatives that contribute to introduce materials of better functional benefits and favor the development of a sustainable construction as they can be the substitution of common materials based on Portland type hydraulic cements and different aggregates, by geopolymers and materials of low recovery and contaminants such as the rigid polyurethane foam (PUR) used, for thermal insulation in buildings and industrial plants, heating and cooling systems and automotive sector. In most situations, the PUR ends its useful life cycle in landfills, and since its degradation is very slow, it generates an environmental and social problem for such a long time. The exploratory work presented in this thesis report, is aligned with the global trend of green and sustainable construction, developing an environmentally and economically sustainable material that endow the building of houses and other physical spaces of resilience and offer to its inhabitants and users greater comfort. Therefore, the objective of this exploratory-grade work is the possibility of using agglomerated expanded polyurethane waste with a geopolymer mixture of alkaline activated fly ash, to produce a lightened concrete with thermal and acoustic insulation properties, that allows the manufacture of prefabricated products or in situ for the construction sector.

Keywords: GeopolimERIC, Resistance, Mixture, Alkaline Activator, Fly ash, Rigid Polyurethane Foam

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la producción de cemento Portland libera grandes cantidades de CO₂. El clínker, que resulta de la calcinación del carbonato de calcio y de un material silíceo, produce CO₂. La generación de una tonelada de cemento, lleva asociada la emisión de 0,55 Toneladas correspondientes a CO₂ químico, y el cual, junto con la combustión del carbón combustible, libera 0,4 Toneladas. Así, se dice que por 1 Tonelada de cemento se libera 1 Tonelada de dióxido de carbono. Producto de esto, se ha logrado obtener a nivel mundial emisiones entre el 5% y el 7% de la totalidad de emisiones de CO₂, sólo por la industria cementera (Van den Heede & De Belie, 2012).

Los cementos geopoliméricos buscan ser una alternativa que apunta a resolver dichas problemáticas. Para la confección de este tipo en particular de cemento, se requiere de una fuente de aluminosilicatos, que debe poseer una elevada cantidad de sílice y alúmina, así como también de una solución alcalina, compuesta de una solución de hidróxido de sodio y de una solución de silicato de sodio. Dentro de los aluminosilicatos que se pueden utilizar como fuente, se encuentran las puzolanas naturales, la ceniza volante, las escorias producidas en las industrias metalúrgicas, metacaolín, entre otros (Davidovits, 1982) (Davidovits J. , 2008).

Dentro de los principales beneficios de los geopolímeros, destacan la utilización de menor cantidad de materias primas en base a calcio, así como las bajas temperaturas para su fabricación (750°C), cuyas temperaturas son menores a aquellas que se alcanzan con los cementos Portland (1400°C). Como consecuencia, las emisiones de CO₂ disminuyen entre un 80% a un 90% para los cementos geopoliméricos manufacturados en comparación con el actual cemento Portland (Torres-Carrasco & Puertas, 2017) (Van den Heede P, 2012.)

Por otro lado se sabe que la espuma rígida de poliuretano constituye un impacto ambiental por no biodegradarse fácilmente y que por su alta demanda en la industria, se trata de una problemática en el largo plazo. Su reutilización hacer que el PUR se convierta en un material susceptible de transformarse industrialmente en un producto que aporte a los concretos verdes gracias a sus condiciones de bajo peso, buen aislante térmico y comportamiento acústico, contribuyendo a la economía circular donde después de utilizado y desechado puede reintegrarse en un sector tan amplio y con tanta demanda como la construcción.

Existen varios estudios donde se busca explorar las propiedades que adosa el PUR al concreto con su inclusión en la mezcla, como: "Properties of lightweight high calcium fly ash geopolymer concretes containing recycled packaging foam", "Valorization of coarse rigid polyurethane foam waste in lightweight aggregate concrete", "Polyurethane foam as aggregate for thermal insulating mortars and lightweight concrete", "Morteros aligerados con residuos de espumas rígidas de poliuretano. Obtención, caracterización y puesta en obra", entre otros, donde se obtienen resultados altamente satisfactorios e inducen realizar una investigación más profunda. (Patcharapol, y otros, 2015) (P. Mounanga, 2008) (Petrement & Junco, 2012) (Vaclavik & al, 2012)

La descripción del trabajo exploratorio efectuado, que contiene este informe de trabajo de grado, se divide en cinco etapas:

- Estudio de literatura reciente en morteros geopoliméricos basados en cenizas volantes activados alcalinamente; además de hormigones con adiciones de PUR.
- Diseño del mortero geopolimérica basado en las dosificaciones que ofrecen mejores resistencias compresivas acorde a la literatura analizada.
- Búsqueda de proveedores y adquisición de materias prima, como fuentes de aluminosilicatos, catalizadores alcalinos, áridos y residuo de PUR.
- Fabricación de probetas para ensayos de caracterización, incluyendo resistencia a la compresión, absorción de agua, densidad, contracción, fluidez de mezcla, conductividad térmica.
- Análisis e interpretación de resultados contrastando con reportes de la literatura científica y académica ara utilizar conclusiones y recomendaciones.

1. PRELIMINARES

1.1 Planteamiento del problema

A partir de los años 30 del siglo pasado, se ha venido evidenciando una tasa de crecimiento en el área metropolitana de la ciudad de Medellín (Gonzalez, 2011) por el aumento en las tasas de natalidad y el proceso migratorio que viven las urbes de parte de las poblaciones rurales por personas en busca de nuevas oportunidades y por colombianos que vieron en Medellín una ciudad para hacer negocios y una ocasión de crear familia, siendo hoy por hoy la segunda ciudad más importante del país tanto económica como política, es por ésta razón que los ingenieros a través de la planeación, deben encontrar la manera más adecuada de dar estadía, albergue y confort a la nueva población migrante a través de estructuras y complejos edificables de mucha mayor envergadura, que permitan ubicar una porción mayor de personas en un mismo espacio por medio de estructuras y materiales cada vez más innovadores. En ese sentido se generan nuevos desafíos ingenieriles que logren unificar conceptos tan relevantes como espacio, costo y tiempo de construcción que permitan satisfacer las necesidades actuales del mercado y a su vez contribuyan con la solución a la problemática global que se vive actualmente por la basta generación de residuos de la industria mundial que contribuyen al calentamiento global y la huella de carbono.

Hoy en día, se está migrando hacia la construcción en seco utilizando diversos productos modulares que reducen los tiempos en obra con elementos prefabricados que lo que buscan es aligerar las losas a través de casetones minorando el volumen usado y recíprocamente la carga muerta en las estructuras. Muchos prefabricados de concreto contienen adiciones de plásticos post-consumo como PET, polietileno, llanta molida y poliestireno expandido (EPS), de los cuales se informa en varios estudios (Leal, 2000; Beltrán, 2013; Reyes, 2016), que pese reducir la resistencia mecánica del concreto, le confieren otras propiedades como menor densidad y mayores aislamientos térmico y acústico. Dicho esto, se puede decir que estos concretos ofrecen características que están en sintonía con las tendencias mundiales hacia la construcción sostenible con bioclimática y confort a sus usuarios. Fuera de esto, es posible reducir los costos de adquisición de los materiales de construcción lo cual se vería reflejado directamente en el costo final al cliente, las personas que desean adquirir vivienda nueva podrán mejorar su calidad de vida por reducir los costos de adquisición, contribuir a la disminución de la huella de carbono y por ende al cambio climático.

Por otro lado, con la amplia aplicación de materiales de espuma de poliuretano en la industria como es mueblería, aislamientos, refrigeración, entre otros, es necesario eliminar una gran cantidad de residuos producidos por este mismo material. Existen principalmente tres tipos de tecnologías de eliminación, vertederos, incineración y reciclaje. Según las estadísticas de la Asociación de la Industria del Poliuretano de China, uno de los países de mayor producción y demanda de este producto, el rendimiento de los productos de poliuretano en China crece rápidamente, en 2000 la producción anual fue de 1 millón de toneladas, alrededor de 3,5 millones de toneladas en 2007, pero en 2011 llegó a 7,5 millones de toneladas. (Geng & Feng, 2012). Como resultado, esta espuma en grandes cantidades es un desperdicio que requiere de un cuidado especial. Por esta razón la disposición de PUR en vertederos o rellenos afectan el medio ambiente, debido a que la densidad de acumulación de espuma de poliuretano es pequeña, de aproximadamente 30 kg/m³, el almacenamiento ocupará un gran

espacio y debido a su difícil degradación causará un efecto adverso por el desperdicio de tierra disponible en los rellenos. Adicionalmente el método de incineración de la espuma PUR resulta peligrosa, puesto que al hacerlo produce un gas contaminante a la atmosfera y a su vez nocivo para la salud.

De esta manera se hace necesario encontrar una forma de reutilización de la espuma rígida de poliuretano. La trituración es una forma muy efectiva de reciclaje solo cambiando su forma física. Las partículas sólidas no poseen actividad reactiva, por el contrario combinado con otros productos, como el mortero en este caso, puede generar nuevos componentes útiles en la industria y aprovechados por la construcción gracias a sus excelentes propiedades térmicas, acústicas y aligerantes. (Wenqing, Qingyin, & Shili, 2012)

En los últimos años la tendencia a conseguir construcciones y edificaciones amigables con el medio ambiente se ha vuelto una prioridad para el país, que inclusive en los últimos años se han radicado resoluciones de estricto cumplimiento que lo que buscan es fomentar el buen desarrollo sostenible de las ciudades y con esto el mejoramiento de la calidad de vida de todos los colombianos. Para esto se ha creado el Consejo Colombiano de Construcción Sostenible (CCCS) donde lo que busca es capacitar a los constructores y arquitectos colombianos a consecución de edificaciones sostenibles, estableciendo programas de apoyo como el siguiente:

En el marco del Programa Acelerador de Eficiencia Energética (Building Efficiency Accelerator, BEA) en Bogotá y con la participación de Miembros en los Grupo de Trabajo del Comité Técnico se está trabajando en el análisis y el impacto de estrategias de sostenibilidad en la implementación práctica de la Resolución 549/15 del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio (MVCT).

Como es conocido, el consumo de agua y energía en las edificaciones está condicionado por el diseño arquitectónico, los procesos constructivos y por los patrones de comportamiento de los usuarios. La "Guía para el ahorro de agua y energía" tiene como objetivo ofrecer una herramienta a diseñadores y constructores en la selección de medidas para reducir la demanda de estos recursos en las nuevas edificaciones de acuerdo a su uso y las condiciones climáticas de la región en la que se construya. La resolución es de obligatorio cumplimiento para Barranquilla, Bogotá, Cali y Medellín desde agosto de 2016, y a partir de agosto de 2017 tendrá aplicación para el resto del territorio nacional (CCCS, 2017).

Por lo anterior, se hace intrínsecamente necesario evaluar la vigencia que han cobrado el desarrollo de concretos con geopolímeros dada su condición de ser amigable con el planeta y con el cual se han venido desarrollando varios proyectos de gran envergadura como el pavimento que conforma el BWWA (Brisbane West Wellcamp Airport) además brinda un excelente método de construcción debido a su alta resistencia a la tracción en flexión, baja contracción y muy buenas características de trabajabilidad. Por otro lado, Joseph Dadovits, quien es pionero en el uso e investigación del concreto con geopolímeros, da a conocer que las antiguas construcciones romanas y las pirámides de Egipto fueron hechas con concretos geopoliméricos (Davidovits, 1982) con lo que se enmarca una línea de partida que permita al gremio de la construcción implementar un material capaz de brindar soluciones ambientales, que reduzca tanto el uso de recursos naturales como la contaminación al fabricarlo, de fácil manejo y adaptación, duraderos y que

además permita fomentar el desarrollo de una economía circular donde el impacto que se genera sea mínimo y su aprovechamiento máximo en una obra civil.

¿Es técnicamente factible desarrollar un mortero geopolimérico ligero con aislamiento acústico, sin detrimento considerable de su resistencia mecánica, que brinde a los usuarios mayor confort y economía?

1.2 Objetivos del proyecto

1.2.1 Objetivo General

- Desarrollar un producto de mortero geopolimérico, con adiciones de residuos de espuma rígida de poliuretano y puzolanas, que posea propiedades de baja densidad, alto aislamiento térmico y resistencia suficiente para implementarlo en construcción.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Diseñar una mezcla patrón de concreto geopolimérico mediante adición controlada arenas, cemento, puzolanas y plastificantes disponibles localmente; y siguiendo las recomendaciones de la literatura y ensayos preliminares de caracterización.
- Evaluar el efecto de la cantidad de residuos de espuma rígida de poliuretano sobre las principales propiedades mecánicas, la densidad y aislamiento térmico respecto a la mezcla patrón.
- Seleccionar las mezclas que acorde sus propiedades medidas cumplan con los requerimientos mínimos de funcionalidad recomendados por la normatividad técnica para prefabricados vigente en Colombia.

1.3 Marco de referencia

1.3.1 Mezcla de concreto

En Colombia el proceso de regulación, en cuanto a la calidad y especificaciones que debe cumplir el concreto, es dado por la norma sismo resistente de Colombia 2010 (NSR 10), la cual condiciona lo que se debe hacer en la preparación de la mezcla y con esto obtener los resultados óptimos para una buena ejecución de la obra. Los materiales necesarios para la obtención de una buena mezcla son cemento, agua, agregados o áridos fino y grueso

Para elaborar la pasta cementicia, que es el aglomerante de los áridos, se mezcla agua con el cemento hidráulico para que se hidrate; de modo durante el proceso denominado fraguado se disuelvan los minerales cementicios que reacciona químicamente para formar productos de hidratación que le confieren dureza y resistencia mecánica a los hormigones.. Los productos de hidratación, al inicio son geles complejos de

sílice (SiO_2), alúmina (Al_2O_3) y carbonatos cálcicos (CaCO_3) que se deshidratan durante las primeras 4 horas, debido al calor exotérmico de la reacción de fraguado (Giraldo, 2006).

Cabe resaltar la importancia de la relación agua/cemento (w/c) porque el exceso o faltante de agua afecta los procesos químicos de hidratación y fraguado que inciden directamente sobre la resistencia final a compresión (f'_c) y durabilidad, obteniendo menor resistencia entre más agua se utilice debido a fenómenos de disolución y arrastre de minerales cementicios solubles en el agua. Esto genera espacios vacíos por el recorrido del agua que no interactúan con la pasta de cemento, por ende, no genera ninguna oposición frente a los esfuerzos de compresión y debilitan la resistencia final de la mezcla, en la figura 1 se ilustra la variación de la resistencia compresiva de un mortero en función del contenido el agua adicionada

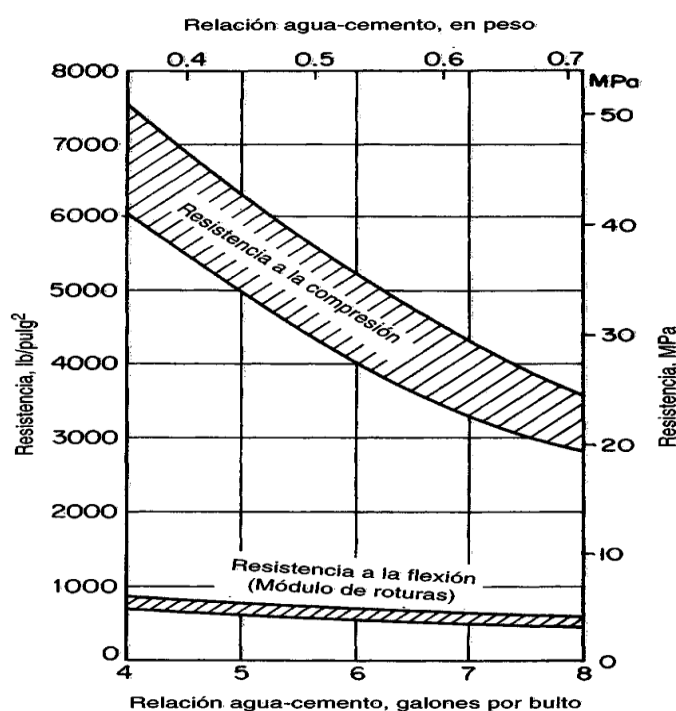


Figura 1. Efecto de la relación agua-cemento en la resistencia a compresión y flexión del concreto (Nilson A. H, 2001)

Los agregados o áridos pétreos se clasifican generalmente en finos y gruesos. Un agregado fino es cualquier material que pasa el tamiz No. 4, es decir un tamiz con 4 aberturas por pulgada lineal y el agregado grueso es todo aquel que no pasa éste tamiz. Para la obtención de una mezcla ideal, es necesaria una buena gradación en los agregados, la cual permita una mejor compactación entre ellos mismos y con la pasta de cemento agua, y con esto generar la menor cantidad de espacios vacíos en la mezcla y obtener una mayor resistencia. Es necesario determinar la procedencia de los agregados para definir las propiedades interperismo, angulosidad, resistencia, porosidad entre otras y obtener una mayor calidad en el concreto.

Además de los componentes principales del concreto, usualmente se usan aditivos para mejorar el comportamiento del mismo, los cuales ayudan a

mejorar la manejabilidad, el tiempo de fraguado, aumentar la resistencia, la durabilidad, para disminuir la permeabilidad y como en este caso disminuir la densidad.

Los materiales de la mezcla se dosifican de manera que el concreto resultante tenga una resistencia adecuada, una manejabilidad apropiada para su uso, una densidad apropiada según lo proyectado y un bajo costo.

1.3.2 Espuma de poliuretano

La espuma de poliuretano (PUR) es un material sintético y duroplástico, altamente reticulado y no fusible, que se obtiene de la mezcla de dos componentes generados mediante procesos químicos a partir del petróleo y el azúcar: el isocianato y el polioli. La mezcla de los dos componentes polioli e isocianato, que son líquidos a temperatura ambiente, produce una reacción química exotérmica. (González M, 2016)

Hay dos maneras de obtenerlo: proyectando al mismo tiempo los dos componentes en una superficie, o por colada (mezcla de ambos materiales).

Al ser un material que puede ser obtenido in-situ en la industria de la construcción, presenta enormes ventajas y soluciones a problemáticas que se viven hoy en día en la obra, ayudando a contribuir, entre muchas otras las, a las siguientes propiedades

- Aislamiento Térmico

Esta característica especial se debe a la estructura de pequeñas celdas que forma la espuma, y a la composición del gas aislante ocluido en el interior de dichas celdas. La conductividad térmica del poliuretano depende de varios factores, como el porcentaje de celda cerrada, el tamaño de la celda, el gas espumante utilizado, o el espesor de aislamiento instalado. Además, la resistencia térmica depende de la conductividad y del espesor del aislamiento instalado.

La conductividad térmica y resistencia térmica del poliuretano proyectado e inyectado se declara en función del espesor y a partir del valor de conductividad térmica declarada.

$$R = e / \lambda$$

Donde:

R: es la resistencia térmica, en $m^2 \cdot K/W$

e: es el espesor, en m

λ : es la conductividad térmica, en $W/m \cdot K$

En la tabla 1 se listan los valores obtenidos de resistencia térmica ante distintos coeficientes de conductividad y diferentes espesores.

Tabla 1. Valores de resistencia térmica en $m^2 K/W$, Tabla tomada de ATEPA

Espesor mm	λ 0.026 W/m K	λ 0.028 W/m K	λ 0.030 W/m K	λ 0.032 W/m K
30	1,15	1,05	1,00	0,90
40	1,50	1,40	1,30	1,25
50	1,90	1,75	1,65	1,55
60	2,30	2,10	2,00	1,85
70	2,65	2,50	2,30	2,15
80	3,05	2,85	2,65	2,50
90	3,45	3,20	3,00	2,80
100	3,80	3,55	3,30	3,10
110	4,20	3,90	3,65	3,40
120	4,60	4,25	4,00	3,75
130	5,00	4,60	4,30	4,05

Esto nos garantiza que el poliuretano es un material aislante con un valor de conductividad térmica muy bajo, además de tener la capacidad de resistir a condiciones de temperatura a los que normalmente se ven expuestos los aislantes térmicos

- Aislamiento Acústico

El poliuretano proyectado de celda cerrada es un material ligero y de baja densidad que es capaz de aportar una absorción de hasta 60 dB, donde también es muy eficaz como amortiguador de vibraciones, disminuyendo así las resonancias presentes en las edificaciones. En la tabla 2 se puede evidenciar el coeficiente de absorción en función de la frecuencia.

Tabla 2. Coeficiente de absorción de poliuretano proyectado en función de la frecuencia, Tabla tomada de ATEPA

Frecuencia (Hz)	Coeficiente de absorción
125	0,12
250	0,18
350	0,20
500	0,27
1.000	0,19
2.000	0,62
4.000	0,22

Se observa entonces que el sellado del poliuretano proyectado ejerce una acción positiva en la mejora del aislamiento acústico a ruido aéreo de la fachada

El poliuretano proyectado o inyectado se considera un producto con muy baja emisión de sustancias peligrosas al aire interior. De hecho, las emisiones del poliuretano son muy inferiores a las de muchos de los materiales aislantes, incluyendo los aislamientos naturales.

El poliuretano es un material completamente inocuo y saludable para el hombre, de todas maneras, durante la aplicación del material es recomendable el uso de guantes y mascarás mientras se sitúa el aislante, una vez terminada su instalación no hay ningún riesgo de exposición para los usuarios que integran las edificaciones.

Adicionalmente la espuma de poliuretano no sirve de cultivo ni alimento al moho, las bacterias o los insectos, por lo que su conservación en el tiempo es garantizada (Viviam W.Y, 2005).

Actualmente las edificaciones y residencias son unos de los principales focos de consumo de energía, cerca del 40% en Europa y más de la mitad de esa energía es consumida por el acondicionamiento climático que se quiere dar en los hogares según la estación climática en la que se encuentre (calefacción o aire acondicionado). Por ello también presentan el mayor potencial de ahorro de energía, y el aislamiento térmico con poliuretano proyectado o inyectado es una forma eficaz de reducir este consumo, porque como se vio anteriormente, se puede lograr altos aislamientos térmicos con menores espesores a los que ofrecen en el mercado otro tipo de aisladores, por lo que su utilización en la industria de la construcción se vería compensada en el término de los dos (2) primeros años, donde a partir de ahí se empezará a materializar el ahorro, además cuenta con una alta durabilidad, resiste la humedad y o contiene ni CFC´s ni HCFC´s por lo que no contribuye a la destrucción de la capa de ozono.

El uso de poliuretano ayuda a reducir las pérdidas energéticas dadas por los sistemas de calefacción y aire acondicionado, además el uso de poliuretano no requiere de mantenimiento o sustitución a lo largo de su vida útil ya que tiene la capacidad de conservar sus propiedades y características conforme pasa el tiempo.



Figura 2. Procesos de instalación láminas de PUR en viviendas y hogares. Imágenes tomadas de Archiexpo, Aislaconpoliuretano y Etelta

Gran parte de nuestra vida la pasamos en el interior de los edificios: casa, oficina, centro comercial, entre otros, por lo que una adecuada climatización es esencial para garantizar el confort y la salud de las personas que habitan los espacios, y el aislamiento térmico de la envolvente es el mejor modo de asegurar una temperatura de confort uniforme en cualquier lugar del edificio

Otra opción de reciclaje es a través procesos químicos se pueden transformar los restos de poliuretano nuevamente en materia prima. El POLIOL obtenido con esta técnica se puede volver a utilizar para fabricar poliuretano. (Wenqing, Qingyin, & Shili, 2012)

Todos los desechos de poliuretano se pueden incinerar en cámaras de combustión para generar energía y de esta manera contribuir a preservar los recursos naturales. (Wenqing, Qingyin, & Shili, 2012)

Las propiedades y características inherentes del poliuretano, lo habilitan como material útil en la industria y particularmente en la construcción, sector donde éste material ha tenido una alta aceptación y aplicación en: Fachadas con aislamientos, cubiertas planas e inclinadas, aligeramiento de losas y pisos, tejados, Nivelación de suelos que presentan asentamientos

1.3.3 Cenizas Volantes

Las cenizas son los residuos de la combustión de carbón pulverizado en centrales térmicas. Los productos de esta combustión se subdividen en cenizas volantes y de hogar. Los primeros, son residuos volátiles obtenidos a lo largo del trayecto de los gases de la combustión del carbón que son evacuados por la chimenea de la caldera. Las propiedades de estas cenizas varían ampliamente según el tipo de carbón, el residuo de cenizas, el grado de pulverización y el tipo de colectores empleados. Aun cuando estas cenizas se obtengan de una misma fuente de producción, sus propiedades físicas y químicas presentan cierto rango de variación. Las cenizas de hogar, por su parte, se obtienen desde el fondo del hogar de la caldera y el tamaño de sus partículas es entonces mayor que el de las cenizas volantes (Ossa & Jorquera S, 1984)

Por ser las cenizas volantes un subproducto industrial, debe tenerse especial cuidado en comprobar su regularidad, por parte de la Central de hormigonado, mediante el oportuno control de recepción de los diferentes suministros, a fin de comprobar que las posibles variaciones de su composición no afecten al hormigón fabricado con ellas.

La adición de ceniza volante al concreto asegura muchos beneficios. Puede resaltar las propiedades del concreto fresco a través de una demanda reducida de agua para un revenimiento dado, una mejor bombeabilidad, una cohesión mejorada y una segregación reducida. También reduce la temperatura pico durante el curado, lo que ayuda a disminuir el agrietamiento térmico. En el concreto endurecido, la incorporación de la ceniza volante puede mejorar la durabilidad [tal como resistencia a la reacción álcali-sílice (RAS), al ataque de sulfatos, al ingreso de cloruros y a la corrosión], reduce la permeabilidad y contribuye a la ganancia de

resistencia a largo plazo del concreto. Otros beneficios debidos a la utilización de ceniza volante son la reducción de los costos del concreto, el empleo provechoso de un material destinado al relleno de tierra y la reducción de la energía y la emisión de CO₂, asociadas con la producción del cemento (Concreto, 2001)

Actualmente en Colombia, la constructora Ahinco S.A. es una empresa pionera dedicada principalmente a la elaboración de concretos radicada en el departamento de Antioquia. A las mezclas de concreto elaboradas en su planta de procesamiento se incluyen las cenizas volantes obteniendo con ello un producto de mejores características.

Mediante el uso de las cenizas volantes en el concreto, Ahinco S.A. ha evitado hasta el momento, que más de 60.000 Toneladas de este residuo sean vertidos a la atmósfera o se acumulen en vertederos. Dando uso a las cenizas volantes, Ahinco S.A. ha logrado disminuir más de 30.000 Toneladas de Cemento en los concretos que ha producido hasta el momento, generando así un gran aporte al medio ambiente y a su sostenibilidad.

Entre las ventajas que enumera Ahinco S.A. con la elaboración de concretos a base de ceniza volante se encuentran, entre otras, las siguientes: alcanzan resistencias iguales o mayores a los 28 días en comparación con los concretos tradicionales, adquiriendo resistencias a edades tardías muy superiores por lo que se obtienen resistencias finales mucho mayores; concretos de mayor calidad al ser más impermeables, de menor retracción, con una mayor manejabilidad, mejores acabados, menos propenso a la segregación y mejor aptitud para bombeo lo que se logra con la adición de cenizas volantes (Ahinco S.A, 2014).

Ahinco S.A. ha sido participe de múltiples proyectos a los que ha suministrado concreto, entre los que se destacan:

- Centro Cívico de Antioquia Plaza de la libertad (Medellín, Antioquia).
- Centro comercial San Nicolás (Rionegro, Antioquia).
- Mall Gran Vía (Medellín, Antioquia).
- Polideportivo Universidad Nacional (Medellín Antioquia).
- Edificio Torre Porvenir (Medellín, Antioquia).
- Mall Palms Avenue (Medellín, Antioquia).

Tabla 3. Especificaciones químicas y físicas recomendadas por la ASTM C618-05, para la utilización de cenizas volantes como adición en el hormigón. Tomado de (Tesina Erich Rodríguez, 2009)

Especificación	Ceniza Volante	
	Clase F	Clase C
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ mín (%)	70	50
SO ₃ (% máx.)	5	5
Contenido de humedad (% máx.)	3	3
Pérdida por ignición a 950°C (% máx.)	6	6
Finura (Cantidad retenida en tamiz de 45 µm. máx.)	34	34
Índice de actividad resistente		
7 días (mín.)	75	75
28 días (mín.)	105	105
Estabilidad: Expansión contracción en autoclave (máx.)	5	5
Requisitos de Uniformidad: Variación con el promedio (% máx.)	5	5

1.3.4 Geopolímeros

Geopolímero es un término acuñado por “Joseph Davidovits” en la década de 1980 para designar a polímeros sintéticos inorgánicos de aluminosilicatos que proceden de la reacción química conocida como geopolimerización.

Los geopolímeros tienen un elevado potencial para ser usados en numerosos campos, pero predomina el uso como sustitutos de cementos portland, campo hacia el que se ha dirigido la mayor parte de la investigación de Davidovits (Davidovits, 1982). Los geopolímeros tienen bajas emisiones de CO₂ en su producción, una gran resistencia química y térmica, y buenas propiedades mecánicas, tanto a temperatura ambiente como a temperaturas extremas (García, Higuera, Rea, Casarez, & Gómez, 2012).

Desde que Davidovits acuñó el término “geopolímeros” que incluyen los “hormigones activados alcalinamente”, se han desarrollado diversas formulaciones en las cuales varían: la fuente de aluminosilicatos, el activador alcalino, los áridos, las proporciones de mezcla y condiciones de curado. (Palomo, y otros, 2014), presentan una revisión que describe los tipos hormigones activados alcalinamente con sus síntesis y microestructuras; asimismo refieren empresas innovadoras, como Zeobond y Ceratech, que han implementado en sus proyectos de construcción hormigones geopoliméricos en lugar de aquellos basados en cemento Portland. También informan que las normas “europea EN-196” y “ucraniana DSTU B V.2.7-181:2009” han reglamentado el uso de los hormigones geopoliméricos en el mercado; de hecho, entre 1960 y 1990 tanto en Ucrania

como en Rusia se construyeron edificios residenciales con hormigones en los que el cemento Portland fue sustituido 100% por cementantes activados alcalinamente.

El proceso de polimerización es llevado a cabo al poner al material puzolánico en contacto con la solución activador alcalino, lo cual da como resultado la formación de cadenas poliméricas tras haberse reorientado los iones en solución.

En la figura 3 se ilustran las etapas de polimerización que sufre un polímero sintético de aluminosilicatos.

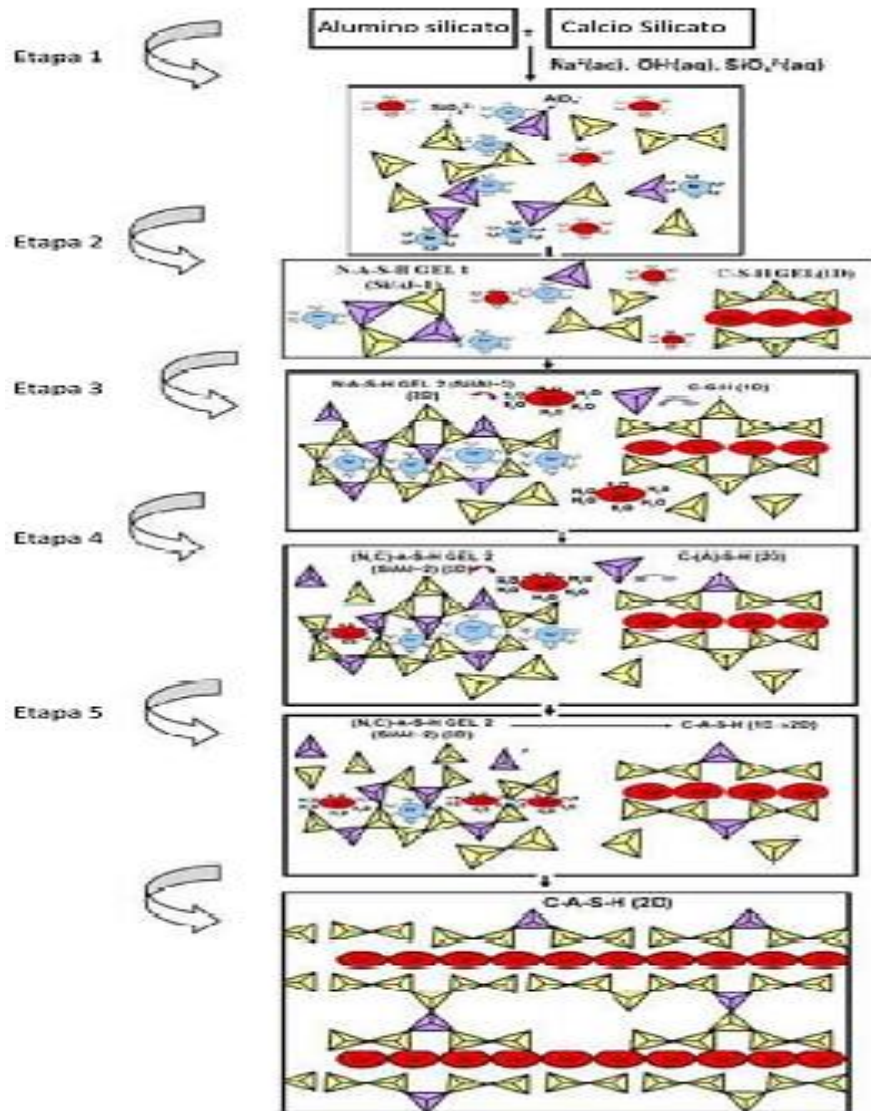


Figura 3. Etapas de polimerización que sufre un polímero sintético de aluminosilicatos

Las seis etapas son:

- 1ª Etapa Disolución (Deconstrucción) de los materiales precursores.
- 2ª Etapa Equilibrio de Especiación de Silicatos y Solidificación (Gelación)
- 3ª Etapa Reorganización y Reordenación de las Moléculas. Comienzo de la polimerización
- 4ª Etapa Interacción entre las Fases
- 5ª Etapa Aumento de Iones Ca^{2+} en la Microestructura Inicial y de Iones Al^{3+} en la Estructura (C - S - H) gel
- 6ª Etapa Formación de la Estructura Mixta Endurecida de la Matriz Final.

El concreto geopolimérico no requiere agua para el proceso de consolidación de la mezcla, en su lugar es necesario una solución alcalina de hidróxido de sodio (NaOH) y silicato de sodio (Na_2SiO_3). Los concretos geopoliméricos representan una amplia gama de materiales que son redes caracterizadas de molécula inorgánica. La ceniza volante contiene alto contenido de sílice (SiO_2) y Alúmina (Al_2O_3) que reacciona con la solución alcalina y forma un gel el cual se une con el agregado fino y grueso.

De acuerdo con (Fernandez-Jimenez, 2006) cuando la ceniza volante es mezclada con una solución alcalina se produce un proceso de disolución del Si y Al, entonces las moléculas se condensan en una gel (polimerización) y el ataque alcalino rompe la cubierta de las partículas de la Ceniza Volante, exponiendo las pequeñas esferas contenidas en su interior, las cuales posteriormente se disuelven para la formación de productos, tanto en el interior como en el exterior de dichas esferas.

Posteriormente, (Lee W.K.W, 2002) reportó que la concentración de sílice soluble presente en la solución activante juega un rol importante en la naturaleza del gel formada y por tanto en el desempeño mecánico. De esta manera a través de FTIR (Análisis espectroscópico) se comprobó que con bajas concentraciones de sílice disuelta se promueve la formación de un gel altamente polimerizado y una pequeña fracción de partículas enlazadas. Así mismo, una elevada cantidad de sílice disuelta en el activador alcalino promueve la formación de enlaces interparticulares mucho más fuertes.

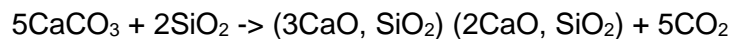
De manera general los sistemas geopoliméricos basados en ceniza volante presentan una mayor durabilidad frente a medios agresivos, tales como ácidos, sulfatos y agua de mar, en comparación a materiales tradicionales basados en cemento

Dentro de las propiedades químicas de los geopolímeros, destacan la alta resistencia al ataque de ácidos y sulfatos, así como su resistencia al fuego.

De acuerdo a estudios de (Davidovits J. , 2008), se tienen las siguientes propiedades físicas para los geopolímeros:

PROPIEDADES GEOPOLÍMEROS				
Agrietamiento por Fraguado	Módulo de Young	Resistencia	Conductividad calórica	Calor específico
>0.05%	2 GPa	Elevada después de 24 hr	0.2 a 0.4 [W/m°C]	0.7 a 1 [J/kg°C]

El uso de este material se viene dando como sustituto del cemento Portland, el cual es uno de los mayores contribuyentes de CO₂ a nivel mundial, por lo que su uso es directamente proporcional al aceleramiento del calentamiento global. El cemento Portland ordinario resulta de la calcinación de piedra limo (carbonato de calcio) y sílice según la siguiente reacción:



La producción de 1 tonelada de cemento directamente genera 0.55 toneladas de químico (CO₂) y requiere de combustión de carbón-combustible para obtener adicionalmente 0.40 toneladas de CO₂. En conclusión, producir 1 tonelada de cemento es el equivalente de producir 1 tonelada de CO₂. Esto hablando en términos globales quiere decir que, por ejemplo, en el año 1987 se produjo 1 billón de toneladas cubicas en todo el mundo, es decir, el 5% de toda la emisión de CO₂ global (Davidovits, 1994).

Esto sin duda alguna es una problemática que se busca racionalizar con el fin de disminuir las acciones contaminantes que resultan de la industria de la construcción, y que en ese sentido lo hace una de las fuentes más sensibles a la investigación y al cambio, todo con el ánimo de desarrollar un concreto capaz de resistir las cargas que demanda una estructura o edificación y a su vez sea sostenible y no contribuya con la contaminación ambiental.

1.3.5 Prefabricados

Un elemento prefabricado es una pieza estructural de concreto armado o vaciado que en su mayoría es elaborada en una planta o sitio de grandes dimensiones y son elaborados a base de cemento, agua y agregados. Puede llevar aditivos y acero de presfuerzo, su forma, sensiblemente ortoédrica, facilita su construcción en serie debido a la producción tipo industrializada, ya que se generan grandes moldes para su elaboración y por esta característica pueden fabricarse más fácilmente, en costo y tiempo representa un gran avance en comparación con los métodos tradicionales y cumple con estándares de calidad muy estrictos debido a la calidad en sus materiales y su sistema constructivo.

Como bien es mencionado anteriormente, una de las formas más eficaces de contribuir con el consumo de agua y energía es la implementación de un método constructivo óptimo, eficaz y eficiente, que entre muchos otros que existen, valga la pena resaltar el uso de prefabricados de concreto; una metodología que a lo largo de los últimos años ha venido en crecimiento gracias a las mejoras constructivas que ofrece, bien sea por la disminución en costos, tiempo, organización, limpieza y hasta personal si se quiere ver de ese modo, ente muchos otros, ventajas éstas, que reunidas en conjunto

hacen de este proceso constructivo muy atractivo a los gerenciamientos de las diferentes empresas y que en ese sentido, éstos se planteen su uso en las diferentes obras donde puede ser utilizado.

Colombia y en particular el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC) es el organismo nacional de normalización, quien se encarga de regular, entre muchas otras, la fabricación de prefabricados en Colombia y quien vela para que se den los mayores estándares de calidad, acabado y proceso constructivo de todos los elementos prefabricados, para efectos de esta tesis de grado, sólo serán tomadas en cuenta las siguientes regulaciones:

Tabla 4. NTC guías para ésta tesis

ICONTEC	
NTC	Descripción
3318	Producción de concreto
2446	Ingeniería civil y arquitectura. Paneles prefabricados. Clasificación y requisitos
4026	Ingeniería civil y arquitectura. Unidades (bloques y ladrillos) de concreto, para mampostería estructural
4075	Prefabricados en concreto. Unidades - ladrillos- de concreto para construcción de sumideros y cámaras de inspección de mampostería
4076	Ingeniería civil y arquitectura. Unidades (bloques y ladrillos) de concreto, para mampostería no estructural interior y chapas de concreto
4109	Prefabricados de concreto. Bordillos, cunetas y topellantas de concreto

Son varias las regulaciones que existen en Colombia para los prefabricados, dependiendo del tipo de uso que se quiera dar a estos, se encuentran diferentes ordenaciones, recomendaciones y requisitos que se deben cumplir; de este modo asegurar un producto de calidad y un cliente satisfecho. En este caso serán usadas aquellas que por las características del material en estudio y las propiedades que se quieren adquirir, son las de uso más apropiado

2. METODOLOGÍA

En la figura 4 se presenta un esquema de la metodología experimental seguida en el trabajo de grado para determinar las mezclas geopoliméricas más aptas en cuanto a resistencia a la compresión y las cantidades de PUR a adicionar al geopolímero para bajar su densidad sin afectar significativamente la resistencia

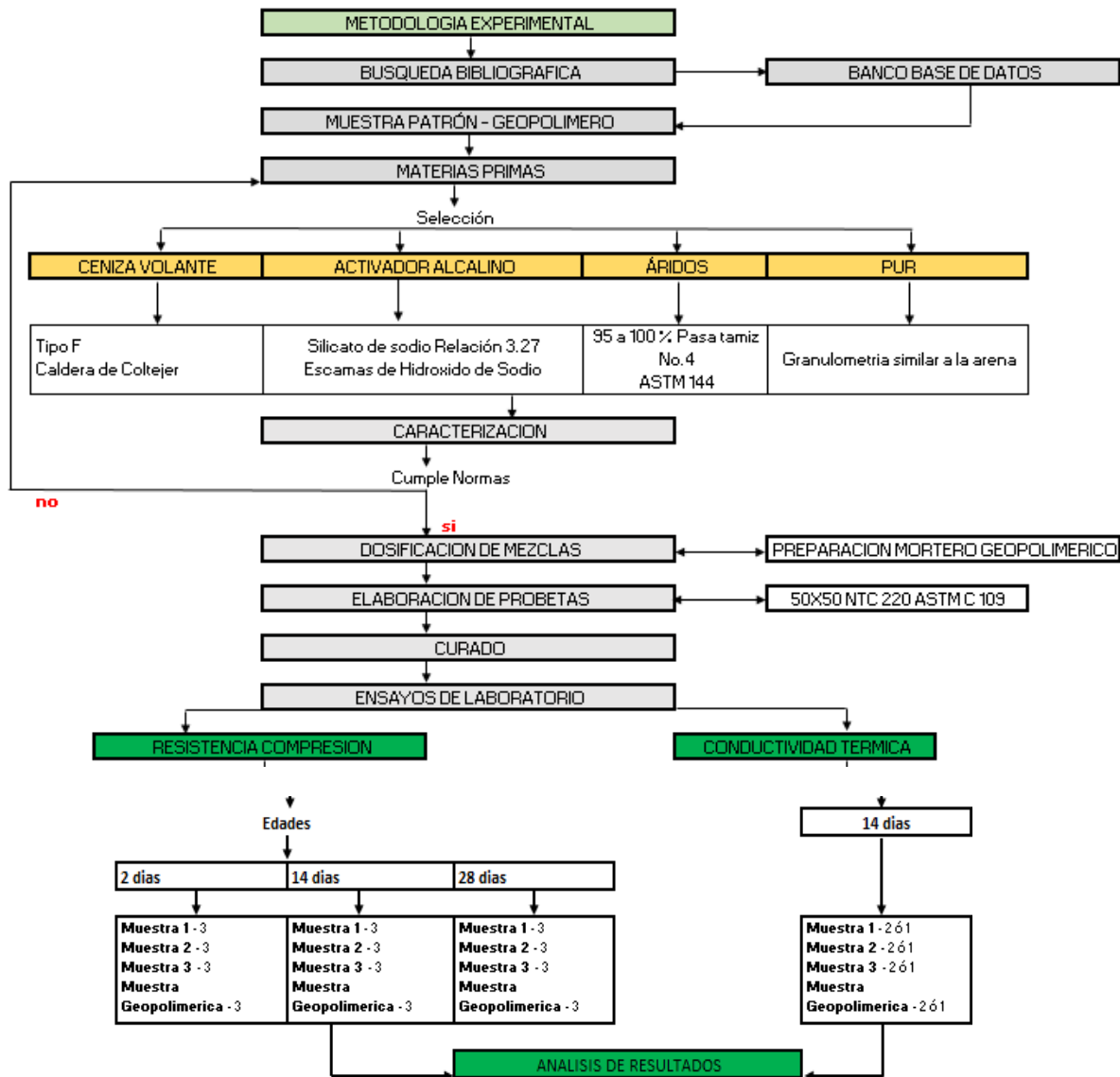


Figura 4. Diseño metodológico, tomado de fuente propia

En la figura 4, no se hace alusión a ensayos de medición del aislamiento acústico de las mezclas geopoliméricas con PUR, comprometida en los objetivos de la propuesta inicial. El ensayo no se pudo realizar porque la Universidad EIA no tenía la infraestructura de laboratorio y la Universidad San Buenaventura que inicialmente, se mostró dispuesta a ofrecer este ensayo, tuvo un inconveniente con el equipo de caracterización que no se resolvió a tiempo. Por esa razón se incluye en la discusión de resultados una descripción de las ventajas que supone la adición del PUR para

aumentar el aislamiento acústico, acorde a lo encontrados durante a la consulta bibliográfica

2.1 Proceso elaboración mortero geopolimérico

Basados en los resultados de la literatura académica y científica de hormigones geopoliméricos, se decidió elaborar la pasta cementante geopolimérica con sustitución total (100%) del cemento Portland con ceniza volante tipo F como fuente de aluminosilicatos con altos contenidos de sílice y alúmina, junto con una solución alcalina activadora compuesta por hidróxido de sodio NaOH y Silicato de Sodio Na_2SiO_3 .

Las distintas variables que componen el mortero geopolimérico son mezcladas y caracterizadas de manera que al ser usadas cumplan con cada uno de los requisitos exigidos por la norma y de esta manera garantizar que los resultados obtenidos tienen un nivel de certeza suficiente para poder discutir, concluir y recomendar para futuras investigación y usos que se puedan dar a la mezcla

Todos los ensayos y procesos fueron llevados a cabo en el Laboratorio de Materiales de la EIA.

2.2 Diseño de la mezcla geopolimérica de referencia

Para diseñar la mezcla geopolimérica se partió de la consulta bibliográfica de artículos científicos, tesis de grado y de posgrado, disponibles en bases de datos y repositorios universitarios digitales. La selección de la información clave relevante para establecer la dosificación de mezcla, tuvo en cuenta como criterio: sistemas geopoliméricos con 100% cenizas volantes como fuente de aluminosilicatos, activación alcalina con 100% solución de hidróxido de sodio (NaOH) y 100% silicato de sodio (Na_2SiO_3) o mezclas entre ambos.

Tabla 5. Referencias bibliográficas consultadas para determinar muestra geopolimérica de referencia

Referencia Bibliográfica	Ceniza volante (ASTM C618)	Arena (Cantidad/Tamaño)	Sln NaOH (Molaridad)	Sln Na_2SiO_3 (Composición)	Relación Agregado/Ceniza	H ₂ O Adicional	Relación Sln Alcalina/Ceniza	Relación $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$
Estefania Robayo Nuñez. Comportamiento mecánico y durabilidad de morteros de cenizas volantes activadas térmicamente	Ceniza Tipo F (Fabricato) 1 Parte	Arena silíceas (tipo 40 y 60) 2.75 Partes	0.6 Partes (10M)	NA	2.75	0.60 Partes	0.6	3.25
	1 Parte	2.75 Partes	0.45 Partes (10M)	0.11 Partes Se redujo a 70% agregando 30% Agua para trabajabilidad	2.75	0.033 Partes	0.56	3.25
Erich David Rodríguez. Eficiencia de los activadores alcalinos basados en diferentes fuentes de sílice para la	Ceniza Termoeléctrica Andorra 1 Parte	Arena silícea (Modulo de finura: 4.10) 3 Partes	No se preparó Sln NaOH, sino que se agregaron los pellets a la Sln de Na_2SiO_3	Grado 42 (8.7%Na ₂ O; 28.7% SiO ₂ ; 62.4%H ₂ O)	3	0.33 Partes	0.58	0.833 (12%Na ₂ O 10%SiO ₂ calculados respecto a masa de ceniza)

Referencia Bibliográfica	Ceniza volante (ASTM C618)	Arena (Cantidad/Tamaño)	Sin NaOH (Molaridad)	Sin Na ₂ SiO ₃ (Composición)	Relación Agregado/Ceniza	H ₂ O Adicional	Relación Sin Alcalina/Ceniza	Relación SiO ₂ /Na ₂ O
producción de sistemas geopoliméricos de ceniza volante								
Marcy Elizabeth Valenzuela Herrera. Estudio experimental de las propiedades de geopolímeros sintetizados a partir de puzolana natural.	Ceniza (75%) 1 Parte	Arena silicea (2 mm máx.) 3.73 Partes	(14M) 0.20 Partes	0.40 Partes	3.73	0.10 Partes (10% masa ceniza)	0.60	2.1
Andreas Nataatmadja. Development of low-cost fly ash bricks	Ceniza Tipo F1 (70% masa)	Arena de río (30% masa)	NA	Grado 42 0.21 Partes (15% masa)	0.43	NA	0.21	3.22
	1 Parte (70% masa)	0.43 Partes (30% masa)	NA	0.17 Partes (12% masa)	0.43	NA	0.21	3.22

En la tabla 6 se presentan las diferentes discusiones y observaciones que se abarcaron en los diferentes trabajos consultados y de esta manera poder determinar la mezcla geopolimérica más acertada y adecuada para el desarrollo de este trabajo experimental

Tabla 6. Fuentes bibliográficas y Resultados obtenidos

OBSERVACIONES	ESTUDIOS Y REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS
La mayor parte de los estudios con mezclas geopoliméricas preparan y caracterizan morteros en lugar de concretos, excluyendo el agregado grueso, salvo los estudios de (J. Wonpa, 2010). El aumento de la relación agregado/ceniza y la reducción de la relación agua/ceniza favorecen el aumento de la resistencia a compresión. Relaciones agua/ceniza entre 0.48 y 0.60, son aconsejables.	(Rodríguez Martínez, E., 2011) – (Robayo Núñez E., 2013) – (Vanderley J., 2014)
Se prefiere utilizar agregados finos con tamaño de partícula máximo 4.75 mm (pasante por el tamiz N°4), alcanzando resistencias a compresión en el rango de 14MPa a 95MPa, dependiendo de otros factores como composición química de la ceniza volante y la solución activaste, sus proporciones, adición de otras puzolanas, plastificantes y tipo de curado efectuado.	(Robayo Núñez E., 2013) – (Álvarez Mantilla H., 2010) – (Rodríguez Martínez E., 2011) – (Valenzuela Herrera M., 2013) – (Vanderley J., 2014) – (Wonpa J. – 2010)
Las relaciones agregado/ceniza con mejores resultados están comprendidas entre 2.75 y 3.00. Diana Catalina Castro, 2010, utilizó relaciones de agregado/ceniza de 4.54 alcanzando resistencia a compresión de 16MPa (curado a 28 días), que es inferior a la alcanzada en geopolímeros en los que incluso no utilizan agregados	(Robayo Núñez E., 2013) – (Álvarez Mantilla H., 2010) – (Rodríguez Martínez E., 2011) – (Vanderley J., 2014)

OBSERVACIONES	ESTUDIOS Y REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS
La mayoría de estudios usan como solución activadora de las cenizas volantes y puzolanas una mezcla de hidróxido de sodio (NaOH) con Silicato de Sodio (Na ₂ SiO ₃) usado como fuente adicional de sílice (SiO ₂) para formar geles vítreos con la ceniza volante. Solamente (Robayo Núñez, 2013), reporta mejores resultados activando con hidróxido de sodio sin silicato de sodio; en tanto que (Nata-Atmadja, 2008), obtuvo altas resistencias activando con solución de silicato de sodio sin hidróxido de sodio.	(Álvarez Mantilla H., 2010) – (Rodríguez Martínez E., 2011) – (Valenzuela Herrera M., 2013) – (Vanderley J., 2014) – (Wonpa J., – 2010)
Se prefiere usar silicatos de sodio con módulo de sílice (Ms= SiO ₂ /Na ₂ O) entre 2.10 y 3.27, sin exceder el último valor porque la rápida formación de los geles afecta la disolución y recombinación de los componentes de la ceniza con la sílice. Como consecuencia se da un aumento de viscosidad y pérdida de trabajabilidad del mortero, lo que conduce a reducción en la resistencia a compresión.	(Robayo Núñez E., 2013) – (Álvarez Mantilla H., 2010) - (Valenzuela Herrera M., 2013) – (Vanderley J., 2014) – (Wonpa J., 2010)
Cuando la finura de la ceniza volante es inferior al rango de 25 a 45 micras, se recomienda molerla a esta granulometría para aumentar la disolución y reactividad de sus componentes en medio alcalino, para favorecer la formación crecientes de geles geopoliméricos que aportan resistencia mecánica al mortero entre otras propiedades benéficas.	(Gómez-Pérez, 2011) – (Valenzuela Herrera M., 2013) – (Vanderley J., 2014)
Muchos de los estudios reportan un aumento de las resistencias a la compresión tempranas, cuando el mortero se cura en horna en el rango de 60°C a 80°C durante las primeras 24 o 48 horas. Sin embargo, R. Arellano encontró que curando en condiciones ambientales (20°C) las resistencias tardías igualan a la de los morteros geopoliméricos curados inicialmente en el horno.	(Rodríguez Martínez E., 2011) – (Valenzuela Herrera M., 2013)
Para lograr altas resistencias a la compresión es más determinante la relación Solución activadora/Ceniza que la relación Agregados/ceniza.	(Wongpa J., 2010)
Para mejorar el autofraguado de cenizas volantes y puzolanas con bajo contenido de CaO se recomienda adicionar cal hidratada Ca(OH) ₂ en cantidades de 3.0 a 5.0% masa respecto a la ceniza o puzolana. Además cuando la ceniza tiene bajos contenidos de alúmina (Al ₂ O ₃) se recomienda adicionar caolín u otra puzolana que le aporte	(Atmadja N., 2008) – (Vanderley J., 2014)

Una vez analizados y discutidos los diferentes procedimientos de los autores se estableció cual era el mortero geopolimérico que reunía las mejores propiedades y con las que se obtuvieron mejores resultados y de este modo establecer como punto de partida una mezcla que satisfaga los objetivos propuestos en este trabajo de grado. En la tabla 7, se presenta la mezcla geopolimérica.

Tabla 7. Proporciones y condiciones de mezcla geopolimérica de referencia diseñada

Referencia Bibliográfica	Ceniza volante (ASTM C618)	Arena (Cantidad / Tamaño)	Sln NaOH (Molaridad)	Sln Na ₂ SiO ₃ (Composición)	Relación Agregado / Ceniza	H ₂ O Adicional	Relación Alcalina / Ceniza	Relación Na ₂ SiO ₃ / NaOH	Relación SiO ₂ /Na ₂ O
Formulación propia	Ceniza Marca CENIX (Ahinco SA: Cotejer) 1 Parte	Arena (4.75 mm máx.) 3 Partes	Solución (14M) 0.17 Partes	(Acuambiente Ltda.) Grado 42 0.43 Partes	3	La necesaria para producir asentamiento de entre 5-10 cm	0.6	2.5	3

2.3 Reglamentación vigente para asegurar calidad de los resultados

Con el ánimo de que la mezcla realizada y los resultados obtenidos obtengan un nivel de certeza confiable y en ese sentido el margen de error sea mínimo, se estudiaron y adhirieron a esta investigación todas las normas NTC que rigen la clasificación de los materiales y la obtención de los resultados, las cuales son ilustradas en la tabla 8.

Tabla 8. Norma NTC asociada a cada proceso para la elaboración y ensayo de una mezcla

Norma Reglamentación	Nombre del ensayo	Descripción
(NTC) 174	Granulometría de los agregados	Se selecciona una muestra representativa del material (fino y grueso) alrededor de 5000gr; se lava el material para darle el mejor aspecto posible, una vez secado el material en el horno por 24 horas se selecciona la cantidad necesaria para determinar la granulometría y la cual pasara por el siguiente orden de tamices, para agregado grueso son 3", 2", 1½", 1", ¾", ½", ¼", # 4 y para agregado fino son # 4, # 8, # 16, # 30, # 50, # 100, # 200 y por último se toma el material retenido en cada tamiz y se pesa para determinar tanto el porcentaje de material que pasa como el retenido por cada tamiz .
(NTC) 1776	Agregados para hormigón. Determinación del contenido de humedad total.	Se toman 2000 gr de material el cual se pesó y se metió en el horno durante 24 horas, después de trascurrido este tiempo se saca del horno y se toma el peso final al material y se calcula el % de humedad.
(NTC) 396	Método de ensayo para determinar el asentamiento del hormigón	Se humedece el molde y se coloca en una superficie plana y rígida, se sujeta firmemente con los pies y se llena con la muestra de hormigón en tres capas iguales chuzando cada una 25 veces con la varilla y en la capa del fondo es necesario inclinar ligeramente la varilla para compactar uniformemente toda la capa, al compactar la segunda y la tercera, la varilla debe penetrar ligeramente en la capa inferior, se debe agregar un poco más para que siempre haya hormigón en la superficie y se deja a ras; inmediatamente después se retira el molde alzándolo cuidadosamente en dirección vertical y se mide el asentamiento de acuerdo a la diferencia de alturas.
(NTC) 220	Determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico a la compresión, usando cubos de 50 mm o 2 pulgadas de lado	El mortero usado está compuesto de una parte de cemento y 2,75 partes de arena, en proporción en masa. Los cementos portland o los cementos portland con incorporadores de aire se mezclan con una relación agua/cemento especificada. Para los demás cementos, la cantidad de agua de mezclado debe ser aquella que produzca una fluidez de 110 ± 5 en 25 golpes con la mesa de flujo. Los cubos de ensayo de 50 mm o 2 pulgadas se apisonan en dos capas. Los cubos se curan en un día en los moldes, luego se desmoldan y se sumergen en agua con cal hasta el momento del ensayo.
(NTC) 673	Ensayo de resistencia y compresión de cilindros normales de hormigón.	Aceitar el molde y la base con una capa delgada de aceite mineral, colocar el molde sobre una superficie plana, firme y bien nivelada, llenar el molde en tres capas iguales chuzando cada una 25 veces con la varilla y en la primera capa, la varilla no debe tocar la base del cilindro; al compactar la segunda y la tercera, la varilla debe penetrar ligeramente en la capa inferior; si después de dar los golpes requeridos la superficie presenta huecos, éstos deben cerrarse golpeando suavemente con la varilla las paredes del molde. Si durante la compactación de la última capa el concreto baja, se debe agregar un poco más para que siempre haya concreto por encima del borde del molde, con el palustre se empareja la superficie y se almacenan los moldes sobre una superficie horizontal, evitando golpearlos o someterlos a vibraciones y cubriéndolos con madera, gante o plástico para evitar la evaporación de la cara superior. Entre 16 y 24 horas después, se procede a retirar los cilindros de los moldes y se colocan en un tanque con agua saturada de cal, en tal forma que estén totalmente cubiertos por el agua o en una cámara con humedad relativa del 100%, o bien bajo arena saturada de agua permanentemente, durante el tiempo establecido para efectuar el ensayo de resistencia (7 a 28 días).
ASTM C 177	Mediciones de flujo de calor en régimen permanente y propiedades de transmisión térmica por medio de la placa calientes	Consiste en aplicar un gradiente de temperatura, programando las placas a diferentes temperaturas para que se produzca un flujo de calor a través de la muestra. La diferencia de temperatura se calcula como diferencia entre las temperaturas medidas en el centro de cada plato.

2.4 Caracterización de las materias primas

A continuación, se describen los ensayos y procesos llevados a cabo para la caracterización de las materias primas así como los equipos implementados en cada proceso.

2.4.1 Ceniza Volante

La ceniza volante utilizada, fue suministrada por la constructora AHINCO S.A, que la comercializa con la marca CENIX. Esta ceniza proviene de la combustión de carbón combustible en calderas de generación de vapor de agua que usa para sus procesos la textileras de Coltejer y Fabricato.

Morfología y Composición química

Se hace el examen por microscopía electrónica de barrido (SEM) acompañada de espectroscopia de dispersión de energía (EDS). La primera para ver la morfología de la ceniza volante y la segunda para determinar su composición química.

Densidad seca aparente

La densidad aparente se obtiene dividiendo el peso de la ceniza seca que llena un recipiente de volumen conocido, por el volumen interior de ese recipiente. Se rellena el Beacker con la muestra sin producir ningún efecto de compactación

Se determina su masa en una balanza digital marca *Ohaus*, con precisión de 1/10 g y determinar su densidad por medio de la siguiente ecuación:

$$\rho_{seca} = \frac{m}{V}$$

2.4.2 Agregado o árido pétreo

Como árido pétreo se utilizó arena de cantera, misma que no ha sufrido ningún tipo de alteración desde su extracción hasta su llegada al laboratorio.

Para el proceso de secado y determinación de humedad se hace de acuerdo a la norma NTC 1776: *Método de ensayo para determinar por secado el contenido total de humedad de los agregados*, éste se lleva a cabo utilizando el horno marca *Memmer* del laboratorio de materiales de la universidad EIA realizando un calentamiento de la masa a una temperatura de 110° para eliminar la humedad presente en la muestra

Se toma una muestra de 500 gr pesado y tarado previamente en la balanza digital marca *Ohaus* con precisión de 1/10 gr, luego se introduce la mezcla en el horno por un tiempo de 24 horas.



a). Aspecto de la muestra de arena



b). Masa húmeda



c). Muestra en secado al horno



d). Masa de arena seca

Figura 5. Proceso toma de humedad de la muestra

Se pesa el recipiente nuevamente y se determina el contenido de humedad de la muestra y así ajustar la cantidad de agua a adicionar en la mezcla. El porcentaje de humedad se determina con la siguiente ecuación:

$$W = \frac{100 * (H - S)}{S} = \frac{100 * (500 - 319)}{319} = 56.73\%$$

Donde W, es porcentaje de humedad de la muestra, H es la masa húmeda en g de la muestra, y S es la masa seca en g de la muestra.

Densidad seca aparente

La densidad aparente se obtiene dividiendo el peso del árido seco que llena un recipiente de volumen conocido, por el volumen interior de ese recipiente. Se rellena el Beaker con la muestra sin producir ningún efecto de compactación.



Figura 6. Arena sin compactar en Beaker de volumen conocido.
Imagen tomada de tecnoedificacion2014

Se pesa el recipiente y se calcula la densidad aparente por medio de la siguiente fórmula:

$$P_{seca} = \frac{m}{V}$$

Granulometría

La distribución granulométrica de la arena se determinó, acorde con las recomendaciones de la norma NTC 174: *Especificaciones de los agregados para concreto*, que define los requisitos para la gradación y calidad de los agregados finos y gruesos. Esta norma establece que el agregado fino debe estar compuesto por arena natural, arena triturada o una combinación de estas.

Agregado fino es toda partícula comprendida entre el tamiz No.4 y retenido en el tamiz No.200, el proceso consiste en depositar una masa conocida de la muestra a clasificar y agitar constantemente por varios minutos hasta que todas las partículas depositadas en los tamices logren sedimentarse y no queden atrapadas en tamices de mayor apertura, luego se pesa cada tamiz en la balanza y se genera la curva granulométrica.



Figura 7. Tamices para ensayo de granulometría

2.4.3 Espuma rígida de poliuretano - PUR

El PUR empleado con el fin de medir el cambio de densidad y conductividad térmica de la mezclas geopoliméricas, proviene de los residuos sólidos generados en la industria del aislamiento térmico, reciclado de los procesos de producción de la espuma rígida en la empresa Cielotek Industrial, (Cielotek divitek S.A, s.f.) residuos éstos que se generan por no pasar un proceso de calidad, no cumplir requisitos mínimos de densidad, sobrantes de cortes a la medida de algún cliente, deformaciones en su área, entre otras.

Los trozos recogidos de este residuo de PUR se trituraron en una picadora doméstica de cuchillas para reducir su tamaño de partícula. Seguidamente, el PUR triturado se clasificó siguiendo los mismos parámetros establecidos por la norma NTC 174: *Especificaciones de los agregados para concreto* con los mismos tamices utilizados con la arena de manera que se consiguiera una distribución granulométrica lo más similar posible a la de la arena que se sustituyó.



a). Residuos de PUR



b). Máquina trituradora



c). PUR molido



d). Tamices para ensayo de granulometría



Figura 8. Proceso de transformación del residuo de PUR a materia prima para usar en la mezcla geopolimérica

Densidad seca

La densidad seca del PUR, se determinó siguiendo el mismo procedimiento utilizado en la ceniza volante y la arena pétreo, utilizando la siguiente fórmula:

$$\rho_{\text{seca}} = \frac{m}{V}$$

2.4.4 Silicato de sodio Na_2SiO_3

Para el presente trabajo de grado, se utiliza silicato de sodio suministrado por la empresa Spin S.A. mismo que ya venía caracterizado previamente desde sus instalaciones. Su ficha técnica y hoja de seguridad se encuentran en el *anexo 1* y *anexo 2* respectivamente.

2.4.5 Hidróxido de sodio - NaOH

El hidróxido de sodio (NaOH) utilizado, como activador alcalino para la polimerización de la cenizavolante, fue suministrado por la empresa ProtoKimica S.A.S, mismo que ya venía caracterizado previamente desde sus instalaciones. Su ficha técnica se encuentra en el *anexo 3*.

2.5 Procesos

A continuación, se presentan cada uno de los procesos que intervinieron en el desarrollo de la mezcla y necesarios para obtener los resultados esperados

2.5.1 Proceso de elaboración de solución alcalina 14 M

La solución de NaOH 14M se preparó disolviendo 14 moles de NaOH en 1 litro de H_2O . El NaOH tiene una masa molar de 39.9997 g /mol; de modo que para preparar la solución de 14M, se requirieron 559.958 g de escamas de NaOH disueltas en 1 L de agua corriente.

Para diluir las escamas de NaOH se utilizó agua corriente, tomada de la llave, buscando que el procedimiento de preparación de los geopolímeros se acerque a las condiciones reales en una planta de producción de elementos prefabricados.

Se debe tener mucho cuidado con la elaboración de la solución de hidróxido de sodio, debido a que la reacción producida es del tipo exotérmica y desprende gases tóxicos.

2.6 Dosificación

La dosificación de todas las mezclas estudiadas se realiza de la siguiente manera, teniendo como referencia el estudio anterior de (Valenzuela M, 2013)

1. Se supone una densidad del mortero geopolimérico de 2100 [kg/m³]
2. En todos los morteros se utiliza un 65% de árido en peso lo que corresponde a:

$$\text{Áridos} = 65\% * 2100 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 1365 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

3. La densidad del hormigón geopolimérico, involucra las materias primas que lo constituyen, por lo tanto:

$$\text{Solución alcalina} + \text{Fuente de Aluminosilicato} + \text{Árido} = 2100 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

De este modo, restando el árido se obtiene que:

$$\text{Solución alcalina} + \text{Fuente de Aluminosilicato} = 735 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

4. La relación solución alcalina a fuente de aluminosilicatos (ceniza volante) se estableció en 0,6:

$$\frac{\text{Solución Alcalina}}{\text{Fuente de Aluminosilicato}} = 0.6$$

En consecuencia, se obtiene que

$$\text{Fuente de Aluminosilicato} = 459.375 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Solución alcalina} = 275.625 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

5. Composición de la solución alcalina.

Si se deja fija la razón entre solución silicato de sodio/solución hidróxido de sodio, de acuerdo a la bibliografía consultada, se obtiene:

$$\frac{\text{Silicato de Sodio}}{\text{Hidroxido de Sodio}} = 2.5$$

De esta manera se tiene que

$$\text{Silicato de Sodio} = 196.875 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Hidroxido de Sodio} = 78.25 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Las cantidades requeridas para preparar el mortero geopolimérico de referencia se resumen en la tabla 9.

Tabla 9. Dosificación de la mezcla

Compuesto de la mezcla	Kg/m ³
Fuente de aluminosilicatos	459.375
Solución NaOH	78.25
Solución Na ₂ SiO ₃	196.875
Arena Normal	1365

2.6.1 Elaboración de las probetas para ensayos

La resistencia a la compresión se realizó sobre probetas cúbicas. Las probetas se elaboraron con el mortero geopolimérico de referencia y con morteros geopoliméricos en los que el árido pétreo se sustituyó por residuo de PUR en porcentajes volumétricos de 25, 30 y 40.

La cantidad de probetas elaboradas para los ensayos de resistencia a la compresión, sobre de 50 mm de lado acorde con la norma NTC 220: *Determinación de la resistencia de morteros de cemento hidráulico a la compresión, usando cubos de 50 mm o 2 pulgadas de lado*, y para los ensayos de conductividad térmica, sobre placas de 150 mm de lado y 25 mm de espesor según norma ASTM C 177: *Mediciones de flujo de calor en régimen permanente y propiedades de transmisión térmica por medio de la placa calientes*, se resumen en las tablas 10 y 11.

Tabla 10. Distribución de mezclas a experimentar

PUR que sustituye al árido pétreo (% v/v)	Ceniza volante (%v/v)	Número probetas Compresión	Número probetas conductividad térmica
0%	100%	9	0
25%	100%	9	1
30%	100%	9	1
40%	100%	9	1

Tabla 11. Volumen de probetas a usar

Ensayo a compresión		Ensayo conductividad térmica	
Volumen probeta (cm3)	125	Volumen probeta (cm3)	562.5
Volumen probeta (mm3)	125,000	Volumen probeta (mm3)	562,500
N° Probetas	36	# Probetas	3

Estudios anteriores realizados por (Mounanga, Gbongbon, Poullain, & Turcry, 2008) (Petrement & Junco, 2012) indica que debido a la porosidad de la espuma de PUR – 98% - la deformación y absorción por los agregados livianos no solo modifican el volumen sino también la composición del mortero fabricado: el aumento de la densidad de espuma PUR influye en la dosificación de los otros componentes. Hecho este que fue verificado experimentalmente. Si se utilizaba la misma dosificación de materias primas acorde aumentaba la sustitución de PUR por el árido pétreo, al final no había suficiente mezcla para llenar el volumen requerido por las 3 probetas, esto debido a la forma y porosidad abierta de las partículas de PUR, pues la mayor superficie de las partículas, a igualdad de volumen, implica un requerimiento mayor de mezcla para recubrir esas partículas, de esta forma el rendimiento de mortero disminuye y en consecuencia el volumen de los otros componentes de la mezcla aumenta.

Las cantidades de materias primas requeridas para elaborar las probetas para ensayo de compresión y de conductividad térmica se resumen en las tablas 12 y 13, respectivamente:

Tabla 12. Cantidades por cada probeta para resistencia a la compresión

Materiales	Geopolimérica (gr)	PUR 25% (gr)	PUR 30% (gr)	PUR 40% (gr)
Ceniza Volante	57.422	57.422	57.422	57.422
Hidróxido de sodio (NaOH)	9.781	9.781	9.781	9.781
Silicato de sodio (Na ₂ SiO ₃)	24.609	24.604	24.604	24.604
Arena	170.625	127.965	119.43	102.372
PUR		1.777	2.131	2.841

Tabla 13. Cantidades por cada probeta para ensayo de conductividad térmica

Materiales	Geopolimérica (gr)	PUR 25% (gr)	PUR 30% (gr)	PUR 40% (gr)
Ceniza Volante	1033.594	1033.594	1033.594	1033.594
Hidróxido de sodio (NaOH)	176.063	176.063	176.063	176.063
Silicato de sodio (Na ₂ SiO ₃)	442.969	442.969	442.969	442.969
Arena	3071.250	2303.438	2149.875	1842.750
PUR		31.992	38.391	51.188

Para la preparación de cada una de las mezclas se siguen los siguientes pasos, cabe resaltar que el procedimiento fue el mismo en el caso de la mezcla geopolimérica patrón y aquellos donde se hizo sustitución de PUR por el árido pétreo:

1. Se pesan los componentes del mortero conforme a la dosificación calculada
2. En el agitador magnético se mezcla el silicato de sodio y la solución de hidróxido de sodio para obtener la solución alcalina
3. Luego se adiciona la mitad de la masa necesaria de la solución alcalina en el mezclador.
4. Se agrega la arena y se mezcla por 60 segundos.
5. Se agrega la ceniza volante y el contenido de PUR y se mezclan durante 60 segundos.
6. Se agrega la mitad restante de la solución alcalina y se mezcla durante cuatro (4) minutos.
7. Se agrega una cantidad extra controlada de agua para dar manejabilidad a la mezcla
8. Se verifica una fluidez y viscosidad de la mezcla de modo que cumpla con los asentamientos y una manejabilidad apropiada



a). Pesaje de materiales



b). Materias primas que conforman la mezcla geopolimérica



c). Agitador magnético para homogenizar la mezcla alcalina



d). Adición de mitad la Sln. Alcalina



e). Adición de árido pétreo



f). Mezcla de Sln. Alcalina y arena



g). Adición de ceniza volante



h). Adición de PUR



i). Adición de la mitad restante de Sln. Alcalina



k). Fluidez de la mezcla



l). Manejabilidad de la mezcla



j). Preparación de la mezcla geopolimérica

Figura 9. Proceso elaboración mezcla geopolimérica

2.6.2 Conformación de probetas.

- El molde para los ensayos a compresión, 3 cubos de 5x5x5 cm es impregnado con material desmoldante para evitar la adherencia de los cubos con los moldes metálicos y desmoronar las mezclas al retirarlas
- Se vacía el mortero en dos capas, una primera capa, de aproximadamente la mitad de la altura del molde, es apisonado con una espátula o martillado con el chipote ejerciendo alrededor de 30 golpes para asegurar que salga todo el aire presente en la mezcla y no presenten hormigoneos en la mezcla final, éste proceso se repite en la otra capa y al final se enrasa con la espátula.
- Se etiquetan las probetas para su posterior identificación y se envuelven en papel Vinipel para evitar la pérdida de humedad excesiva en las muestras.
- El molde, para los ensayos de conductividad térmica, 1 placa de 15x15x2.5 cm de material MDF (aglomerado de fibra de celulosa) es impregnado con material desmoldante para evitar la adherencia de la muestra con los bordes de la formaleta y así desmoronar las mezclas al retirarlas
- El proceso de vaciado es similar al realizado con el mortero para compresión. En 2 capas diferentes apisonando con espátula o chipote, alrededor de 30 golpes, para liberar el aire presente y así asegurar una homogeneidad en la placa, al final se enrasa con la espátula para darle uniformidad.
- Se etiquetan las placas para su posterior identificación.



a). Mezcla geopolimérica vaciar en las probetas



b). Probeta de mezcla geopolimérica



c). Apisonamiento con chipote para garantizar compactación



d). Probetas rotuladas envueltas en Vinipel listas para el curado

Figura 10. Proceso conformación de probetas

2.7 CURADO

- **Temperatura Ambiente**

Las probetas se desmoldan luego de 24 horas y se procede a tomar la masa de cada uno de las muestras así como sus medidas volumétricas con pie de rey.



Figura 11. Muestras geopoliméricas para su dimensionamiento con pie de rey

El curado se realiza humedeciendo las muestras y recubriendo el material con papel Vinipel para evitar la evaporación del agua presente y asegurar que ésta permanezca humedecida

- **Térmico**

Las condiciones de curado térmico se seleccionaron siguiendo recomendaciones de la literatura científica y trabajos anteriores (García, Higuera, Rea, Casarez, & Gómez, 2012), (Valenzuela M, 2013), (Patcharapol, y otros, 2015) donde se evidenció que los geopolímeros curados térmicamente desarrollan mayor resistencia que aquellos curados por procesos convencionales.

Las probetas se desmoldan luego de 24 horas y se procede a tomar la masa de cada uno de las muestras así como sus medidas volumétricas con pie de rey.

El curado se realiza introduciendo las muestras en el horno marca *Memmer* por 24 horas a una temperatura de 80°C y recubriendo el material con papel Vinipel para que el agua que se evapora quede atrapada y evitar así la pérdida de humedad en la muestra.

- **En agua**

Después de concluidas las 24 horas de curado térmico, un grupo de probetas fue sumergido en agua controlando su temperatura a 23°C por medio de una resistencia marca *Aquarium Heater* y otras se dejaron reposando al aire en condiciones atmosféricas para medir el cambio de resistencia compresiva después de los 14 días. Lo anterior para analizar cual proceso de postcurado induce una ganancia de resistencia a la compresión del mortero geopolimérico.



Figura 12. Resistencia para curado en agua

2.8 ENSAYOS

Compresión

El ensayo a compresión se da en la máquina del laboratorio de materiales siguiendo la NTC 673: *Ensayo de resistencia y compresión de cilindros normales de hormigón* y con esto determinar el esfuerzo de falla a compresión f'_c de las muestras.



Figura 13. Máquina a compresión del laboratorio de materiales EIA

Conductividad Térmica

El ensayo de placas calientes se iba a dar en un principio en el laboratorio de máquinas térmicas de la Universidad Nacional de Medellín bajo la ASTM C 177: *Mediciones de flujo de calor en régimen permanente y propiedades de transmisión térmica por medio de la placa calientes*, pero debido a un proceso de acreditación que sufría el laboratorio en ese entonces, no se pudo habilitar el laboratorio para desarrollar el ensayo y con esto determinar

si las muestras geopoliméricas aligeradas con PUR era un buen aislante térmico.

Por otro lado, se decidió hacer un montaje artesanal en la universidad EIA que constaba de un marco de poliestireno expandido (EPS) que servía de soporte de la placa y a su vez de aislante térmico para conservar la temperatura de la muestra, cuatro (4) termopares que medían la temperatura, dos (2) en la cara fría y dos (2) en la cara caliente de la placa, cuatro (4) sensores de temperatura, uno (1) para cada termopar y por último una (1) pistola de calor que sirve para introducir calor a la mezcla y poder determinar el aislamiento. El montaje se evidencia en la figura 14.



Figura 14. Montaje ensayo de conductividad térmica

3. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en la etapa experimental de este trabajo y cómo influyen las diferentes variables incluidas en la investigación en las propiedades físicas y mecánicas, el reemplazo total del cemento por ceniza volante y la inclusión de la espuma rígida de poliuretano.

3.1 Caracterización de las materias primas

Ceniza volante

Para determinar la clase de ceniza volante empleada en la mezcla de mortero, se determinó por microscopía electrónica de barrido (SEM) y espectroscopia de dispersión de energía (EDS) la morfología y composición química de la ceniza. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 14

Tabla 14. Composición elemental de la ceniza volante EDS

Element Symbol	Atomic Conc.	Weight Conc.	Oxide Symbol	Stoich. wt Conc.
O	69.9	52.97		
Si	15.26	20.30	SiO ₂	35.05
Al	8.94	11.43	Al ₂ O ₃	58.44
Na	1.24	1.35	Na ₂ O	2.32
Sr	1.19	4.94	SrO	8.51
Ca	1.11	2.11	CaO	3.64
Fe	1.02	2.70	Fe ₂ O ₃	4.68
In	0.65	3.54	In	6.12
Mg	0.58	0.67	MgO	1.15

De la estequiometría de la muestra se puede concluir que la suma de Si + Fe + Al es mayor al 70% de la composición de la mezcla por lo que se determina que es una ceniza volante tipo F.

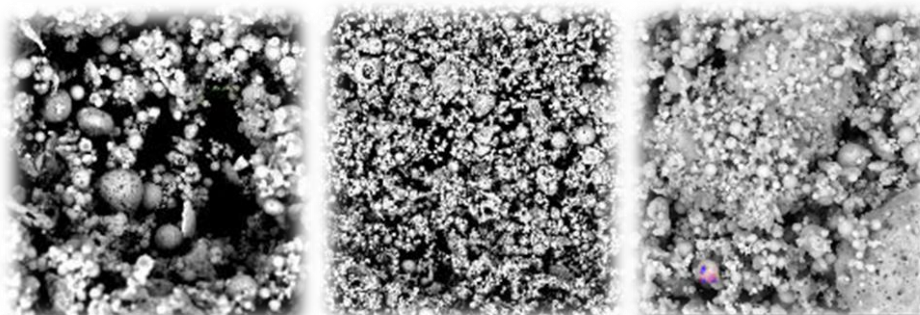


Figura 15. Microscopía SEM. FOV: 86.6 μm , Mode: 15kV - Image Full, Detector: BSD, Time: APR 16 2018 09:43

En la figura 15 se puede observar que la morfología de la ceniza es mayormente circular con algunas partículas achatadas y de formas irregulares. Para mayor información sobre la composición química y el espectro de análisis químico elemental por EDS, remitirse al *Anexo 4* y sobre la ficha técnica de la ceniza volante utilizada, remitirse al *Anexo 5*.

Granulometría

Teniendo en cuenta que el agregado PUR iba a ser sustitutivo únicamente del árido pétreo, se estableció que la finura, geometría y tamaño de las partículas fuera lo más similar posible de modo que ambas cumplieran los requisitos establecidos en la norma NTC 174 donde se establece que las partículas que conforman el agregado fino deben estar clasificadas dentro de los límites de la tabla 15.

Tabla 15. Límites agregado fino

Tamiz NTC 32 (ASTM E 11)	Porcentaje que pasa
9,5 mm	100
4,75 mm	95 a 100
2,36 mm	80 a 100
1,18 mm	50 a 85
600 µm	25 a 60
300 µm	10 a 30
150 µm	2 a 10

Una vez conocida la metodología a implementar, en el laboratorio de materiales de la universidad EIA se usaron los tamices desde la malla 4 hasta la malla 200, obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 16. Curva granulométrica Arena y PUR

Curva Granulométrica Arena y PUR									
Tamiz	Abertura (mm)	Peso Retenido - Arena (g)	% Retenido Parcial - Arena (g)	% Retenido Acum. - Arena	% Pasa - Arena	Peso Retenido PUR (g)	% Retenido Parcial - PUR	% Retenido Acum. - PUR	% Pasa - PUR
4	4.76	15	1%	0.76%	99.24%	0	0%	0.00%	100.00%
8	2.36	165	8%	9.09%	90.91%	169	9%	8.60%	91.40%
16	1.18	480	24%	33.33%	66.67%	269	14%	22.29%	77.71%
30	0.6	510	26%	59.09%	40.91%	643	33%	55.01%	44.99%
50	0.3	375	19%	78.03%	21.97%	384	20%	74.55%	25.45%
100	0.15	285	14%	92.42%	7.58%	257	13%	87.63%	12.37%
200	0.075	150	8%	100.00%	0.00%	243	12%	100.00%	0.00%
Masa total		1980				1965			

A partir de estos datos se obtiene la curva de distribución granulométrica para ambas muestras mostrada en la figura 18.

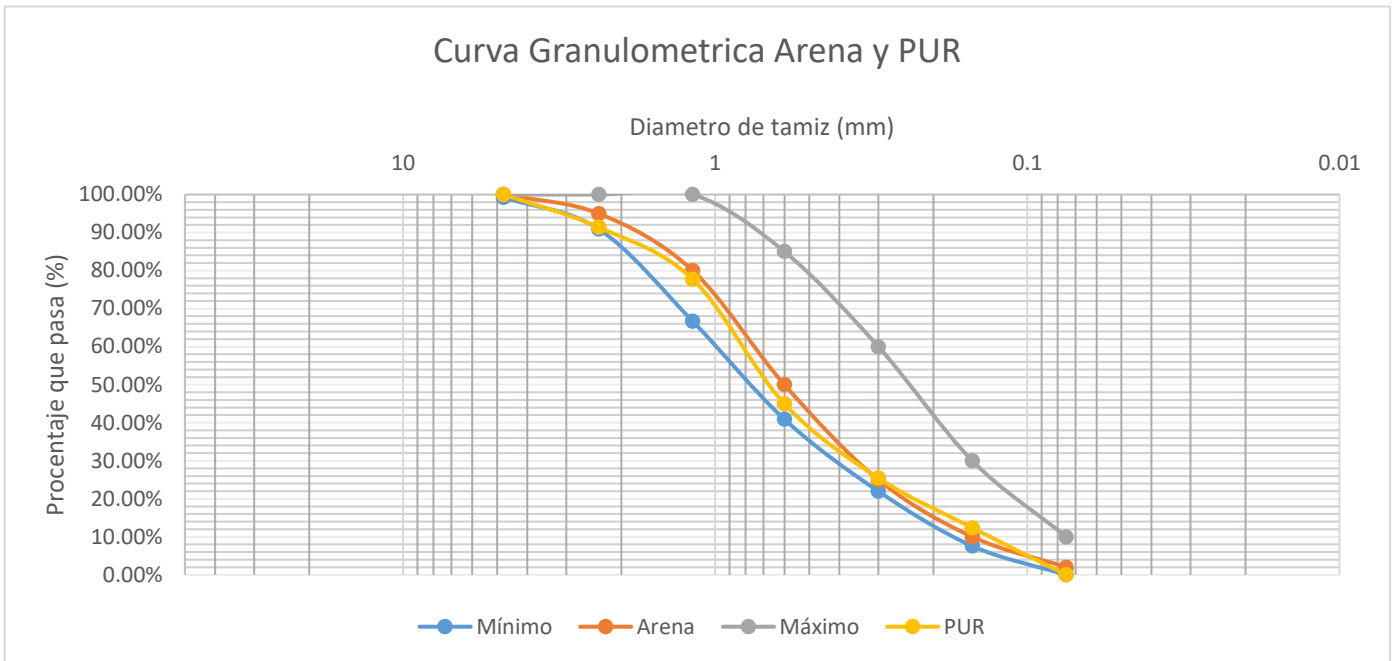


Figura 16. Distribución granulométrica de las muestras de arena y residuos de PUR usados en la mezcla geopolimérica

En la figura 16 se puede observar que las dos curvas se ajustan dentro de los límites establecidos por la norma NTC 174 y su gradación es muy similar por lo que los espacios a cubrir por cada una dentro de la muestra geopolimérica serán del mismo orden.

Densidad seca aparente

En el laboratorio de química de la universidad EIA, se procedía a llenar un Beaker con 80 cm³ de cada material, bien sea, árido pétreo, ceniza volante y PUR una vez conseguido el volumen requerido y sin ir a compactar, se tomaba la masa de la muestra luego de tarar el Beaker para finalmente obtener la densidad de cada materia prima. Los datos obtenidos se muestran en la tabla 17.

Tabla 17. Densidad seca aparente de las materias primas

Densidad Seca Aparente (g/cm ³)	
Ceniza Volante	0.75
Árido Pétreo	1.475
PUR	0.0625

3.2 Comportamiento mecánico de morteros geopoliméricos

3.2.1 Densidad de mortero geopolimérico de referencia y sustituciones parciales de arena por PUR curado a temperatura ambiente

Los diferentes morteros se clasificaron así: mortero geopolimérico de referencia (PAT), morteros geopoliméricos con sustitución parcial de arena por 25% de PUR (PUR25), morteros geopoliméricos con sustitución parcial de arena por 30% de PUR (PUR30) y morteros geopoliméricos con sustitución parcial de arena por 40% de PUR (PUR40). La caracterización se realizó sobre grupos de 3 probetas para edades de curado a temperatura ambiente correspondientes a 3, 14 y 28 días.

Las tablas 18, 20, 22 y 24 en el Anexo 6, recopilan las medidas y densidades de los morteros geopoliméricos PAT, PUR25, PUR35 y PUR40 respectivamente realizadas tras 3, 14 y 28 días de curado al aire libre.

En las figuras 18, 19, 20 y 21 se puede observar la variación de la densidad con el contenido de PUR para edades de curado de 3, 14 y 28 días.

Mezcla geopolimérica de referencia - PAT

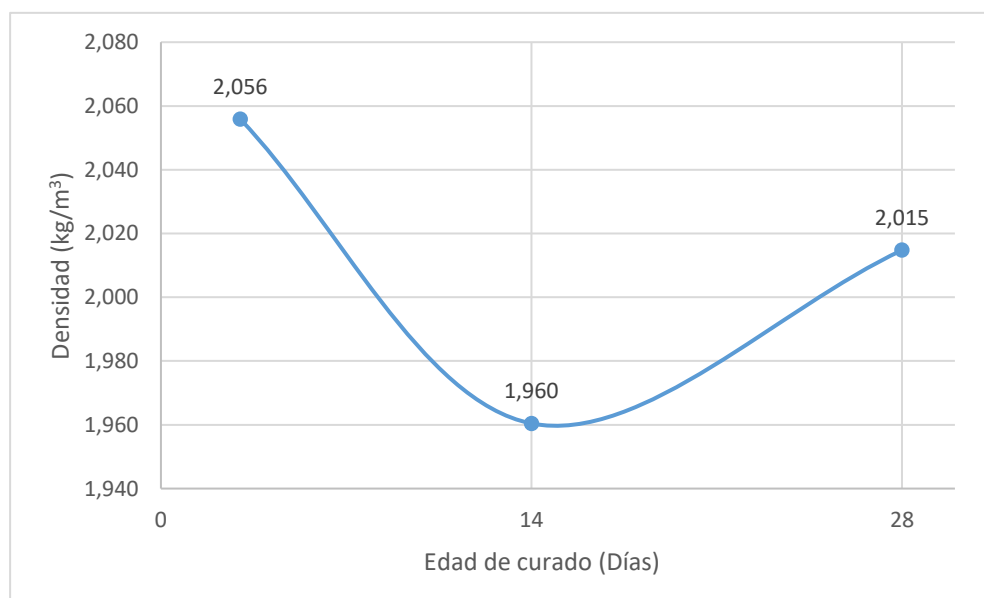


Figura 18. Densidad geopolimérica patrón mezcla en función del periodo de curado

En la figura 18, se observa una caída de la densidad a los 14 días y luego una recuperación de la misma a los 28 días, lo que sugiere que pudo ocurrir un aumento en la humedad del ambiente donde se estaban curando las muestras.

Mezcla geopolimérica con sustitución parcial de arena por 25% de PUR - PUR25

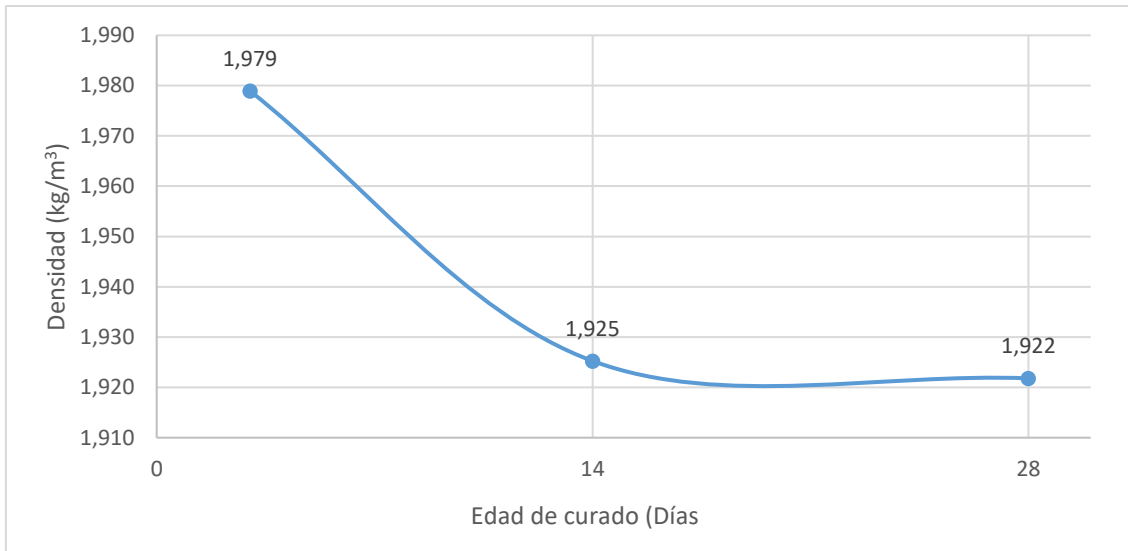


Figura 19. Densidad mezcla geopolimérica PUR25 en función del periodo de curado

A partir de la Figura 19 se puede observar, una estabilización de densidad tras los 14 días de curado; sin embargo parece haber un leve aumento acercándose a los 28 días de curado.

Mezcla geopolimérica con sustitución parcial de arena por 30% de PUR – PUR30

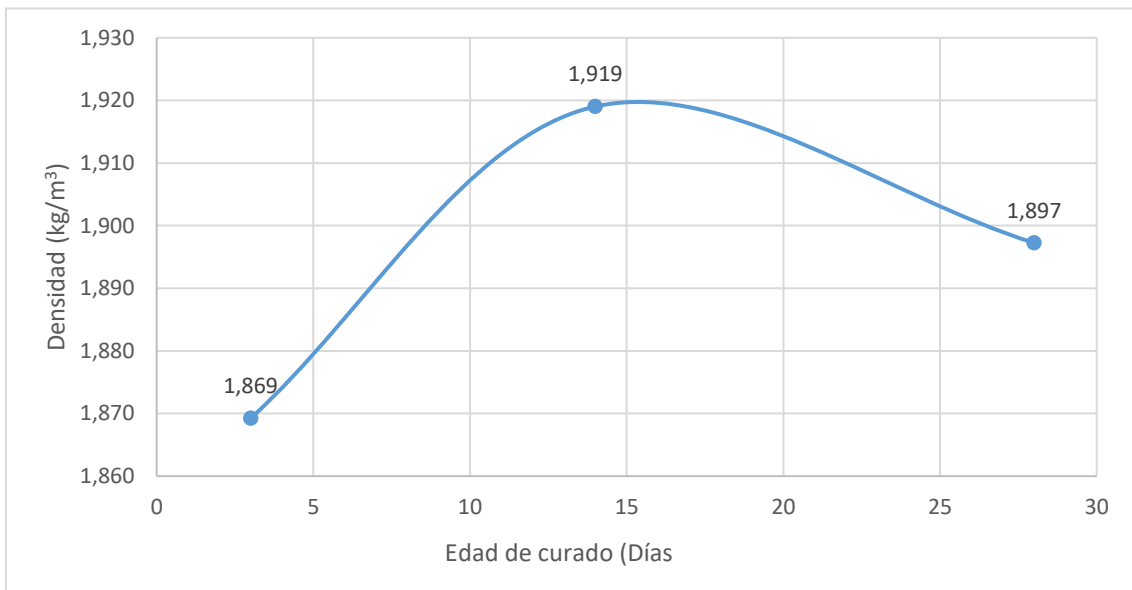


Figura 20. Densidad mezcla geopolimérica PUR30 en función del periodo de curado

En la figura 20, se observa un aumento de la densidad a los 14 días y luego una caída de la misma a los 28 días, presentando un comportamiento inverso al presentado por la muestra geopolimérica de referencia, lo que sugiere que pudo ocurrir un aumento en la humedad del ambiente donde se estaban curando las muestras, una dosificación que presentó errores humanos o exceso de humedad en la mezcla

Mezcla geopolimérica con sustitución parcial de arena por 40% de PUR – PUR40

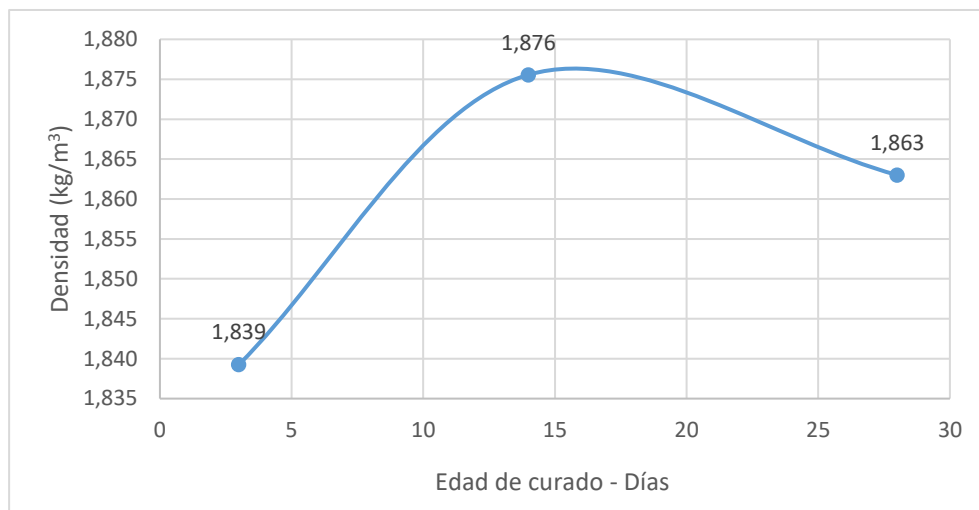


Figura 21. Densidad mezcla geopolimérica PUR40 en función del periodo de curado

En la figura 21, se observa un aumento de la densidad a los 14 días y luego una caída de la misma a los 28 días, presentando un comportamiento inverso al presentado por la muestra geopolimérica de referencia, lo que sugiere que pudo ocurrir un aumento en la humedad del ambiente donde se estaban curando las muestras, una dosificación que presentó errores humanos o exceso de humedad en la mezcla

3.2.2 Resistencia de mortero geopolimérico de referencia y sustituciones parciales de arena por PUR curado a temperatura ambiente

Los diferentes morteros se clasificaron así: mortero geopolimérico de referencia (PAT), morteros geopoliméricos con sustitución parcial de arena por 25% de PUR (PUR25), morteros geopoliméricos con sustitución parcial de arena por 30% de PUR (PUR30) y morteros geopoliméricos con sustitución parcial de arena por 40% de PUR (PUR40). La caracterización se realizó sobre grupos de 3 probetas para edades de curado a temperatura ambiente correspondientes a 3, 14 y 28 días.

La tabla 19, 21, 23 y 25 en el Anexo 6, resume los resultados de la resistencia a la compresión de los morteros geopoliméricos PAT, PUR25, PUR35 y PUR40 respectivamente curados al aire libre en periodos de 3, 14 y 28 días.

En las figuras 22, 23, 24 y 25 se puede observar la variación de la densidad con el contenido de PUR para edades de curado de 3, 14 y 28 días.

Mezcla geopolimérica de referencia - PAT

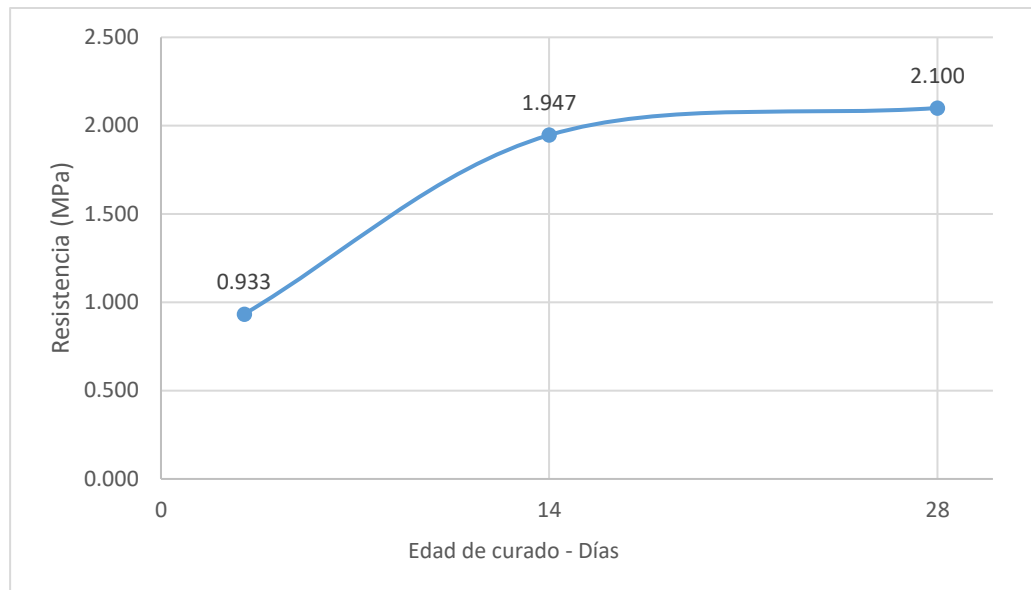


Figura 22. Resistencia mezcla geopolimérica patrón en función del tiempo de curado

Se observa que los morteros geopoliméricos incrementan rápidamente su resistencia compresiva entre los 3 y 14 días de curado al aire libre; sin embargo, entre los 14 y 28 días de curado el incremento de resistencia es más leve. Esto puede deberse a que durante los primeros días de curado ocurre un aumento progresivo y significativo del volumen de los geles geopoliméricos producidos en las etapas tempranas de hidratación como lo informan las investigaciones de (Palomo, y otros, 2014) (Lee W.K.W, 2002) (Valenzuela M, 2013). El aumento menos significativo pero progresivo de resistencia tras los 14 días de curado, puede deberse a que conforme disminuye el agua de hidratación disponible, por evaporación y consumo, ocurre una disminución de reactividad entre los aluminosilicatos de la ceniza volante y con los iones alcalinos Na^+ de la solución alcalina activadora y por ende se disminuye la tasa de formación de geles poliméricos que regresivamente se dosifican.

Mezcla geopolimérica con sustitución parcial de arena por 25% de PUR – PUR25

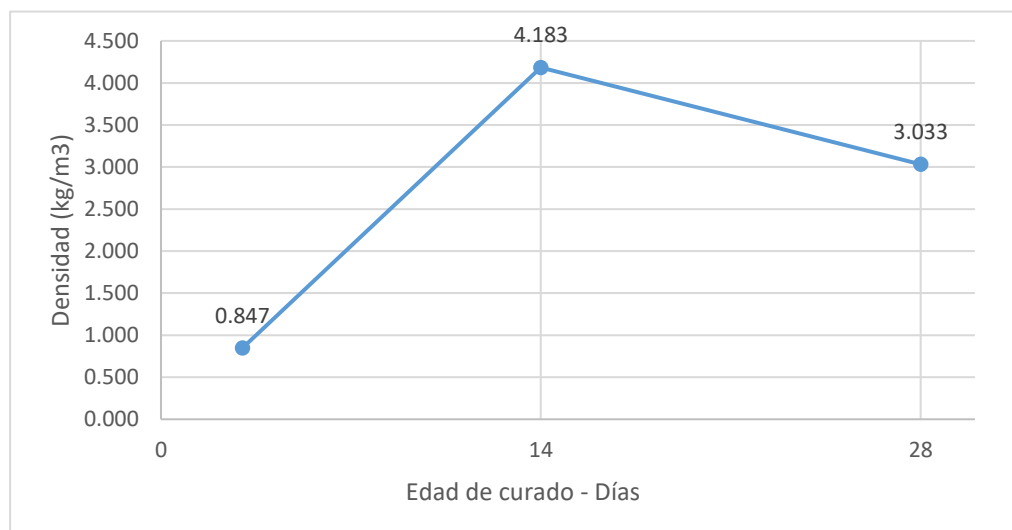


Figura 23. Resistencia mezcla geopolimérica PUR25 en función del tiempo de curado

Se observa que los morteros geopoliméricos PUR25 incrementan rápidamente su resistencia compresiva entre los 3 y 14 días de curado al aire libre; sin embargo, entre los 14 y 28 días ocurre una caída de la resistencia, puede ser a una mala compactación de la mezcla que dejó burbujas de aire los que genera planos de falla que no permiten que la muestra desarrolle toda su capacidad de resistencia a los 28 días cuando es sometida a esfuerzos de compresión.

Mezcla geopolimérica con sustitución parcial de arena por 30% de PUR – PUR30

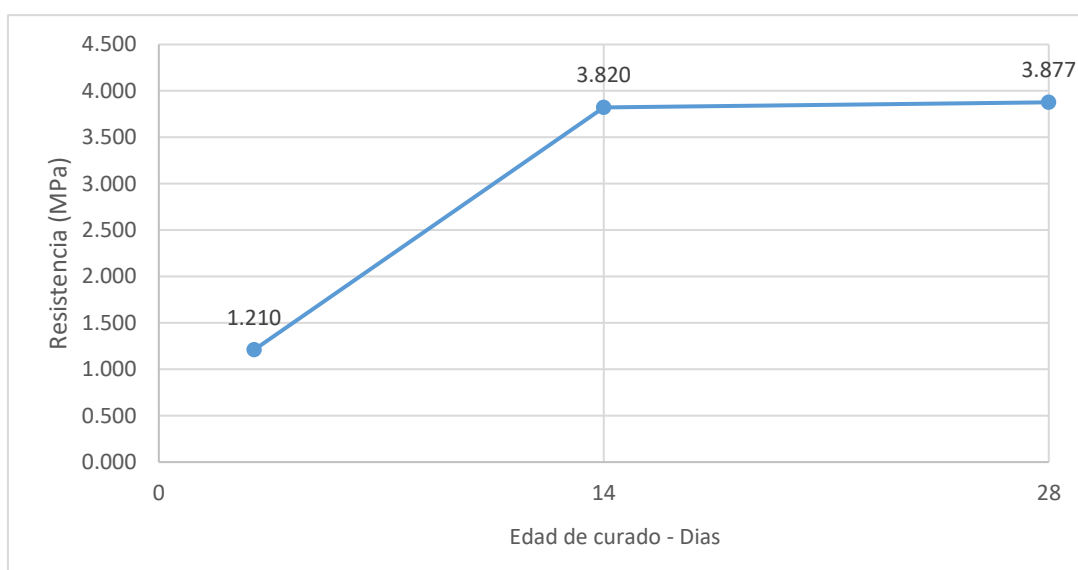


Figura 24. Resistencia mezcla geopolimérica PUR30 en función del tiempo de curado

Se observa un comportamiento muy similar al obtenido en las muestras geopoliméricas de referencia donde se evidencia un cambio importante en la resistencia a compresión entre los 3 y 14 días y luego se estabiliza el comportamiento de la misma, no se evidencia un aumento en las resistencias entre el PUR25 y el PUR30 lo que nos da a entender que muy posiblemente si hubo un exceso de humedad en las muestras.

Mezcla geopolimérica con sustitución parcial de arena por 40% de PUR – PUR40

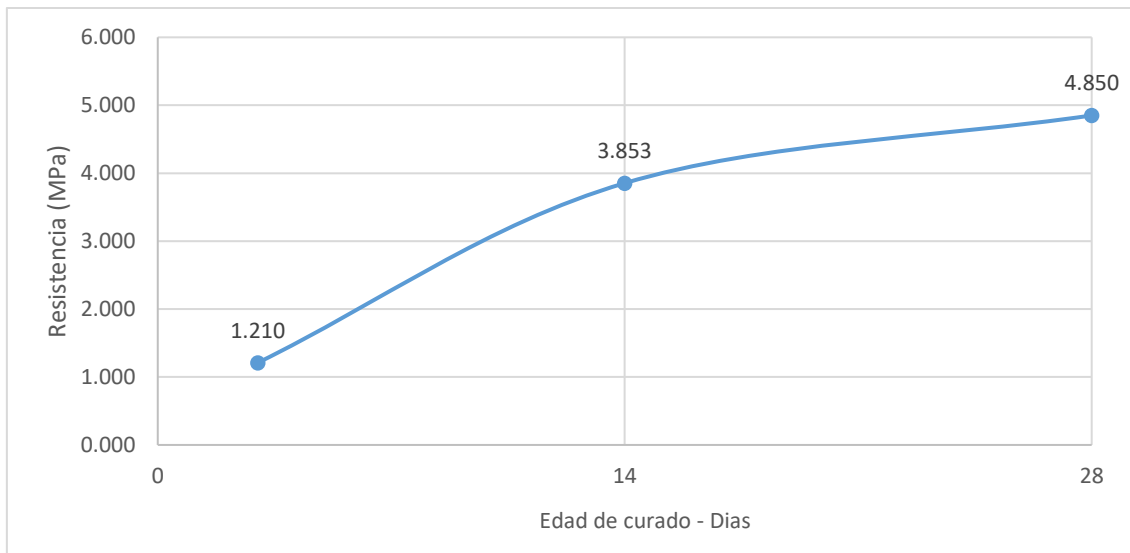


Figura 25. Resistencia mezcla geopolimérica PUR40 en función del tiempo de curado

Se observa un más lineal donde a pesar que la resistencia a comprensión entre los 3 y 14 días tuvo un cambio pronunciado, entre los 14 y 28 días también se observa una ganancia de resistencia considerable, mayor que en las otras muestras experimentales.

3.2.3 Influencia de la densidad sobre la resistencia a compresión

Para entender mejor los resultados obtenidos, se procedió a consolidar los datos recogidos a partir de las diferentes pruebas experimentales y en ese sentido tener una mejor perspectiva de la información recopilada y poder ilustrar la variación de la resistencia a compresión de las muestras en función de su propia densidad. A continuación, en la tabla 26, se muestra la información de los morteros geopoliméricos fabricados.

Tabla 18. Compendio de información mezclas geopoliméricas

Mezcla	Masa - gr	Volumen - mm ³	Densidad - kg/m ³	Resistencia - MPa	Curado - Días
PAT	262.0	127,443	2,056	0.933	3
PUR25	251.0	126,837	1,979	0.847	
PUR30	219.0	117,178	1,869	1.210	
PUR40	223.0	121,250	1,839	1.210	
PAT	239.0	121,892	1,960	1.947	14
PUR25	225.3	117,049	1,925	4.183	
PUR30	250.3	128,135	1,919	3.820	
PUR40	246.8	131,615	1,876	3.853	
PAT	260.3	129,216	2,015	2.100	28
PUR25	247.3	128,699	1,922	3.033	

Mezcla	Masa - gr	Volumen - mm ³	Densidad - kg/m ³	Resistencia - MPa	Curado - Días
PUR30	243.7	128,457	1,897	3.877	
PUR40	228.3	122,353	1,863	4.850	

La figura 26, relaciona la variación de resistencia a la compresión con la densidad de los morteros geopoliméricos, sin y con sustitución de arena con residuos de PUR, para diferentes edades de curado.

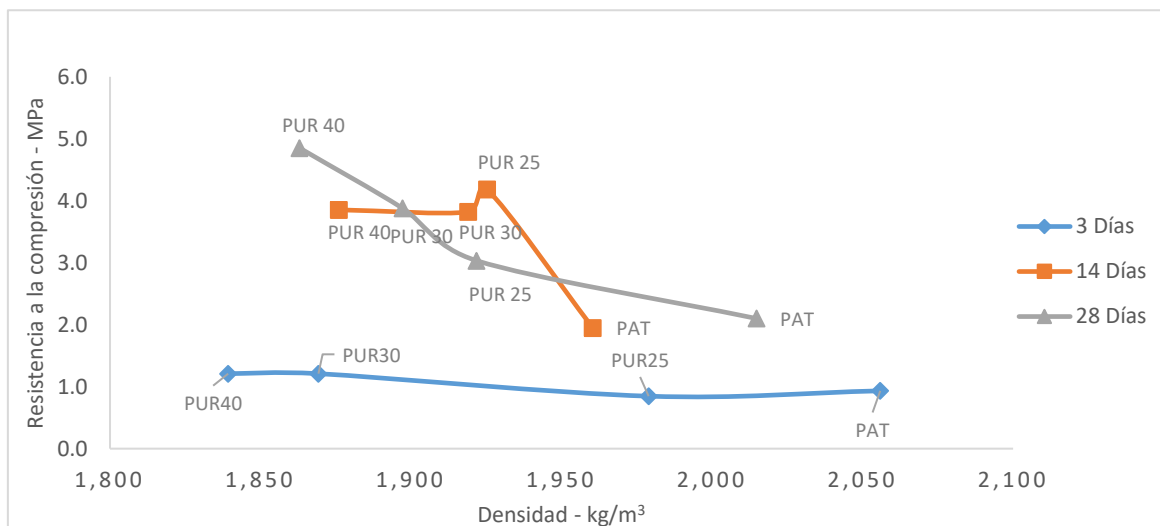


Figura 26. Variación de la resistencia con respecto a la densidad según el contenido de PUR a diferentes edades de curado

En general, para las tres edades de curado es posible ver una disminución en la resistencia a la compresión de los hormigones geopoliméricos conforme su densidad aumenta. En todos los casos, la densidad disminuye al incrementar el contenido de residuos de PUR puesto que al tratarse de partículas de una espuma almacenan un volumen de aire que contribuye a reducir la masa del mortero geopolimérico.

Tras el día 3 de curado la variación de resistencia no es muy significativa. A los 14 días de curado, aumenta la resistencia compresiva de los geopolímeros; pero además los geopolímeros que contienen PUR superan en resistencia al geopolímero patrón. En los hormigones geopoliméricos ensayados a los 14 y 28 de curado, se ve una coincidencia en la resistencia a compresión de las probetas patrón y de las probetas con 30% PUR; siendo notable la diferencia con el contenido de 40% PUR, además que con el 25% PUR se detecta una desviación de la tendencia. Se asume que esta desviación puede deberse a variaciones en las condiciones de curado al aire libre debido a cambios de la temperatura y la humedad relativa del aire en el laboratorio de materiales de la Universidad EIA, ubicado en el alto de las Palmas. Otra posibilidad puede atribuirse a diferencias en la granulometría de la arena y PUR; considerando además que la arena está formada por minerales dureza variable que afectan la resistencia mecánica del mortero. Después de 28 días de curado, es mucho más notorio que al disminuir la densidad del geopolímero, por aumento en la cantidad de PUR, aumenta su resistencia a la compresión.

En un hormigón convencional la resistencia a la compresión aumenta entre mayor sea su densidad como consecuencia de adiciones crecientes de agregados pétreos duros. Sin embargo, los morteros geopoliméricos elaborados para este estudio muestran el comportamiento contrario. Este comportamiento, puede atribuirse a que la espuma rígida de poliuretano posee una alta deformación y recuperación elástica que le permite absorber una fracción de la carga compresiva aplicada al mortero geopolimérico, caso contrario ocurrió en estudios donde no se utilizaron morteros geopoliméricos sino tradicionales con cemento Portland y donde se usaron morteros geopoliméricos pero con adición de goma (Petrement & Junco, 2012) (Patcharapol, y otros, 2015) lo que podría indicar que no es solamente la adición de PUR sino la combinación con ceniza volante activada alcalinamente. Dicho comportamiento que, como se dijo antes, es notorio en los morteros geopoliméricos curados por 28 días, puede atribuirse a la formación de mayor volumen de los geles poliméricos tridimensionales que le confieren a la matriz geopolimérica mayor rigidez. Se piensa que las partículas de PUR no interfieren o participan en el proceso de geopolimerización de la ceniza volante, pero no se tiene certeza, que el PUR tenga porosidad interconectada que favorezca la formación de geles poliméricos en su interior. Para dilucidar esta hipótesis de requiere realizar una inspección detallada por microscopia SEM, que escapa del alcance de este trabajo de grado.

3.2.4 Influencia de la variable curado al horno de las muestras

Dado que las bajas resistencias desarrolladas por morteros geopoliméricos curados en aire libre no los habilita como materiales estructurales, se sometieron algunas probetas a un curado térmico en horno eléctrico a 80°C por 24 horas, siguiendo las recomendaciones de diversos estudios (Valenzuela M, 2013) (Torres-Carrasco & Puertas, 2017), que afirman que se consigue aumentar la resistencia de los geopolímeros. Se decidió elaborar probetas de mortero geopolimérico, de referencia y con 40% PUR, donde debido a la sustitución realizada fuera posible determinar experimentalmente si el curado térmico enaltece la resistencia mecánica y si permanecía el comportamiento de aumento de resistencia por la incorporación de PUR.

Tabla 19. Resistencia a compresión muestras curadas al horno

Mezcla	Masa - gr	Volumen - mm ³	Densidad - kg/m ³	Resistencia - MPa	Curado - Días	Método
PAT	251.0	130,837	1,918	5.460	1	80° - Al horno
PUR40	243.0	131,068	1,854	8.980		
PAT	262.0	128,123	2,045	5.270	14	80° - Al Agua
PUR40	246.0	131,152	1,876	8.910		
PAT	263.0	126,404	2,081	5.570	14	80° - Al Aire
PUR40	251.0	128,125	1,959	7.480		

Las muestras fueron ensayadas a los 1 y 14 días posteriores al curado térmico. Después del curado térmico, un grupo de probetas se envolvieron en una película de plástico dejándolas curar por 14 días al aire libre; mientras que otro grupo similar se curó por 14 días sumergidos en agua a 23 ° C.

Esto se hizo para verificar la influencia del medio de curado en el proceso de geopolimerización y por ende sobre la resistencia a la compresión

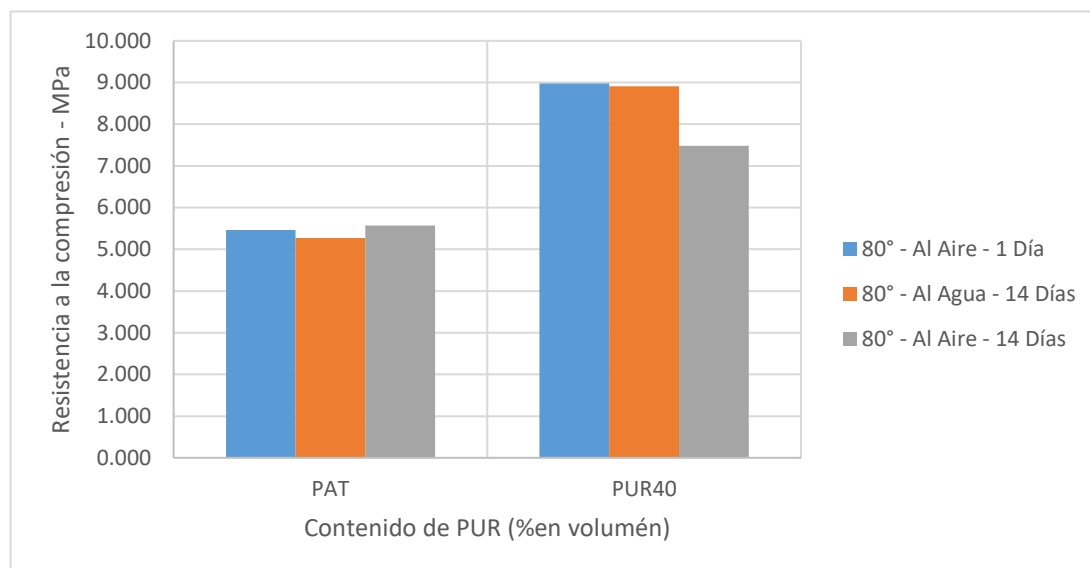


Figura 27. Resistencia compresión de morteros geopoliméricos curados a 80° por 24 horas

La figura 27, ratifica que la sustitución de la arena (árido pétreo fino) contribuye a mejorar la resistencia a la compresión del mortero geopolimérico y esto ocurre independientemente del proceso de curado efectuado. Para el mortero geopolimérico patrón, se observa que el método de curado posterior al curado térmico no induce mejora en la resistencia a la compresión. Un comportamiento similar se observa para el mortero geopolimérico con 40% PUR, con una caída de resistencia de las probetas que completaron su curado al aire libre que puede deberse a variación en la granulometría de la arena y el PUR.

3.2.5 Ensayo de conductividad térmica

El ensayo de conductividad térmica, se realizó para determinar en qué medida la adición de los residuos de PUR en diferentes proporciones proporciona aislamiento térmico al mortero geopolimérico.

Se elaboraron cuatro (4) probetas de ensayos como placas 15x15x2.5 cm³ (patrón, PUR25, PUR30, PUR40) Estas probetas, se instalaron por separado sobre un marco de poliestireno expandido (ESP) para reducir pérdidas laterales de calor. Una de las caras se calentó con una pistola de aire caliente, de modo que el flujo calórico a través del espesor de las probetas se midió con 4 termopares conectados, de en pares, sobre ambas caras de cada probeta.

Los resultados del ensayo de conductividad térmica en las placas de mortero geopoliméricos con sustitución de la arena con 25, 30 y 40% en volumen de PUR, se listan en la tabla 28, las variables que se relacionan indican lo siguiente; T – (min) Tiempo transcurrido entre cada medición de

temperatura; S1 y S2 Termopares instalados en la cara caliente del ensayo;
S3 y S4 Termopares instalados en la cara fría del ensayo

Tabla 20. Recopilación de datos experimentales placas calientes en la cara fría

T - (min)	S3	S4	PUR
0	18.3	18.6	25%
2.5	18.4	18.6	
5	19.8	20.8	
7.5	22.3	24.2	
10	25.2	27.5	
0	18.6	18.9	30%
2.5	18.6	18.9	
5	19.7	20.7	
7.5	22.4	23	
10	25	25.1	
0	17.3	17	40%
2.5	17.6	17.3	
5	18.4	18.3	
7.5	19.9	20.3	
10	22.1	23	

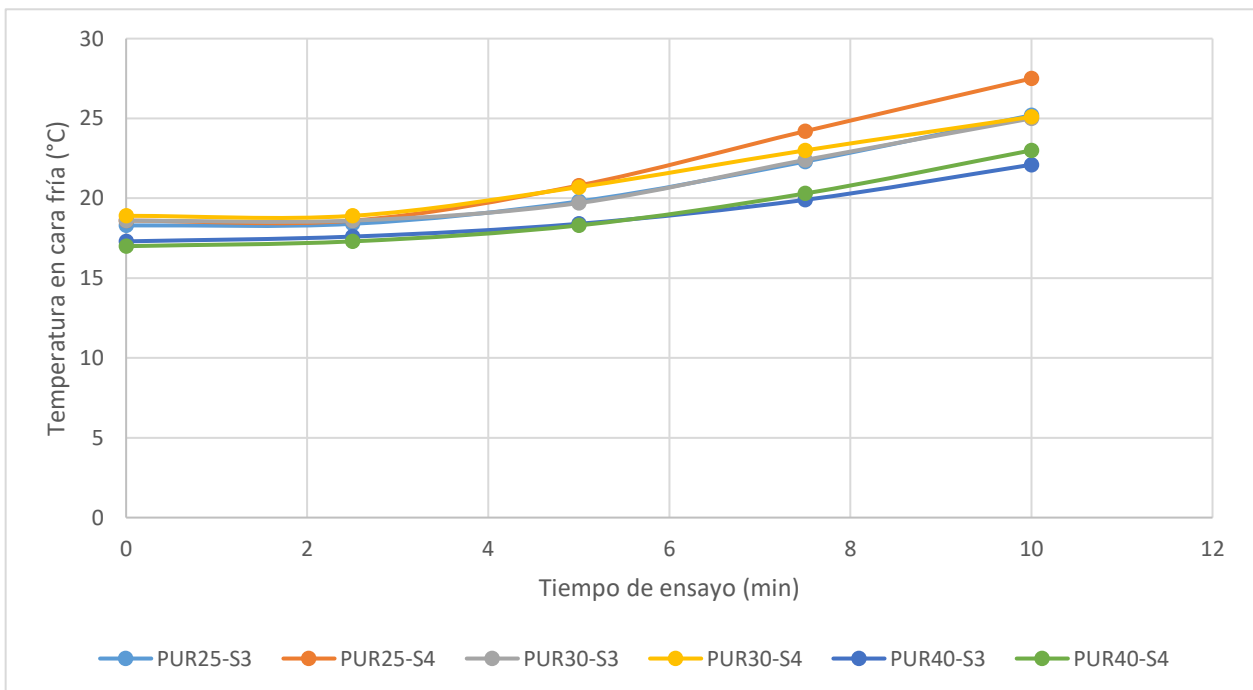


Figura 28. Conductividad térmica de morteros geopoliméricos conteniendo diferentes proporciones de residuos de PUR.

A partir de la figura 28, se observa que para tiempos iguales la temperatura alcanzada, en la cara fría de la probeta de ensayo, es menor conforme aumenta el contenido de PUR, lo cual indica que sí aumenta el aislamiento térmico, lo cual conduce a mejor confort habitacional y menor consumo energético en recintos cerrados dando un indicio que la adición de PUR en la mezcla si incide positivamente en el aislamiento térmico.

3.3 ANALISIS DE RESUSLTADOS

3.3.1 Influencia del contenido de PUR sobre la densidad

Independientemente de la edad de curado (Fig. 29), el incremento de la cantidad de residuos de PUR en sustitución de la arena condujo a la disminución de la densidad del mortero geopolimérico, que a los 3 días de curado llega a ser de hasta 11.8% inferior cuando se utiliza el 40% en volumen respecto al mortero geopolimérico de referencia. El mismo comportamiento se observó tras los 14 y 28 de curado con reducciones de densidad de 4.5% y 8.1%, respectivamente. Este resultado es lógico, ya que en su estructura celular el PUR almacena aire, además su fracción sólida por ser polimérica posee una densidad menos que el resto de constituyentes minerales de la matriz geopolimérica.

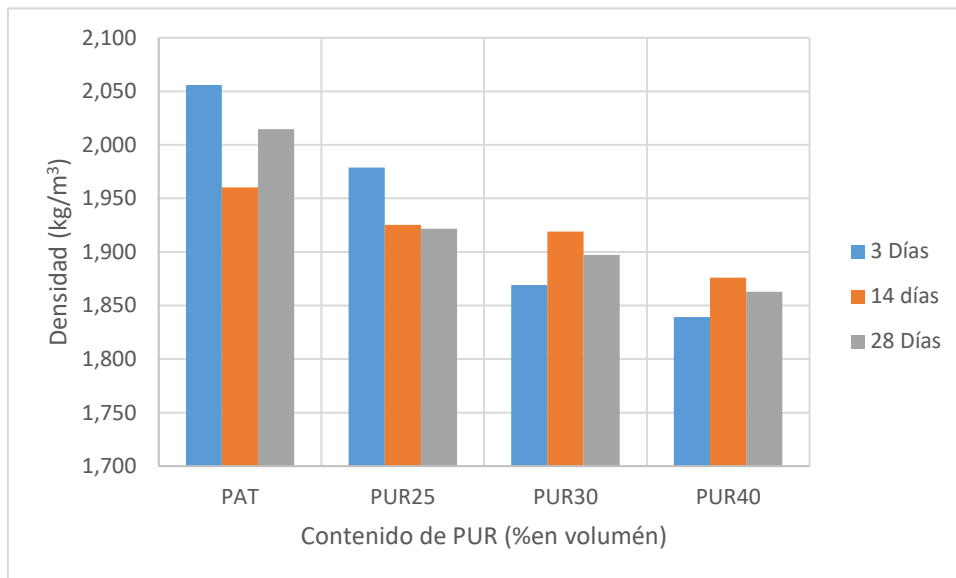


Figura 29. Densidad de cada una de las mezclas en los diferentes periodos de tiempo

Se esperaba que, en cada mortero geopolimérico, la pérdida de agua por evaporación al avanzar el curado condujera a la reducción progresiva de densidad. Sin embargo, para los porcentajes de sustitución de 30% PUR y 40% PUR, la densidad es más baja a los 3 días de curado, pero a los 28 días es menor que para los 14 días. Asimismo, se observa que en el mortero patrón la densidad a los 28 días de curado es menor que a los 3 días, pero mayor que para los 14 días. Estas desviaciones de la tendencia se deben a que las densidades son promediadas a partir de mezclas elaboradas por separado para una misma dosificación, es decir, las probetas elaboradas con igual cantidad de PUR no provienen del mismo bache de mezcla.

3.3.2 Influencia del contenido de PUR sobre la resistencia a la compresión

La figura 30 muestra que, para cada edad de curado, conforme aumenta el porcentaje de sustitución de la arena con partículas del residuo de PUR la resistencia a la compresión del mortero geopolimérico tiende a incrementarse.

Para la máxima sustitución de arena por 40% PUR, las ganancias en resistencia respecto al mortero patrón son de 29.6%, 97.9% y 131% para los 3, 14 y 28 días de curado, respectivamente.

Tras el día 3 de curado la variación de resistencia no es muy significativa. A los 14 días de curado, aumenta la resistencia compresiva de los geopolímeros; pero además los geopolímeros que contienen PUR superan en resistencia la geopolímero patrón. En los morteros geopoliméricos ensayados a los 14 y 28 de curado, se ve una coincidencia en la resistencia a compresión de las probetas patrón y de las probetas con 30% PUR; siendo notable la diferencia con el contenido de 40% PUR, además que con el 25% PUR se detecta una desviación de la tendencia. Se asume que esta desviación puede deberse a variaciones en las condiciones de curado al aire libre debido a cambios de la temperatura y la humedad relativa del aire en el laboratorio de materiales de la Universidad EIA, ubicado en el alto de las Palmas. Otra posibilidad puede atribuirse a diferencias en la granulometría de la arena y PUR; considerando además que la arena está formada por minerales dureza variable que afectan la resistencia mecánica del mortero. Después de 28 días de curado, es mucho más notorio que al disminuir la densidad del geopolímero, por aumento en la cantidad de PUR, aumenta su resistencia a la compresión

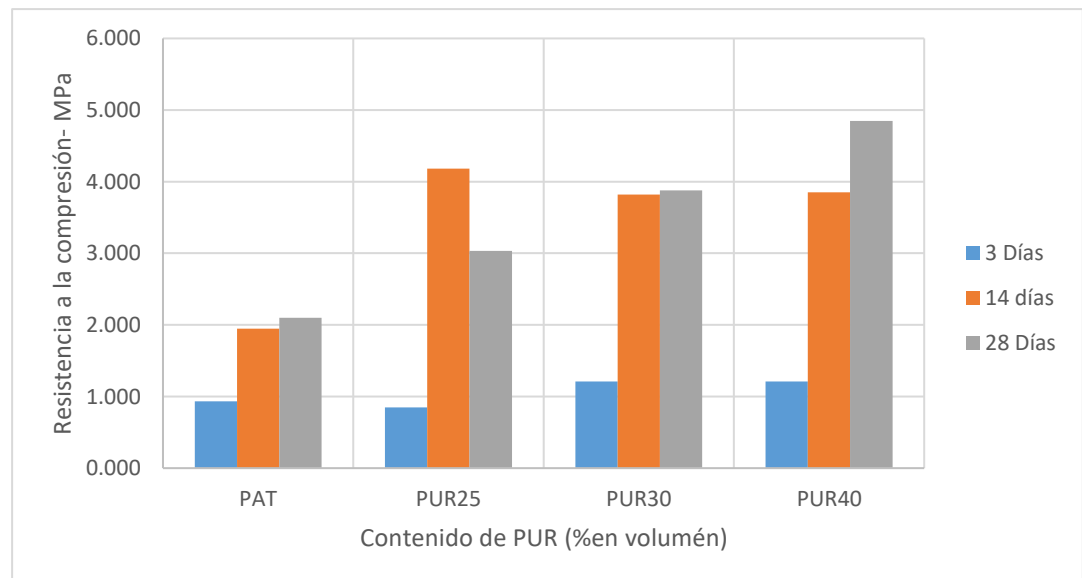


Figura 30. Resistencia a la compresión promedio en función del contenido de PUR para diferentes edades de curado

3.3.3 Variación de la resistencia específica en función del contenido de PUR

La figura 31 ilustra, en forma unificada, el cambio de la resistencia de los geopolímeros con diferentes contenidos de PUR en función de su densidad para los diferentes días de curado. En general, para las tres edades de curado es posible ver una disminución en la resistencia a la compresión de los hormigones geopoliméricos conforme su densidad aumenta. En todos los casos, la densidad disminuye al incrementar el contenido de residuos de PUR puesto que al tratarse de partículas de una espuma almacenan un volumen de aire que contribuye a reducir la masa del mortero geopolimérico.

Se observa que la resistencia de las muestras aumenta conforme disminuye la densidad de cada una, esto debido a la influencia trascendental que tiene el agregado de PUR en la composición de la mezcla, evidenciando que la inclusión de PUR es directamente proporcional al aumento de la resistencia y la disminución de la densidad, demostrando que la inclusión de este material en las muestras de mortero mejora las propiedades físicas y mecánicas.

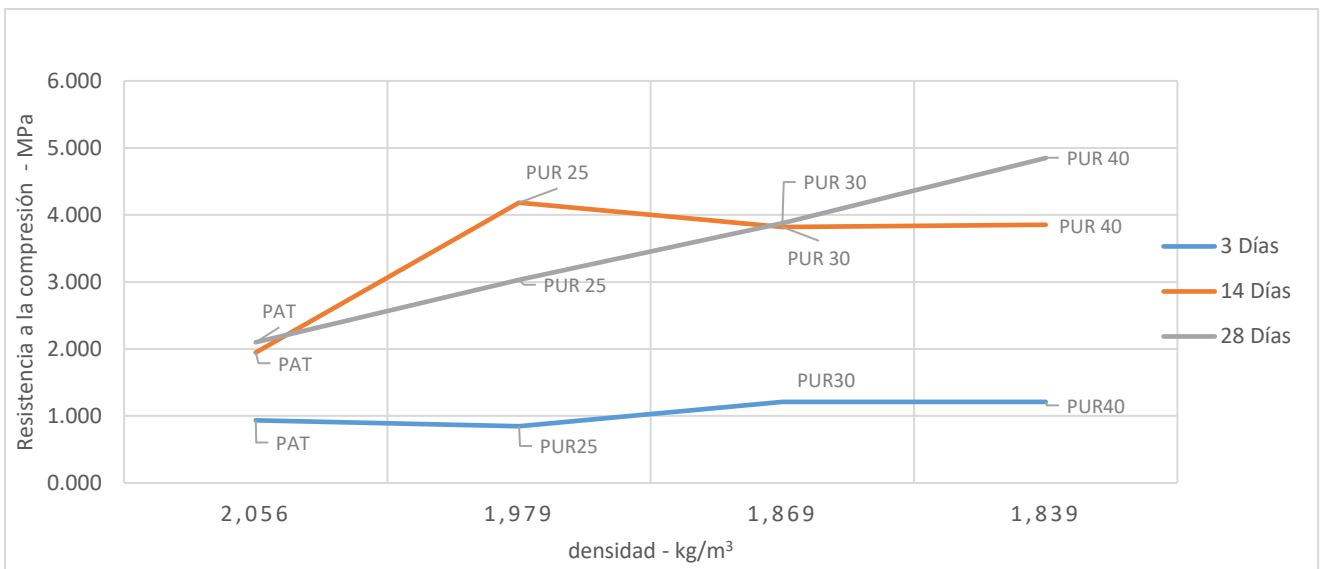


Figura 31. Variación de la resistencia de las muestras geopoliméricas en función de su densidad

3.3.1 Influencia del método de curado sobre la resistencia a la compresión

Se observa que altas temperaturas de curado (80°C) ayuda a obtener resistencias mecánicas a la compresión mucho mayores de hasta 642.15%, caso que se evidencia en la muestra PUR40 donde en condiciones normales de curado la resistencia a los 3 días era de 1.2 MPa, mientras que en

condiciones de curado al horno, al siguiente día, se obtuvieron resistencias de 8.98 MPa.

Se puede inferir que la temperatura de curado al horno favorece la formación en menor tiempo de los geles poliméricos, debido a que la formación de vapor de agua incrementa la cinética de las reacciones de polimerización entre la ceniza volante y la solución alcalina, situación que también se presenta en diversos estudios (Valenzuela M, 2013), (Torres-Carrasco & Puertas, 2017) donde la resistencia aumenta considerablemente.

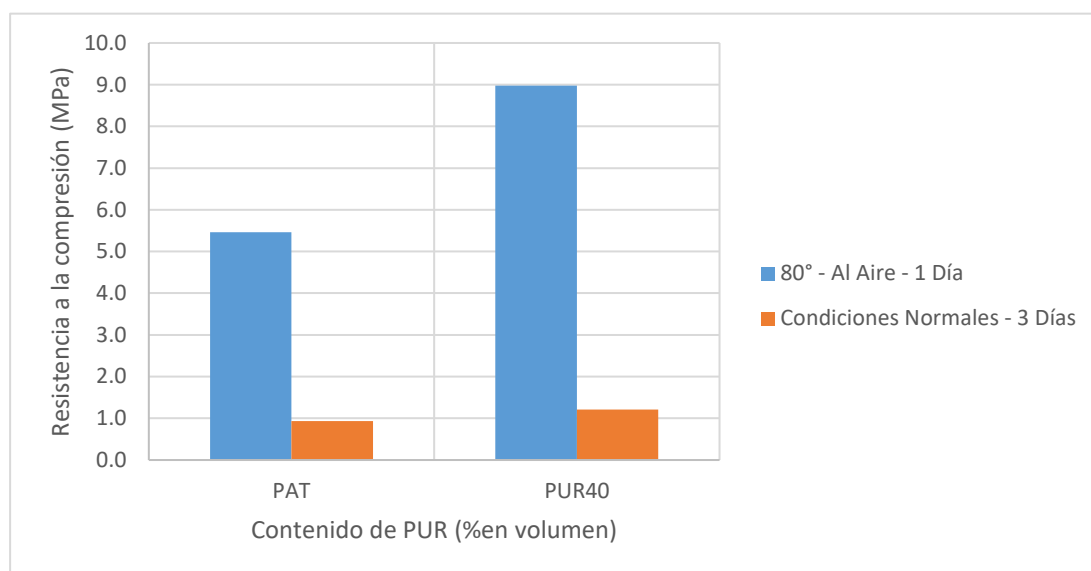


Figura 32. Resistencia compresión de morteros geopoliméricos curados a 3 días a temperatura ambiente y curados a 80° por 24 horas

En la figura 32, se observa las grandes bondades que ofrece el curado al horno por 24 horas sobre las muestras geopoliméricas favoreciendo la formación y cristalización de geles en la matriz de forma acelerada lo que ayuda a conseguir resistencias mecánicas mucho más elevadas que aquellas adquiridas por métodos de curado convencionales al aire libre.

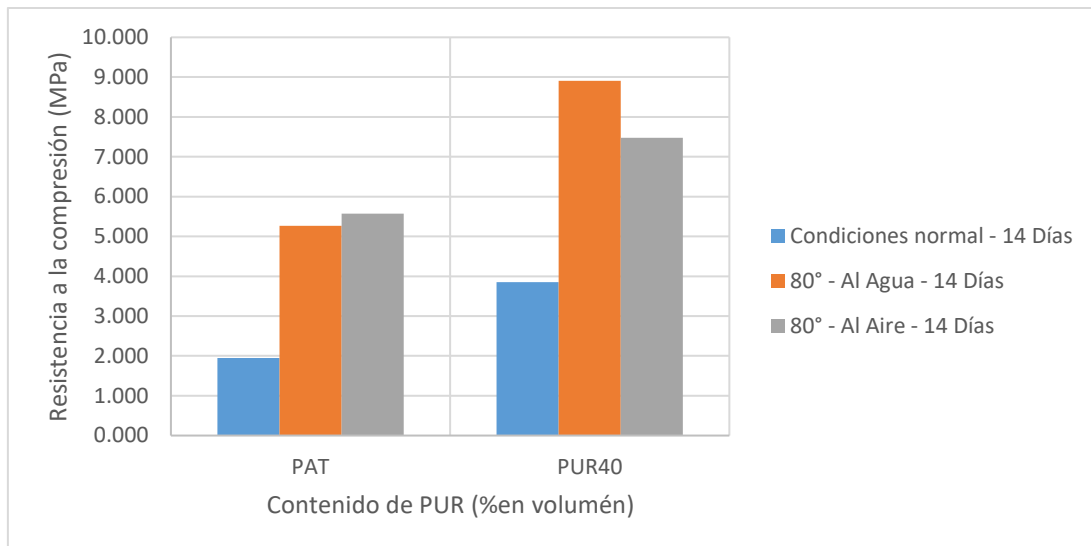


Figura 33. Resistencia compresión de morteros geopoliméricos curados a 14 días a temperatura ambiente y curados a 80° por 24 horas

A partir de la figura 33 se observa que el método de curado posterior al curado térmico no afecta mucho la resistencia a la compresión, mas sin embargo se observa un incremento de hasta el 5% de la resistencia con post-curado al aire. Caso contrario se observa para el motero geopolimérico con 40% PUR, con una caída de resistencia de hasta el 19% en aquellas probetas que completaron su curado al aire libre, lo que puede deberse a variación en la granulometría de la arena y el PUR.

3.3.2 Influencia del contenido de residuos de PUR sobre la conductividad térmica

Se observa que la inclusión de residuos de PUR en el contenido de las mezclas favorece al aislamiento térmico de las probetas, esto porque las cavidades de aire incorporadas que componen el poliuretano ayudan a disipar las temperaturas externas del ambiente y de esta manera mantener una temperatura de confort en los lugares donde se instale. Resultados similares se obtuvieron en el trabajo desarrollado por (Vaclavik & al, 2012) donde se demuestra que morteros con menor densidad poseían coeficientes de conductividad térmica menores que aquellos morteros con mayor densidad.

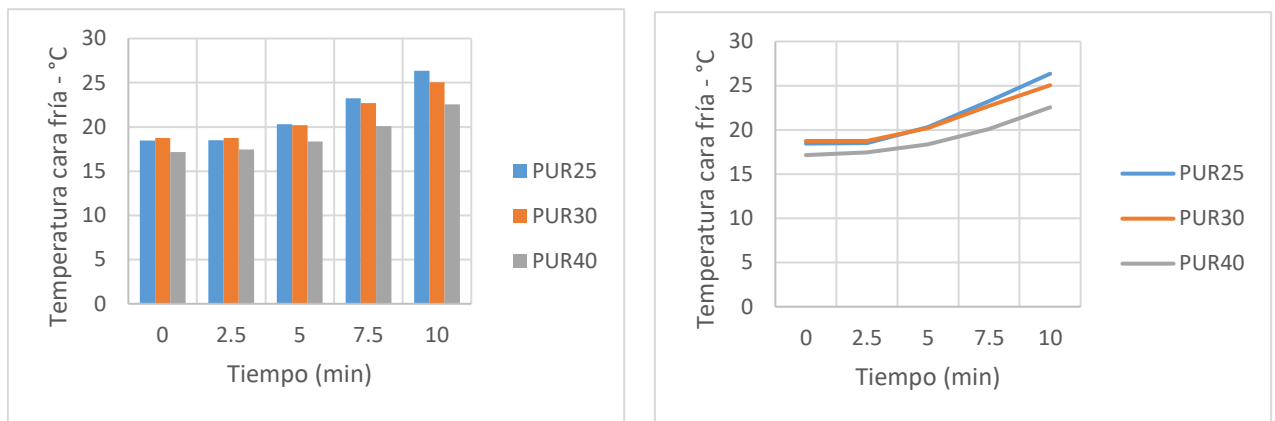


Figura 34. Variación de la temperatura en las muestras geopoliméricas con la inclusión de residuos de PUR

En la figura 34 se observa que a medida que aumenta el contenido de residuos de PUR en la mezcla, disminuye la temperatura de las placas.

3.3.3 Influencia del contenido de residuos de PUR sobre el aislamiento acústico

Los resultados esperados para este ensayo serían aquellos demostrados por diferentes estudios como el de (Juricka & Lapcik, 2006) donde los resultados de las mediciones muestran excelentes propiedades de amortiguación del ruido de las espumas de poliuretano como una capa aislante adecuada para la aplicación en partes internas. El coeficiente de absorción acústica muestra que los valores son efectivos para el rango de frecuencias de 500 Hz a 2000 Hz. El mejor valor del coeficiente de absorción se obtuvo para una capa de espesor igual 30 mm.

Haciendo simil a nuestra investigación se podría decir q a mayor porcentaje de residuos de PUR en la mezcla, mayor será el coeficiente de absorción y por ende el aislamiento acústico

4. CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES

De este trabajo de grado se desprenden las siguientes conclusiones

- La sustitución del árido fino pétreo por 25, 30 y 40 % en volumen de residuos de espuma rígida de poliuretano (PUR), contribuye en ese mismo orden a disminuir la densidad del hormigón geopolimérico
- La inclusión de residuos de espuma rígida de poliuretano (PUR) en un hormigón geopolimérico mejora la resistencia a la compresión debido a su mayor deformación elástica, respecto a la matriz geopolimérica, ayuda a absorber energía compresiva. Este efecto es más notorio conforme aumenta el contenido de PUR hasta el 40% en volumen.
- Contenidos crecientes de PUR, conducen a una disminución de la conductividad térmica del hormigón geopolimérico, y por ende favorecen el aislamiento térmico. Esto se debe al incremento del volumen de aire contenido por el PUR que queda atrapado en la matriz geopolimérica.
- El curado de la matriz geopolimérica a 80°C por 24 horas aumentan ostensiblemente su resistencia a la compresión, en contraste con las resistencias logradas con curado convencional al aire. Esto debido a la formación de vapor de agua que incrementa la cinética de reacción entre la ceniza volante y la solución alcalina promoviendo densificación de la matriz geopolimérica y con ello al aumento rigidez y resistencia
- Después del curado térmico, el post-curado en aire libre o por inmersión en agua a 23°C, no produce aumento significativo de la resistencia a compresión. El post-curado por inmersión en comparación muestra una leve mejora de resistencia respecto al curado en aire puede, que asociarse a formación de nuevo gel polimérico en condiciones de alta hidratación
- Es evidente que la espuma rígida de poliuretano puede ser considerado un material verde en la construcción, utilizado después de un proceso de reciclado de la industria de refrigeración, aislamiento, cojinería, entre otros, que ayuda a la consecución de mayores resistencias, menores densidades y mayor aislamiento, en este sentido contribuye al ahorro de material en las secciones transversales de los elementos estructurales de las estructuras, menor consumo de energía ante climas extremos y de este modo ahorro en costos.
- Se recomienda realizar ensayos cuantitativos para determinar la conductividad térmica de cada una de las placas, donde las pérdidas de calor sean controlables y la temperatura en las caras de estabilice de manera que se puede establecer de forma precisa si la inclusión de poliuretano rígido en las mezclas ayuda a disminuir la conductividad térmica del mortero y de este modo contribuir con esta investigación a un concreto verde
- Es evidente que la espuma rígida de poliuretano puede ser considerado un material verde en la construcción, utilizado después de un proceso de

reciclado de la industria de refrigeración, aislamiento, cojinería, entre otros, que ayuda a la consecución de mayores resistencias, menores densidades y mayor aislamiento, en este sentido contribuye al ahorro de material en las secciones transversales de los elementos estructurales de las estructuras, menor consumo de energía ante climas extremos y de este modo ahorro en costos.

- La sustitución completa de cemento Portland por ceniza volante, a grosso modo permite sugerir que para elementos prefabricados y no estructurales podría ser un buen ahorro de costos y además contribuye al confort térmico y ahorro energético aportando a disminuir efectos adversos de la construcción sobre el cambio climático

A partir de los aprendizajes dejados por este trabajo de grado surgen las siguientes recomendaciones:

- Realizar un mayor número de ensayos para tener una estadística mayor que contribuya a la mejor interpretación de resultados. Asimismo, controlar las condiciones de curado en cámaras climatizadas para reducir la variabilidad de resultados en los ensayos.
- Realizar los ensayos para periodos de curado más extensos para evaluar en qué grado se forman productos de reacción posteriores y como afectan las propiedades del hormigón geopolimérico con adición de PUR.
- Explorar el efecto del curado térmico con post-curados separados en aire y en agua para hormigones geopoliméricos con mayores contenidos de PUR.
- Estudiar el efecto de la temperatura de curado sobre la morfología del agregado de PUR, mediante técnicas de microscopía óptica y EDS para relacionarlas con la densidad, resistencia y cambio dimensional del hormigón geopolimérico.
- Se recomienda hacer ensayos con concreto y de esta manera poder determinar si la mezcla es apta para elementos estructurales o si por el contrario no logra alcanzar esta capacidad de resistencia
- Se recomienda hacer ensayos de aislamiento acústico que permitan determinar si la inclusión de PUR contribuye además a brindar un espacio de mayor tranquilidad y confort en los hogares alejados del bullicio de las ciudades.

Complementariamente, a las anteriores recomendaciones se sugiere:

- Adquirir o construir un equipo para medir con precisión la conductividad térmica en materiales compuestos de matriz cementicia o geopolimérica adicionados con aligerantes porosos.
- Adquirir o construir un equipo para medir con precisión la insonorización o aislamiento acústico en materiales compuestos de matriz cementicia o geopolimérica adicionados con aligerantes porosos.

5. REFERENCIAS

- Ahinco S.A. (2014). *ahinco*. Obtenido de <https://www.ahinco.com.co/index.php/quienes-somos>
- Cielotek divitek S.A. (s.f.). *cielotek*. Obtenido de <http://cielotek.com/sitio/about-us/>
- Davidovits. (1982). *Mineral polymers and methods of making them*.
- Davidovits, J. (2008). Geopolymer chemistry and applications. 1633-1656.
- Fernandez-Jimenez, A. P. (2006). *Alkali activated fly ash binders*. Materiales de construcción.
- García S.A., H. R. (2012). EVALUACIÓN DE LA TEMPERATURA EN EL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE GEOPOLÍMEROS BASE CENIZA VOLANTE.
- Geng J, F. F. (2012). Application of Polyurethane Foams in the Environmental Field and Reuse of the Materials. *Material review*, 78-83.
- Giraldo, M. A. (2006). Evolución mineralógica del cemento portland durante el proceso de hidratación. *Dyna*, 69-82.
- González M, R. M. (2016). *Caracterización de la espuma rígida de poliuretano expandido como impermeabilizante de cubiertas*. Cuba: Revista de arquitectura e ingeniería.
- Juricka M, L. L. (2006). Application of polyurethane foam materials as fuselage acoustic isolation. Zlin: Faculty of technology.
- Lee W.K.W. (2002). Solid gel interaction in Geopolymers. Melbourne, Australia: The University of Melbourne.
- M. Torres-Carrasco, F. P. (2017). La activación alcalina de diferentes aluminosilicatos como una alternativa al Cemento Portland: cementos activados alcalinamente o geopolímeros. *Revista ingeniería de construcción*, 1-4.
- Mounanga P, G. W. (2008). Proportioning and characterization of lightweight concrete mixtures made with rigid polyurethane foam wastes. *Cement & Concrete Composites*, 806-814.
- Nilson A. H. (2001). *Diseño de estructuras de concreto*. Mcgraw Hill Interamericana.
- P. Mounanga, e. a. (2008). Proportioning and characterization of lightweight concrete mixtures made with rigid polyurethane foam wastes. En S. direct, *Cement & Concrete Composites* (págs. 806-814). Nantes: Elsevier.
- Palomo, A., Krivenko, P., Garcia-Lodeiro, I., Kavalerova, E., Maltseva, O., & Fernández-Jiménez, A. (2014). A review on alkaline activation: new analytical perspectives. *Materiales de Construcción*, 64(315), 1-24. doi:10.3989/mc.2014.00314

- Patcharapol P, C. R. (2015). Properties of lightweight high calcium fly ash geopolymer concretes containing recycled packaging foam. En K. K. University, *Construction of building materials* (págs. 408 - 413). Khon: CrossMark.
- Petrement, C. J. (2012). *Morteros aligerados con residuos de espumas rígidas de poliuretano. Obtención, caracterización y puesta en obra*. Burgos: Universidad de Burgos.
- V. Vaclavik, e. a. (2012). *POLYURETHANE FOAM AS AGGREGATE FOR THERMAL INSULATING MORTARS AND LIGHTWEIGHT CONCRETE*. Ostrava: technical gazzete.
- Valenzuela M. (SEPTIEMBRE de 2013). ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LAS PROPIEDADES DE GEOPOLÍMEROS SINTETIZADOS A PARTIR DE PUZOLANA NATURAL. SANTIAGO DE CHILE, CHILE.
- Van den Heede P, y. D. (2012.). "Environmental impact and life cycle assessment of traditional and 'green' concretes: Literature review and theoretical calculations". *Cement & Concrete Composites*. Vol. 34., pag. 431–442. .
- Van den Heede, P. y. (2012). Environmental impact and life cycle assessment of traditional and "green" concretes: Literature review and theoretical calculation. *Concrete & Concrete composites*, 431-442.
- Viviam W.Y, T. C. (2005). Review on the viable technology for construction waste recycling. . *School of engineering*. Australia: Gold Coast Campus.
- Wenqing Yang, Q. D. (2012). Recycling and disposal methods for polyurethane foam wastes. *The 7th International conference on Waste Management and Technology* (págs. 167-175). Beijing: scienceDirect.

6. ANEXOS

ANEXO 1

	FICHA TÉCNICA SILICATO DE SODIO SPINPEG- 421	Código: FO-GP-025
		Versión: 002
		Página 1 de 1

DESCRIPCIÓN Y USOS DEL PRODUCTO:

El silicato de Sodio SPINPEG-421 tiene un contenido alto de sílice polimérico, lo que lo hace muy útil como adhesivo en la industria del cartón y papel aportando rigidez y resistencia en la elaboración de tubos, tambores, tableros de cartón, entre otros. También sirve para la unión de cartón o papel con aluminio laminado.

Otras aplicaciones industriales:

- Impermeabilizante, endurecedor y acelerantes de fraguado para el concreto.
- Aglutinante de lodos en la perforación de pozos petroleros.
- Ingrediente importante en la fabricación de refractarios especiales y morteros, debido a que aumentan la resistencia al ataque de productos químicos.
- Usados en la fabricación de varios tipos de cementos, pinturas y recubrimientos.
- Agente Floculante en tratamiento de aguas.

PROPIEDADES FÍSICAS

Apariencia	Líquido viscoso
Color	Ligeramente grisáceo
Olor	Inodoro

ESPECIFICACIONES DEL PRODUCTO:

	MÍNIMO	MÁXIMO
Densidad (°Be) :	40.5	44.5
Relación (SiO ₂ : Na ₂ O):	3.0	3.27
Na ₂ O (%):	8.76	9.98
SiO ₂ (%):	27.40	30.25
Sólidos Totales (%):	36.80	40.00

PRESENTACIÓN:

El producto es entregado en carrotaques de 10 a 30 toneladas, tambores metálicos de 300 kg y tambores plásticos de 150 y 200 kg.

ADVERTENCIA:

Spin S.A. garantiza el producto bajo las especificaciones técnicas establecidas en esta ficha, pero no puede garantizar las condiciones de aplicación, usos y cambios en el proceso sobre el cual fue evaluado el producto, ya que son propias de cada cliente.

Página 1 de 1

Última revisión: 21/06/2016

ANEXO 2



HOJA DE SEGURIDAD SILICATO DE SODIO



1. IDENTIFICACIÓN DEL PRODUCTO Y LA COMPAÑÍA

Nombre del producto: SPINREG 421
Nombre químico: Silicato de sodio Alcalino
Fórmula: Silicato de sodio neutro 42° Be - Relación peso 3.1
Numero UN: No asignado.
Identificación de la empresa: SPIN S.A. - Silicatos para Industria S.A.
Cra 43 A N° 61 Sur 30 Sabaneta- Antioquia
Tel. 5904005
Cel: 314-830-0417
E-mail: info@spinna.com.co
Teléfono para emergencias: 123

2. IDENTIFICACIÓN DE PELIGROS

ASPECTOS DE SEGURIDAD Líquido espeso, inodoro, grisáceo. Causa irritación severa en los ojos. Causa irritación moderada en la piel. Los vapores pueden causar irritación en el tracto respiratorio. Debido al alto pH del producto es peligroso para la vida acuática.

Contacto con los ojos: Causa irritación severa en los ojos.
Contacto con la piel: Causa irritación moderada en la piel.
Inhalación: El vapor irrita el tracto respiratorio.
Ingestión: Podría causar irritación de la boca, esófago y estómago.

Peligros crónicos: No se conocen peligros crónicos
Peligros físicos: Seco forma una película de vidrio el cual puede cortar fácilmente la piel. El material derramado es muy resbaladizo. Si no se remueve rápidamente puede formar vidrio.

3. COMPOSICIÓN DEL PRODUCTO

Sustancia	%	Nº CAS	Simbolos de riesgo
			XI (Irritante)
Na ₂ O·3.1SiO ₂	38.70	1344-09-8	R36/38 (Irrita los ojos y la piel)



4. MEDIDAS DE PRIMEROS AUXILIOS

Contacto con los ojos:	Lavarlos con abundante agua, durante 15 minutos aproximadamente procurando abrir y cerrar los ojos intermitentemente. Acudir al médico si es necesario.
Contacto con la piel:	En caso de contacto, lavar inmediatamente la piel con abundante agua por al menos 15 minutos. Si se presenta irritación o si hay dolor se debe buscar atención médica.
Inhalación:	Mover a la persona al aire fresco. Si no está respirando, darle respiración artificial. Si hay dificultad para respirar suministrar oxígeno. Buscar ayuda médica.
Ingestión:	No provocar vómito. Obtenga atención médica inmediatamente. Si la víctima está plenamente consciente darle de beber abundante agua y de ser posible ligeramente acidulada con vinagre o limón. Nunca de a ingerir nada a una persona inconsciente.

5. MEDIDAS CONTRA INCENDIO

Medios de extinción:	El producto NO es combustible. En caso de incendio en el entorno están permitidos todos los agentes extintores.
Elementos de protección:	Cuando este material esté presente en un área de fuego, se debe usar guantes de resistencia química, ropa de protección que recubra completamente el cuerpo y botas de caucho.

6. MEDIDAS PARA FUGAS O DERRAMES ACCIDENTALES

Protección personal:	Usar gafas y guantes resistentes a químicos, ropa de protección que cubra todo el cuerpo y botas de caucho.
Precauciones ambientales:	Lavar y mezclar con abundante agua. El alto pH silicato es dañino para la vida acuática. Solamente el agua se evaporará del derrame de este material.
Métodos de contención:	Mantener alejadas a las personas innecesarias, aislar el área en peligro y negar la entrada. El



material resulta resbaladizo, no tocar ni caminar sobre el material derramado. Detener el derrame si es posible hacerlo sin riesgo. Prevenir el derrame entre colectores de aguas lluvias o zanjas que conduzcan a vías de agua natural. Alisé presas y material descargado en almacenamiento, si es posible. Use arena o tierra para contenerle material derramado. Si la contención es imposible, neutralice el área contaminada y limpie con grandes cantidades de agua.

Métodos de limpieza:	Si es posible recoger producto y trasvasar a contenedores adecuados, recogerlo por medios mecánicos, lavar el área contaminada con abundante agua
Información adicional:	Si no es posible recuperar el producto en contacto con el suelo diluir lo más posible con agua, evitando que el agua vaya a los vertidos.

7. MANIPULACIÓN Y ALMACENAMIENTO

Manipulación:	Evite el contacto con los ojos, la piel y la ropa. Mantenga los contenedores cerrados. Rápidamente limpie los residuos de las tapas con un trapo empapado con agua. Inmediatamente limpie las salpicaduras. Las soluciones de silicato de sodio se evaporan lentamente cuando son expuestas al aire, así que los tanques deben estar cerrados y ubicados en lugares ventilados. El silicato de sodio es un compuesto que reacciona lentamente con el dióxido de carbono presente en el ambiente (aire). Es una sustancia que no reacciona con los materiales comunes. Es una sustancia estable durante su manipulación o transporte.
Almacenamiento:	Mantenga los tanques o envases cerrados. Almacene el silicato en tanques limpios de acero o plástico. Los tanques de aluminio no se recomiendan ya que pueden ser atacados por la alta alcalinidad del silicato. Separe de ácidos, metales reactivos y sales de amonio. No almacene en aluminio, fibra de vidrio, cobre, bronce, fluor, zinc, estaño (hojalata) o recipientes galvanizados, por el riesgo de generación de hidrogeno.

8. CONTROLES PARA EXPOSICIÓN/ PROTECCIÓN PERSONAL



Control de Ingeniería:

Use con adecuada ventilación. Mantenga los contenedores cerrados. Se debe tener acceso directo a la ducha lava-ojos y duchas de seguridad.

Límite de exposición:

No ha sido establecido un TLV específico para el producto.

Protección personal:

Cuerpo (traje de goma o neopreno)



Cara (máscara completa facial)



Manos: (guantes de goma o neopreno)



Pies: (botas de goma o de neopreno)



8. PROPIEDADES FÍSICAS Y QUÍMICAS

Color:	Incoloro
Olor:	Inodoro
Estado físico:	Líquido
Apariencia:	Líquido viscoso.
pH:	11,8
Inflamabilidad:	No es inflamable
Densidad a 20°C:	1.381g/cm ³ , 40° Be

10. ESTABILIDAD Y REACTIVIDAD

Estabilidad : Este material es estable bajo todas las condiciones de



	almacenamiento y uso.
Condiciones que se deben evitar:	Ninguna.
Materiales incompatibles:	Cuando se mezcla con ácidos forma gel y genera calor. Puede reaccionar con sales de amonio provocando formación de gas amoniacal. Gas de hidrogeno combustible puede ser producido en contacto con aluminio, plomo, estaño, y zinc.
Productos peligrosos de descomposición:	No se descompone
Posibilidad de reacciones peligrosas:	No ocurre

11. INFORMACIÓN TOXICOLÓGICA

Toxicidad aguda:	Sin datos toxicológicos. Irritante al tracto respiratorio v
Toxicidad por ingestión:	Toxicidad agua oral. Rata LD ₅₀ 1500/3200mg/Kg.
Toxicidad crónica:	No se conocen efectos de largo plazo.

12. INFORMACIÓN ECOLÓGICA

Inestabilidad:	El silicato de sodio es estable y los ensayos de biodegradabilidad no le son aplicables por no ser una sustancia orgánica
Degradabilidad:	No es degradable
Bio-acumulación:	No se produce
Efectos sobre el ambiente:	El anion silicato no se le atribuye ningún efecto nocivo específico. A considerar únicamente una eventual toxicidad a los organismos acuáticos derivada de un aumento del valor del pH de las aguas debido a su alcalinidad. Los silicatos solubles en contacto con aguas naturales pueden reaccionar con los cationes calcio, magnesio, hierro y aluminio etc. dando lugar a compuestos insolubles constituyentes de los suelos naturales

13. CONSIDERACIONES SOBRE DISPOSICIÓN FINAL

Método de eliminación de residuos:	El producto fuera de calidad o desechado debe ser tratado
---	---



como un residuo no peligroso para su eliminación.

Eliminación de envases:

Los envases contaminados de producto deben ser tratados en idénticas condiciones, pudiendo ser eliminados lavándolos con gran cantidad de agua y secados al aire.

14. INFORMACIÓN SOBRE TRANSPORTE

1. Número UN: No asignado.

16. INFORMACIÓN REGLAMENTARIA

Ley 769/2002. Código Nacional de Tránsito y Transporte. Artículo 32: La carga de un vehículo debe estar debidamente empacada, rotulada, embalada y cubierta conforme a la normatividad técnica nacional.

Ministerio de Transporte. Resolución No. 3800 del 11 de Diciembre de 1998. Por el cual se adopta el diseño y se establecen los mecanismos de distribución del formato único del manifiesto de carga.

El libro Naranja de las Naciones Unidas (recomendaciones relativas al transporte de mercancías peligrosas) y la Guía de Respuesta a Emergencias GRE versión 2000, NO clasifican el Silicato de Sodio como sustancia o mercancía peligrosa. En virtud de lo anterior, el transporte de Silicato de Sodio no debe cumplir con lo establecido en el Decreto 1609 de 2002 del Ministerio de Transporte.

18. INFORMACIÓN ADICIONAL

Cualquier producto químico puede ser manejado en condiciones seguras, si se conocen sus propiedades físicas y químicas y se utilizan las medidas y prendas de protección adecuadas. Los datos contenidos en esta hoja de seguridad del material, son una guía para el usuario y están basados en informaciones bibliográficas y experiencias propias, intentando reflejar en la misma el estado actual de la técnica pero que, de ningún modo puede comprometer nuestra responsabilidad. Los usuarios deberán cumplir con las disposiciones legales y reglamentos en vigor, en especial todo lo referente a Seguridad y Salud.

ANEXO 3

	FICHA TÉCNICA	Código: GT-F-40
	SODA CAUSTICA 98% ESCAMAS	Fecha: 01/08/2011
	Versión: 01	Página: 1 de 1

1. DESCRIPCIÓN GENERAL

Nombre químico: Soda caustica 98% escamas.

Otros nombres: Hidróxido de sodio, sosa caustica, hidrato de sodio.

Fórmula Química: NaOH

CAS: 1310-73-2

UN: 1823

Calidad: Técnica

Descripción: Sólido blanco inodoro en forma de escamas. **Vencimiento:** 5 años.

2. APLICACIONES GENERALES

Se utiliza especialmente en las siguientes industrias:

Obtención de jabones de uso común y metálico "duros". Base de algunas grasas lubricantes convencionales. Obtención de tensoactivos, además en la obtención de carboximetilcelulosa de sodio, celulósicos, hojas y películas celulósicas, rayón, celofán; preparación de emulsiones aniónicas bituminosas y de alquitrán de hulla; preparación de sulfatos, sulfitos y fosfatos de interés industrial, obtención de hipoclorito de sodio.

Acondicionamiento de superficies metálicas, limpieza, desengrasado y decapado industrial; preparación de soluciones desinfectantes y lavadoras, mezclada con compuestos como el metasilicato de sodio; mercerización de fibras naturales, galvanoplastia, industria farmacéutica y de alimentos; plásticos y vidrios; secado y descarbonatación de gases.

3. PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS

Parámetro	unidad	Especificación
Hidróxido de sodio	%	98,0 Mín.
Carbonato de sodio	%	0,45 Máx.
Sulfato	mg/Kg	4 Máx.
Hierro	mg/Kg	10 Máx.
Mercurio	mg/Kg	0,05 Máx.
Metales pesados	mg/Kg	20 Máx.
Calcio	%	0,001 Máx.
Plomo	%	0,0002 Máx.
Arsénico	mg/Kg	3 Máx.

4. CONDICIONES DE ALMACENAMIENTO Y PRECAUCIONES

Condiciones de almacenamiento: Almacene bajo techo, en lugar fresco, ventilado y con buen drenaje. No almacene este producto junto a materiales de rápida ignición.

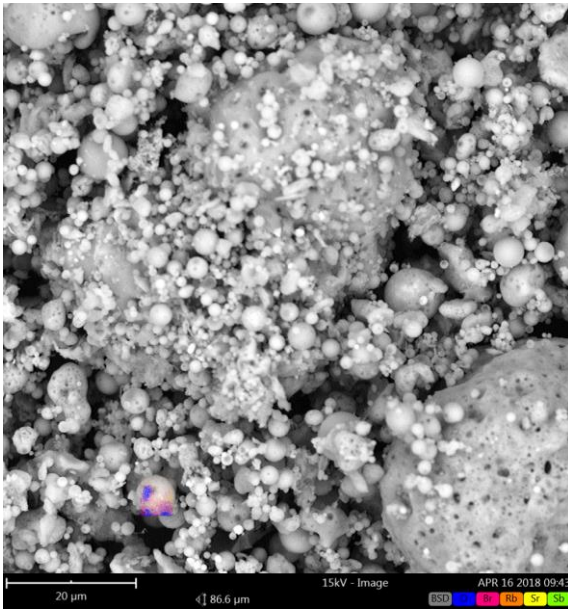
Precauciones: La soda cáustica es altamente corrosiva e irritante; por contacto puede producir lesiones oculares, cutáneas, pulmonares y digestivas. La concentración máxima permisible en el aire es de 2 mg/m³ para una exposición máxima de 15 minutos.

Nota: El uso final del producto es responsabilidad directa del cliente, la información consignada en este documento es sólo de carácter ilustrativo y fue tomada de distintas fuentes bibliográficas por nuestro departamento técnico. Estos datos no representan responsabilidad legal alguna y no eximen al comprador de hacer sus propios análisis e investigaciones.

ANEXO 4

Fly Ash

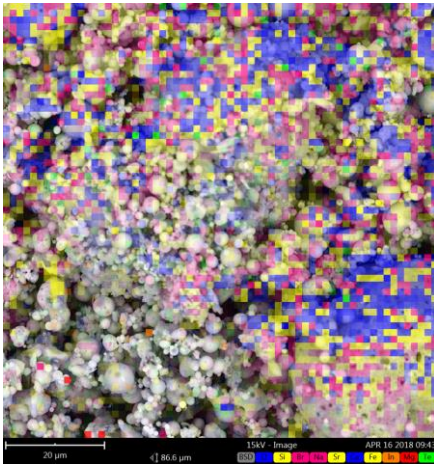
1. Microscopia SEM



FOV: 86.6 μm, Mode: 15kV - Image, Detector: BSD Full, Time: APR 16 2018 09:43

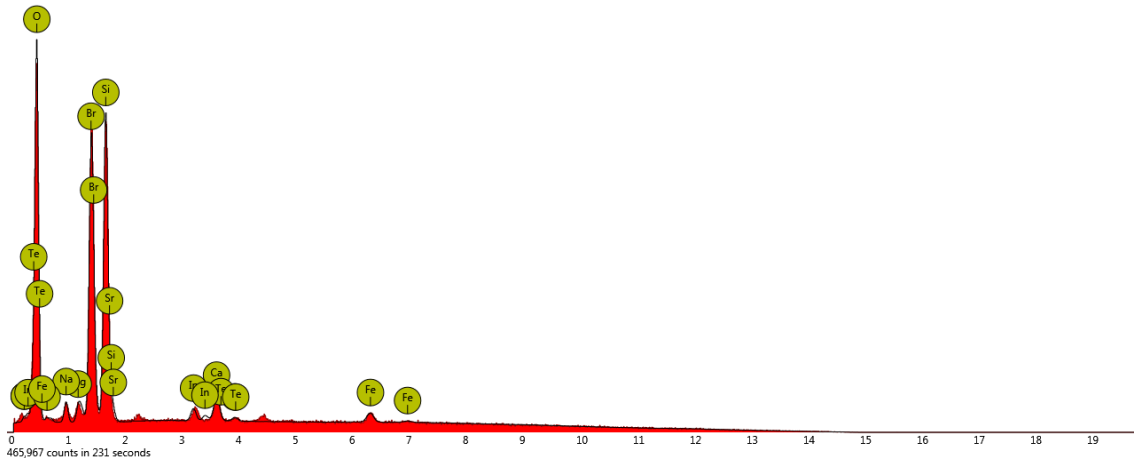
2. Mapa de composición elemental EDS

Combined map



Element Symbol	Atomic Conc.	Weight Conc.	Oxide Symbol	Stoich. wt Conc.
O	69.90	43.97		
Si	15.26	20.30	Si	35.05
Br	8.94	11.43	Br	58.44
Na	1.24	1.35	Na	2.32
Sr	1.19	4.94	Sr	8.51
Ca	1.11	2.11	Ca	3.64
Fe	1.02	2.70	Fe	4.68
In	0.65	3.54	In	6.12
Mg	0.58	0.67	Mg	1.15

FOV: 86.6 μm, Mode: 15kV - Image, Detector: BSD Full, Time: APR 16 2018 09:43



(Disabled elements: B)

Espectro del análisis químico elemental por EDS

ANEXO 5

FICHA TÉCNICA CENIZA VOLANTE



CENIX

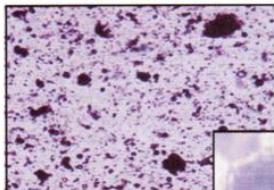


AHINCO S.A.

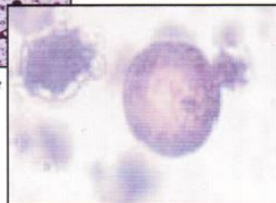
CRA. 32 No. 1B SUR 51 OF. 515 ED. MALL VENTURA PBX 352 53 62 e-mail: ahinco@une.net.co

DESCRIPCIÓN:

Es una ceniza volante de color gris, sólida, fina y de forma esférica, resultante de la combustión del carbón molido o en polvo tipo bituminoso, que tiene propiedades puzolánicas (cementantes) que se activan al reaccionar el hidróxido de calcio (cal) $Ca(OH)_2$ producido durante la hidratación del cemento Portland con los silicatos solubles de álcali o "cristales" de la ceniza.



Partículas aglomeradas de Ceniza Volante (4X)



Cenospheras en Ceniza Volante al microscopio (63X)

ESPECIFICACIONES:

Para el detalle de las especificaciones técnicas, referenciarse a la norma técnica colombiana NTC 3493, que es idéntica a la norma ASTM-C 618.

USOS:

- Como adición al cemento Portland.
- Como adición al hormigón utilizado para estructuras de concreto o al mortero utilizado para los acabados.
- Como adición en la fabricación de bloques prefabricados con cemento Portland.
- Como adición en la fabricación de ladrillos de arcilla.
- Como adición en las bases granulares para pavimentos semiflexibles de carreteras, autopistas, pistas de aterrizaje y estacionamientos.
- En la inyección de pozos petrolíferos.
- En la reducción de la acidez de los suelos (agricultura).

VENTAJAS:

Bajo determinadas condiciones, como adición en el hormigón, brinda las siguientes ventajas:

- Se logran las mismas o mayores resistencias a la compresión a los 28 días de fraguado el hormigón, que una mezcla de control tradicional, con menores consumos de cemento por m^3 y por tanto menores costos.

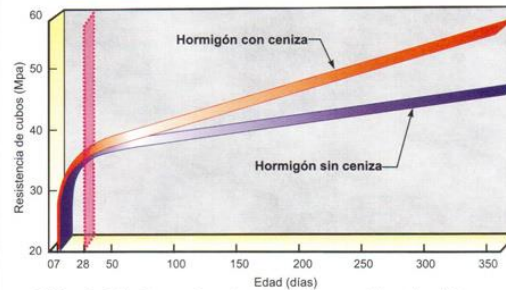


Gráfico 1. Relación entre la resistencia a la compresión y la edad para hormigones con y sin ceniza volante.

- A edades de fraguado posteriores a los 28 días, se logran mayores resistencias a la compresión que las mezclas de hormigón tradicional. Gráfico 1.
- Por su finura y forma esférica, permite reducir la cantidad de agua necesaria de la mezcla tradicional, Gráfico 2, obteniendo la misma trabajabilidad. Además, mejora la aptitud de bombeo de la mezcla por medios mecánicos, ya que disminuye la fricción entre las partículas de los áridos y entre el hormigón y la tubería.

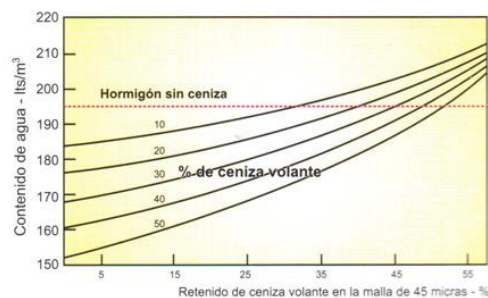


Gráfico 2. Efecto del retenido de ceniza volante sobre el contenido de agua de un hormigón cuyo asentamiento es de 5 a 7.5 cm. con un consumo de cemento de 300 Kg/m^3 al cual se le agregaron diversos porcentajes de ceniza volante.

- Reduce la exudación y la tendencia a la segregación del hormigón. *Gráfico 3.*

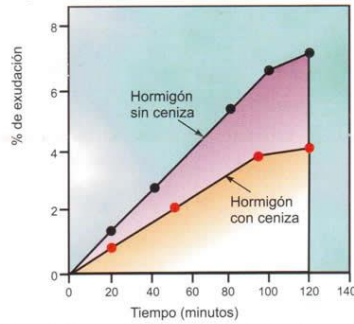


Gráfico 3. Efecto de la incorporación de las cenizas volantes en la exudación del hormigón.

- Permite reducir el calor generado durante la hidratación. *Gráfico 4.*

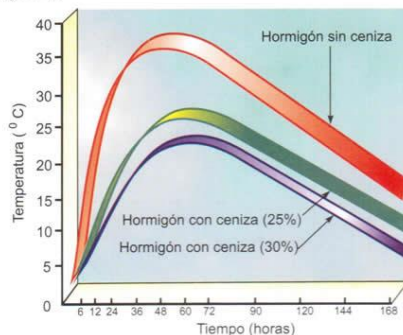
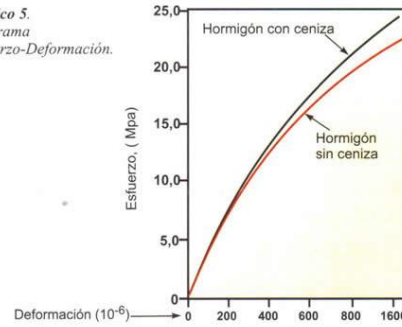


Gráfico 4. Influencia de la ceniza en la temperatura del hormigón.

Bajo determinadas condiciones, se obtienen hormigones endurecidos:

- Más durables.
- Más impermeables, puesto que la reacción puzolánica reduce el tamaño de los poros en la pasta cementicia, lográndose además una mayor resistencia a la corrosión en las armaduras de acero.
- Con una menor retracción (al reducir la relación agua/material cementante)
- Con más adherencia a las armaduras de acero.
- Con menor expansión nociva, puesto que reduce la disponibilidad de compuestos alcalinos que al reaccionar con los áridos que contienen sílice reactiva, pueden producirla.
- Con menor eflorescencia.
- Con más resistencia al ataque de sulfatos y ácidos.
- Con un módulo de elasticidad mayor con el tiempo de fraguado. *Gráfico 5.*
- Conserva las mismas características del hormigón tradicional en lo relacionado con el impacto, la abrasión y la exposición a altas temperaturas.

Gráfico 5. Diagrama Esfuerzo-Deformación.



MODO DE EMPLEO:

Para su dosificación y uso, se deberá contar con la asesoría de un profesional en el tema y cumplir con la NSR-98.

PRECAUCIONES:

- Los hormigones deben ser producidos con estándares de calidad adecuados para obtener las resistencias requeridas, de acuerdo a los procedimientos exigidos por la NSR-98 capítulo C.5. Se deberá tener especial cuidado con el curado del hormigón.
- En la preparación del hormigón con ceniza volante se debe tener especial cuidado en el control de la relación agua/material cementante (cemento + ceniza volante)
- Se recomienda siempre tomar cilindros de prueba, como testigos, para fallar a los 56 días.
- Su dosificación debe hacerse siempre en peso, con una tolerancia de $\pm 3\%$ de la cantidad especificada.
- La ceniza debe introducirse a la mezcladora simultáneamente con los demás componentes.

Si se dosifica inadecuadamente:

- Se puede retrasar el fraguado inicial del hormigón y por tanto su resistencia a edades tempranas.
- Se pueden obtener hormigones de bajas resistencias.

PRESENTACIÓN:

El suministro se hace en sacos de 30 Kg.

ALMACENAMIENTO:

Se debe almacenar en lugares que la conserven frente a la humedad.

NORMAS DE SEGURIDAD Y AMBIENTALES:

Para su manipulación y manejo se debe cumplir con las mismas normas que se estipulan para el cemento.

NOTA:

Para referencias bibliográficas, consultar al proveedor.

ANEXO 6 TABLAS

Tabla 21. Densidad muestra geopolimérica patrón en 3, 14 y 28 días

Mezcla	Masa - gr	Volumen - mm ³	Densidad - kg/m ³	Prom. Densidad	Curado - Días
PAT-1	259	125,750	2,060		
PAT-2	259	126,002	2,056	2,056	3
PAT-3	268	130,578	2,052		
PAT-1	244	121,955	2,001		
PAT-2	244	123,670	1,973	1,960	14
PAT-3	229	120,051	1,908		
PAT-1	263	129,553	2,030		
PAT-2	255	126,752	2,012	2,015	28
PAT-3	263	131,342	2,002		

Tabla 22. Densidad muestra geopolimérica PUR25 en 3, 14 y 28 días

Mezcla	Masa - g	Volumen - mm ³	Densidad - kg/m ³	Prom. Densidad	Curado - Días
PUR25 - 1	249	126,250	1,972		
PUR25 - 2	251	127,511	1,968	1,979	3
PUR25 - 3	253	126,750	1,996		
PUR25 - 1	225	115,704	1,945		
PUR25 - 2	225	118,117	1,905	1,925	14
PUR25 - 3	226	117,327	1,926		
PUR25 - 1	246	128,016	1,922		
PUR25 - 2	249	129,553	1,922	1,922	28
PUR25 - 3	247	128,528	1,922		

Tabla 23. Densidad muestras geopoliméricas PUR30 en función del periodo de curado

Mezcla	Masa - gr	Volumen - mm ³	Densidad - kg/m ³	Prom. Densidad	Curado - Días
PUR30 - 1	217	114,410	1,897		
PUR30 - 2	216	116,593	1,853	1,869	3
PUR30 - 3	224	120,531	1,858		
PUR30 - 1	245	127,260	1,925		
PUR30 - 2	245	128,787	1,902	1,919	14
PUR30 - 3	261	135,266	1,930		
PUR30 - 1	241	127,262	1,894		
PUR30 - 2	241	125,490	1,920	1,897	28
PUR30 - 3	249	132,619	1,878		

Tabla 24. Densidad muestras geopoliméricas PUR40 en función del periodo de curado

Mezcla	Masa - gr	Volumen - mm ³	Densidad - kg/m ³	Prom. Densidad	Curado - Días
PUR40 - 1	222	122,037	1,819		
PUR40 - 2	224	121,444	1,844	1,839	3
PUR40 - 3	223	120,269	1,854		
PUR40 - 1	247.3	129,040	1,916		
PUR40 - 2	248	132,903	1,866	1,876	14
PUR40 - 3	245.1	132,903	1,844		
PUR40 - 1	249	132,901	1,874		
PUR40 - 2	249	131,597	1,892	1,863	28
PUR40 - 3	187	102,562	1,823		

Tabla 25. Resistencia muestras geopoliméricas patrón en función del periodo de curado

Mezcla	Densidad - kg/m ³	Prom. Densidad	Resistencia - MPa	Prom. Resistencia	Curado - Días
PAT-1	2,060		1.05		
PAT-2	2,056	2,056	0.89	0.933	3
PAT-3	2,052		0.86		
PAT-1	2,001		1.46		
PAT-2	1,973	1,960	1.61	1.947	14
PAT-3	1,908		2.77		
PAT-1	2,030		2.06		
PAT-2	2,012	2,015	2.21	2.100	28
PAT-3	2,002		2.03		

Tabla 26. Resistencia muestras geopoliméricas PUR25 en función del periodo de curado

Mezcla	Densidad - kg/m ³	Prom. Densidad	Resistencia - MPa	Prom. Resistencia	Curado - Días
PUR25 - 1	1,972		0.86		
PUR25 - 2	1,968	1,979	0.78	0.847	3
PUR25 - 3	1,996		0.90		
PUR25 - 1	1,945		5.02		
PUR25 - 2	1,905	1,925	3.46	4.183	14
PUR25 - 3	1,926		4.07		
PUR25 - 1	1,922		3.12		
PUR25 - 2	1,922	1,922	2.72	3.033	28
PUR25 - 3	1,922		3.26		

Tabla 27. Resistencia muestras geopoliméricas PUR30 en función del periodo de curado

Mezcla	Densidad kg/m ³	Prom. Densidad	Resistencia - MPa	Prom. Resistencia	Curado - Días
PUR30 - 1	1,897		1.13		
PUR30 - 2	1,853	1,869	1.16	1.210	3
PUR30 - 3	1,858		1.34		
PUR30 - 1	1,941		3.74		
PUR30 - 2	1,956	1,953	3.74	3.820	14
PUR30 - 3	1,964		3.98		
PUR30 - 1	1,894		3.92		
PUR30 - 2	1,920	1,897	3.66	3.877	28
PUR30 - 3	1,878		4.05		

Tabla 28. Resistencia muestras geopoliméricas PUR40 en función del periodo de curado

Mezcla	Densidad - kg/m ³	Prom. Densidad	Resistencia - MPa	Prom. Resistencia	Curado - Días
PUR40 - 1	1,819		1.13		
PUR40 - 2	1,844	1,839	1.29	1.210	3
PUR40 - 3	1,854		1.21		
PUR40 - 1	1,916		3.63		
PUR40 - 2	1,866	1,876	3.76	3.853	14
PUR40 - 3	1,844		4.17		
PUR40 - 1	1,874		4.99		
PUR40 - 2	1,892	1,863	4.57	4.850	28
PUR40 - 3	1,823		4.99		