



Monografía:

**Geopolímeros como material sustituto del cemento y el concreto para la fabricación y
reparación de componentes y partes constructivas en edificaciones.**

Cristian Andrés Carvajal Muñoz

Código:20481712909

Universidad Antonio Nariño

Programa Ingeniería Civil

Facultad de Ingeniería ambiental y civil

Duitama, Colombia

2022

Monografía:

**Geopolímeros como material sustituto del cemento y el concreto para la fabricación y
reparación de componentes y partes constructivas en edificaciones**

Cristian Andrés Carvajal Muñoz

Monografía presentada como requisito parcial para optar al título de:

Ingeniero civil

Director (a):

Doctor, Ingeniero Diego Rodríguez Jiménez

Línea de Investigación:

Construcción

Universidad Antonio Nariño

Programa Ingeniería Civil

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Duitama, Colombia

2022

NOTA DE ACEPTACIÓN

El trabajo de grado titulado
Geopolímeros como material sustituto del cemento y el concreto para la fabricación y reparación
de componentes y partes constructivas en edificaciones.

Cumple con los requisitos para optar

Al título de ingeniero civil

Firma del Tutor

Firma Jurado

Firma Jurado

Duitama, 21 de noviembre de 2022

Contenido

	Pág.
Resumen.....	10
Abstract.....	11
Introducción	12
1. Planteamiento del problema	14
2. Justificación.....	17
3. Pertinencia social.....	20
4. Objetivos.....	22
4.1. Objetivo General.....	22
4.2. Objetivos Específicos.....	22
5. Marco conceptual	23
5.1. El concreto.....	23
5.2. Los polímeros.....	25
5.3. Geopolímeros.....	26
5.3.1 <i>Materias primas para la elaboración de cemento polimérico.</i>	29
5.3.2 <i>Diferencias entre el cemento portland y el cemento geopolímero.</i>	31
5.3.3 <i>Propiedades de los geopolímeros</i>	31
5.3.4 <i>Usos del concreto geopolimérico</i>	34
5.3.5 <i>Aplicación del cemento polimérico o geopoliméro.</i>	38
6. Estado del conocimiento.....	39
7. Metodología.....	41
7.1 Esquema metodológico.....	42
Conclusiones.....	43

Referencias bibliográficas.....46

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Concreto de alta resistencia.....	23
Figura 2. Concreto con geopolímeros.....	26
Figura 3. Brisbane West Wellcamp (Australia): Aeropuerto construido con cemento geopolimérico.	35
Figura 4. Global Change Institute de la Universidad de Queensland.	36
Figura 5. Marco metodológico de la investigación.....	42

Lista de tablas

	<i>Pág.</i>
Tabla 1. Clasificación de los polímeros.	25
Tabla 2. Materia prima para la fabricación de geopolímeros.....	29
Tabla 3. Diferencias entre el cemento convencional y el cemento geopolimérico.	31
Tabla 4. Propiedades de un concreto polimérico.	32
Tabla 5. Propiedades técnicas del cemento polimérico.....	33
Tabla 6. Otras especificaciones técnicas y características del cemento polimérico.....	33

(Dedicatoria)

A mis padres.

*No hay nada más verdadero que lo que nace del corazón,
por ello están presente siempre en mí, los amo desde lo
profundo de mi corazón.*

“lo que con mucho trabajo se obtiene más se ama”

Aristóteles

Agradecimientos

El agradecimiento de este proyecto va dirigido primero a Dios por sus bendiciones recibidas.

A mis padres por el amor recibido en cada momento siendo así un apoyo incondicional, su cariño motivador y su energía constante de positivismo, esto sin lugar a duda fue mi motor para avanzar y hacer este sueño realidad.

A mis demás familiares, amigos y compañera de vida por sus consejos y ayuda incansable aportando a mi crecimiento tanto personal como profesional.

Por último agradecer a cada uno de mis docentes y director de proyecto por su gran colaboración para así poder finalizar este ciclo.

Resumen

El objetivo del presente trabajo de grado es documentar el uso de los geopolímeros como material sustituto del cemento y el concreto convencional para la fabricación y reparación de componentes y partes constructivas en edificaciones. Asimismo, identificar la composición y propiedades mecánicas de geopolímeros.

Considerando un bajo impacto ambiental y especialmente sostenibles que proporcionan un material innovador, han surgido muchos estudios e investigaciones con el fin de sustituir el concreto proporcionando las mismas características. Destacando que este tipo de material aún se sigue estudiando y no se ha caracterizado todo el potencial que lo hace un material idóneo ante el uso del concreto, la posibilidad de usar geopolímeros para fabricar diferentes mezclas con características de morteros, concreto y pastas permite lo hacen un material de construcción altamente viable y eficiente, no solo para nuevas construcciones, sino para la intervención y reparación, esto indica que es una buena alternativa para la ingeniería civil en el campo del mantenimiento y reparación se le suma al ser un material menos contaminante y más resistente a los efectos de la intemperie.

Palabras clave: construcciones, material, sostenible, sustituir

Abstract

The objective of this degree work is to Document the use of geopolymers as a substitute material for cement and conventional concrete for the manufacture and repair of components and constructive parts in buildings. Also, identify the composition and mechanical properties of geopolymers.

Considering a low environmental impact and especially sustainable what proportion an innovative material, have Many studies and research have emerged in order to replace concrete providing the same characteristics. highlighting that this type of material is still being studied and the full potential that makes it an ideal material for the use of concrete has not been characterized. The possibility of using geopolymers to manufacture different mixtures with characteristics of mortars, concrete and pastes makes it a highly viable and efficient construction material, not only for new constructions, but also for intervention and repair, this indicates that it is a good alternative for civil engineering in the field of maintenance and repair is added to it by being a less polluting material and more resistant to the effects of the elements.

Keywords: constructions, material, substitute, sustainable.

Introducción

El sector de la construcción avanza con mayor rapidez debido al notorio crecimiento urbanístico que presentan las ciudades de Colombia, por consecuencia es necesario innovar con nuevos materiales y metodologías que ayuden a reducir los impactos ambientales teniendo en cuenta la sostenibilidad de una edificación. La construcción es un tema amplio e interesante así nos ayuda a proporcionar ideas con el fin de una buena calidad de vida, en este contexto, comienza a tomar relevancia el uso de nuevos materiales para la fabricación de componentes y materiales constructivos, así como para la reparación y mantenimiento de lo ya puestos en obra, dentro de la parte de materiales puede causar aspectos negativos en el ámbito ambiental social. A pesar de la contaminación y el gasto energético que causa fabricar y usar el cemento este material sigue siendo preferencia en el campo de la construcción, puesto que tiene características que lo hacen viable en su utilización ya sea bloques y vaciados para cerramientos, muros, escaleras y jardineras entre otros. Hoy en día ningún material ha podido sustituir en su totalidad.

Esta monografía se desarrollará una documentación general acerca de geopolímeros en el sector construcción como material sustituto del cemento y el concreto para la fabricación y reparación de componentes y partes constructivas en edificaciones. Este trabajo nos brinda la información de cómo los geopolímeros tienen buenas características en el campo de la construcción, porque sus propiedades son muy similares a las del concreto y mortero convencional esto resultan una alternativa viable para generar componentes (pre-fabricados o en obra) para cerramientos interiores y exteriores, así como para pisos. Este tipo de polímeros puede ser usado en diversos campos, sin embargo, ha tomado relevancia como sustituto del cemento portland. Uno de sus puntos positivos es al momento de su fabricación, tiene un bajo porcentaje en emisiones de

CO₂, además es de gran resistencia térmica y química, igualmente posee propiedades mecánicas.

Dado que los geopolimeros se consiguen a partir de la mezcla de minerales naturales.

1. Planteamiento del problema

Desde que el concreto surgió como material de construcción, se ha usado para erigir edificios de diversas índoles y escalas, principalmente, por su versatilidad y adecuación a diversas técnicas y sistemas constructivos. Sin embargo, el aprovechamiento del concreto trae consigo efectos que repercuten negativamente en el medio ambiente desde el momento mismo en que se procesa la materia prima para conseguirlo.

La industria del concreto contribuye con la generación de CO₂, no solo por la reacción química para transformar carbonato de calcio en dióxido de carbono y cal, sino por la quema de combustibles fósiles que implica dicho proceso para obtener la energía que lo hace posible; a esto se suma el transporte en todas las fases del proceso, así como los desechos producidos antes durante y después que el edificio cumple su vida útil.

Por otra parte, debe mencionarse que, para producir el Clinker, se requiere un consumo energético que puede ir de 1.6 a 1.85 GJ por cada tonelada de producto (Habert, 2013), debido a las altas temperaturas de cocción requeridas que, a nivel mundial, se traducen en un 2 o 3% de la demanda global de energía (Juenger et al., 2011). Igualmente se ha estimado que la masa de clinker producida equivale a un 7% de emisiones de CO₂ y 1.3% de gases invernaderos a nivel mundial (McLellan et al., 2011; Muñoz et al., 2015; Turner & Collins, 2013).

En el caso específico de Colombia, se extrae del Plan Nacional de Desarrollo, que aproximadamente un 22% de la energía consumida por el sector de la construcción está destinada a las edificaciones. Además, el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) (2022), reporta que para mediados del 2022 se produjeron 880.400 toneladas de concreto, lo que equivale, calculando según los datos de Huber op cit, a un consumo energético de 550,25 GJ de demanda energética.

A pesar de la contaminación y el gasto energético que trae consigo fabricar y usar el cemento y por ende el concreto, éste sigue teniendo un uso preferencial en el campo de la construcción, pues es idóneo para lograr estructuras resistentes y es tan versátil que sirve para elaborar bloques y vaciados para cerramientos, muros, escaleras y jardineras entre otros. Pero son sus características físico-mecánicas las que le imprimen ese uso masivo que, hasta hoy, ningún material ha podido sustituir en su totalidad.

El concreto, al ser el material de preferencia para las construcciones, en función de su uso requiere unas dosificaciones específicas de cemento, agua, agregados y en algunos casos, aditivos como por ejemplo los aceleradores de fraguado, esta mezcla en ocasiones, puede contener aire, quedar a la vista y estar sometido a diferentes agentes externos naturales o químicos que, con el tiempo, van deteriorando el componente o acabado constructivo, en consecuencia, debe apelarse a trabajos de mantenimiento, reparación y en casos extremos sustitución del componente, normalmente usando el mismo material, cemento y/o concreto según sea el caso.

Es común observar patologías en las construcciones en las que predomina el uso de cemento/concreto, tales como manchas, presencia de moho, agrietamientos, deformaciones, fracturas, desintegración, desprendimientos, delaminación y desgastes, claro está, en mayor grado cuando el material queda a la vista o en obra limpia, por ejemplo, frisos, molduras, cornisas, paneles, pavimentos, columnas, vigas, entre otros. Este deterioro si no es sometido al debido y oportuno mantenimiento o reparación, se va desgastando de forma acelerada ocasionado que la edificación pierda su valor estético y en algunos casos funcional. Sin importar la patología, es necesario hacer la inversión necesaria para reparar los daños y en este punto particular el estado y la empresa privada juegan un papel preponderante, especialmente porque en Colombia hay un significativo número de edificaciones, muchas de ellas icónicas, que tienen como característica

principal su estilo neobrutalista, es decir, casi el total de la edificación está hecha con concreto a la vista, sin contar además, con la cantidad de monumentos, parques y plazas en las que sus suelos, acabados y mobiliarios están elaborados con concreto y son parte fundamental de la imagen de las ciudades en las que se emplazan y en segundo lugar, porque prácticamente, el total de construcciones del país tienen algún componente en concreto o acabados en los que se requiere el uso de cemento, por ende, el mantenimiento, la conservación y la reparación son esenciales para alargar la vida útil de las mismas y minimizar gastos por reparaciones de envergadura.

En este contexto debe resaltarse la importancia de la investigación y la experimentación para obtener nuevos productos y materiales que sean, por una parte, más amigables con el ambiente y por la otra, además de duraderos, económicos; en el caso particular de Colombia, según el índice Global de Competitividad (IGC), - que mide la capacidad de un país en cuanto a su crecimiento económico sostenido a largo plazo - se ubica en lugar 66 de 137 países, principalmente por su desarrollo en el mercado financiero; sin embargo, destaca como debilidad, en cuanto al avance en invención, que el país ocupa el puesto 73 debido a su bajo índice de innovación y gastos de las empresas y el gobierno en este aspecto (Cámara Colombiana de la Construcción, 2019). Igualmente, se reporta que:

Al realizar el análisis detallado de la aplicación de actividades de mejores prácticas, se presenta un rezago en la adopción de mejores prácticas en diseño, tecnología y capacitación, dimensiones que se encuentran directamente relacionadas con prácticas relativas al apoyo de expertos y proyectos previos al diseño. (Cámara Colombiana de la Construcción - McKinsey, 2018: p. 121)

La investigación en este nuevo siglo tiende a encontrar materiales alternos que puedan sustituir, el uso del concreto y/o el cemento. El reto es conseguir un material que sea más amigable

con el ambiente sin perder su resistencia y versatilidad y es en este punto en específico en donde los geopolímeros cumplen un papel de interés, no solo por ser un material con infinidad de usos, sino por las propiedades mecánicas que los caracterizan, destacando que este tipo de material aún se sigue estudiando y no se ha caracterizado todo el potencial que lo hace un material idóneo ante el uso del concreto convencional, sobre todo para reparaciones y sustitución de componentes en las edificaciones colombianas.

Lo expuesto lleva a plantear la siguiente interrogante de investigación ¿Cuáles son las propiedades que permiten y dan viabilidad para usar geopolímeros sustituyendo las mezclas cementicias convencionales para la reparación y sustitución de partes y componentes constructivos de concreto en edificaciones neobrutalistas?

2. Justificación

Actualmente y como respuesta al acelerado deterioro ambiental, del cual la construcción tiene una alta cuota de responsabilidad, la tendencia es la de crear e innovar para encontrar nuevos y más eficientes materiales de construcción, con mejores cualidades de resistencia, ligereza, manejabilidad y permeabilidad, así como con mejores propiedades acústicas y térmicas y por supuesto, asociados con menores costos de producción, adquisición y mantenimiento.

En este contexto, comienza a tomar relevancia el uso de nuevos materiales para la fabricación de componentes y materiales constructivos, así como para la reparación y mantenimiento de los ya puestos en obra y en este aspecto, destacan los estudios, ensayos y uso de geopolímeros para la fabricación de hormigones y morteros similares al concreto convencional, particularmente en lo que a resistencia se refiere (González *et al*, 2012).

La anterior apreciación sustenta la importancia de indagar en los usos que se le viene dando a los geopolímeros en el campo de la construcción, particularmente, porque éstos tienen características muy similares a las del concreto y mortero convencionales y resultan una alternativa viable para generar componentes (pre-fabricados o en obra) para cerramientos interiores y exteriores así como para pisos, topes, entre otros, así como para hacer reparaciones en edificaciones en las que los materiales cementicios han sufrido algún tipo de patología y lo que es más importante, su producción genera menos contaminación que la del cemento tradicional, al utilizar como materia prima subproductos de procesos industriales y minerales no metálicos (Suksiripattanapong *et al*, 2015).

La posibilidad de usar geopolímeros para fabricar diferentes mezclas con características de morteros, concreto y pastas permite inferir que la diversidad de usos que le caracterizan lo hacen un material de construcción altamente viable y eficiente, no solo para nuevas construcciones, sino para la intervención y reparación de las existentes, esto se traduce en una alternativa para la ingeniería civil en el campo del mantenimiento y reparación de edificaciones en las que el concreto y las mezclas de mortero son los materiales predominantes y en suma, al ser un material menos contaminante y más resistente a los efectos de la intemperie, como lo afirman Van Gemert y Knapen, (2006), al exponer que los polímeros están tomando amplio interés en el campo de la construcción y permiten a la industria generar nuevas construcciones con mejor durabilidad y más sostenibles; además que es un material que se puede usar para restaurar las que ya están en pie y requieren reparaciones.

Así mismo destaca el trabajo del Centro de investigación de Carreteras de Bélgica que, en articulación con el Departamento de Ingeniería Civil del Centro de Investigaciones KU Leuven, (2011), determinaron que:

- Los morteros modificados con polímero contribuyen con la materialización de construcciones más sustentables.
- La sinergia entre los componentes del cemento y los polímeros, tiene importante incidencia en el comportamiento del material final, confiriéndole más durabilidad.
- Terminan concluyendo con lo siguiente: “Se puede decir que el material con una mejorada resistencia contra condiciones severas ha sido finalmente creado. Los morteros con polímero son usados frecuentemente para reparar morteros simples debido a su excelente durabilidad y adhesión a otros materiales cementicios” (p. 5)

A lo anterior, los autores agregan:

La modificación de polímeros se usa con frecuencia en la industria de restauración y reparación para superar algunas de las deficiencias de los morteros y hormigones convencionales, por poca resistencia a la tracción y al impacto, resistencia limitada a corrosión y mal comportamiento en condiciones severas. El mortero y el hormigón modificados con polímeros son muy atractivos materiales de reparación debido a su excelente adherencia al hormigón viejo y otros materiales minerales. Su elasticidad y coeficiente de expansión térmica son comparables a los del hormigón convencional y también lo es su proceso tecnológico. (p. 5)

Otro estudio que ratifica tales aseveraciones y justifica la importancia de estudiar los geopolímeros como material alternativo al cemento y concreto en la reparación de elementos y componentes constructivos en edificios neobrutalistas viene dada por una investigación hecha en la Universidad Iberoamericana de México, Fernando Pérez. Realizaron un estudio comparativo de fuerza usando muestras de diferentes tipos de concreto, entre los cuales estaba el cemento polimérico. De los ensayos y análisis pudieron determinar lo siguiente:

- La resistencia del concreto hecho con cemento Portland resultó estar por debajo de la resistencia del concreto polimérico.
- En cuanto al desempeño sísmico, el estudio permitió concluir: “contar con materiales que absorben más energía de deformación por unidad de volumen, permite elaborar estructuras con elementos huecos, siendo más ligeras que las estructuras tradicionales elaboradas con hormigón armado. Este hecho impide que las aceleraciones sísmicas provoquen grandes fuerzas inerciales sobre las estructuras”. (p. 4)

Estos estudios evidencian la viabilidad de utilizar cemento polimérico en la construcción y reparación de partes de edificaciones hechas con concreto. Igualmente, permiten inferir que el uso de los geopolímeros ofrece ventajas para lograr que el sector de la construcción sea más sostenible, pues la implementación de tecnologías y materiales innovadores, tendientes a minimizar gastos de fabricación, gastos en obra y procesos constructivos, así como en mantenimiento y reparación de edificaciones y otro tipo de obras de índole civil, se proyecta como estrategia para materializar obras con mínimos impactos en el medio ambiente.

Con la presente investigación, de tipo documental, se pretende analizar, particularmente a través de trabajos de investigación y casos referenciales, cuáles son las cualidades de los geopolímeros que hacen que de este material sea viable para sustituir parcial o totalmente el concreto y el mortero convencional en la reparación de edificaciones en las que la mayoría de sus componentes son de concreto.

3. Pertinencia social

Usar los geopolímeros como materia prima para producir materiales y componentes constructivos, supone una de varias medidas dirigidas a conseguir la sostenibilidad en el campo de

la construcción, razón por la cual su uso ha tomado relevancia para hacer reparaciones en partes de edificaciones ya construidas. Al respecto, Aguado y Salla (1987: p. 69), indican que una característica de los geopolímeros “es proteger el elemento base que se recubre de distintos agentes externos”. Es frecuente usarlo para reparar suelos industriales, pisos de garajes, sean de bajo o alto tránsito, pues son pavimentos que “tienen, en general, buen comportamiento frente a las sollicitaciones que pueden estar sometidos: tráfico ligero y/o pesado, ataques químicos debidos a grasas, aceites, otros; impacto de herramientas o cargas, abrasión. La aplicación puede hacerse tanto en obra nueva como en obra antigua (reparación o cambio de uso)” (p.69).

También el, geocemento o geopolímero se usa para recubrir elementos de hormigón que están expuestos a agentes externos, bien sean de índole química o natural, pues se comporta bien ante los mismos (Aguado y Salla, 1987).

En concordancia con los estudios citados, puede decirse que los geopolímeros se vislumbran como un material eficiente para hacer reparaciones en componentes constructivos distintos, dada su capacidad de adherencia, impermeabilización y resistencia; en tal sentido, puede convertirse en una alternativa económicamente viable y sostenible para el campo de la construcción y el mantenimiento y reparación de edificaciones y obras civiles.

Por otra parte, una gran ventaja se sustenta en ofrecer una solución tendiente a generar un material resistente y económico que permita hacer construcciones más sostenibles, seguras y respetuosas del territorio en que se emplazan, es decir, al usar “los residuos poliméricos [se reduce] el consumo de materias primas en la industria de la construcción, mejorando la eficiencia económica y creando productos ecológicos sostenibles en el tiempo” (Fuentes, *et al*, 2021).

Además, por sus características de resistencia mecánica y resistencia a factores climáticos y a agentes químicos, puede inferirse que es un material tendiente a una vida útil más larga que la de

los elementos contruidos a base de cemento. Estas afirmaciones en consecuencia, tratarán de corroborarse estudiando antecedentes que reporten ensayos de resistencia de los geopolímeros, así como del análisis de casos referenciales en los que, algunas de sus características constructivas o la reparación de las mismas reposen en el uso de este material.

4. Objetivos

4.1 Objetivo General

Documentar el uso de los geopolímeros como material sustituto del cemento y el concreto convencional para la fabricación y reparación de componentes y partes constructivas en edificaciones.

4.2 Objetivos Específicos

- Identificar la composición de los geopolímeros para el reconocimiento de sus potencialidades y posibles usos como material para fabricar y reparar partes y componentes constructivos.
- Reconocer las propiedades mecánicas de los geopolímeros para compararlas con las del concreto.
- Definir los aspectos constructivos y de reparación en los cuales los geopolímeros pueden sustituir el uso del concreto y motero convencional.

5. Marco conceptual

A pesar de ser el concreto el material más usado en la construcción, actualmente, en el mundo, se hacen diversidad de estudios y ensayos para elaborar materiales de construcción innovadores, de bajo impacto ambiental y especialmente sostenibles. Dichos materiales están pensados con el uso de materiales de reciclaje solos o en adición con los tradicionales, destacando en este marco, los geopolímeros, por sus características físico-mecánicas.

En este sentido es necesario abordar aspectos relativos a estos dos materiales tan demandados en la sociedad actual para dar respuesta a la interrogante de esta investigación.

5.1 El concreto

El concreto (Figura 1) ha sido un material de construcción de alta demanda al punto de generar todo un movimiento en torno a él, el brutalismo y neobrutalismo o nuevo brutalismo, movimientos que enaltecieron el uso del concreto en la arquitectura y la construcción. El brutalismo, hace referencia a un estilo arquitectónico de la década de los 40, en el que el material predominante era el concreto a la vista; se originó luego de la Segunda Guerra Mundial y estuvo inspirado en la obra de Le Corbusier por su “béton brut” u hormigón bruto que, posteriormente, Reyner Banham, denominó brutalism (en inglés). Sus precursores fueron los arquitectos británicos Alison y Peter Smithson.

Figura 1. *Concreto de alta resistencia.*



Fuente: PSI (2021).

El neobrutalismo, es un término dado por el arquitecto sueco Hans Asplund, a la arquitectura de mediados del año 1950; se estableció como un movimiento reformista de los criterios del funcionalismo moderno, pero manteniendo la esencia del brutalismo moderno, el uso del concreto como material protagonista de la construcción.

Las ventajas de usar concreto y especialmente el cemento portland se debe a sus características de resistencia a la compresión, impermeabilidad y dureza entre otras. Este compuesto artificial es de producción mundial y por su uso frecuente en todo tipo de construcción y estructuras, su fabricación y puesta en obra debe ceñirse a normas técnicas específicas y de obligatorio cumplimiento; además el cemento junto con sus derivados como el concreto y los morteros entre otros, obedecen a un diseño y son “susceptibles de toda acción de ajuste, modificación y, lo que es más importante, de optimización” (Sánchez, 2001: p. 15). El concreto, como material de construcción usado desde hace más de un siglo, tiene alta demanda de uso por la

resistencia a grandes esfuerzos y a la compresión, pero baja resistencia a la tracción, lo cual se sopesa con el uso de cabillas de acero, por eso su uso extendido en estructuras de diferentes escalas y proporciones.

Para Sánchez *op cit*, el concreto es “la mezcla de un material aglutinante (cemento portland), un material de relleno (agregados o áridos), agua y eventualmente aditivos, que al endurecerse forma un todo compacto (piedra artificial) y es capaz de soportar grandes esfuerzos de compresión” (p. 19). Es esa característica de resistencia la que hace difícil sustituir el concreto como material de construcción, lo que ha llevado a investigadores de la ingeniería y la arquitectura a buscar alternativas sostenibles que puedan responder igual que el concreto pero que en su fabricación y utilización sean más sostenibles.

5.2 Los polímeros

Los polímeros se conocen como macromoléculas formadas por cadenas de monómeros, unidos por enlaces covalentes. Al respecto Marín (2017) refiere que “todos los materiales sintéticos que se conocen como plásticos están formados por largas cadenas de moléculas orgánicas de gran tamaño (meros), denominadas polímeros” (p. 379) y pueden ser naturales o sintéticos. En la tabla 01 se presenta la clasificación de los mismos:

Tabla 1. Clasificación de los polímeros.

Polímeros naturales	Son los que están presente en la naturaleza tales como la celulosa o el caucho natural.
Polímeros sintéticos	Son elaborados artificialmente y se obtienen al procesar los polímeros naturales, por ejemplo, l nitrocelulosa
Polímeros semi-sintéticos	Resultan de un proceso industrializado teniendo como materia prima los monómeros. En esta clasificación se incluyen los geopolímeros

Fuente: Elaboración propia (2022), con datos de (Marín, 2017).

Destaca de este material, una serie de propiedades que lo hacen candidato para la obtención de nuevos materiales y componentes contractivos, éstas son: resistencia a la corrosión, impermeables, aislante, higiénico, ligeros, fáciles de producir y económicos, pero tiene la desventaja de ser inflamables y con un bajo módulo de elasticidad (Marín, 2017). En este punto es importante definir que es un geopolímero.

5.3 Geopolímeros

Un Geopolimero (Figura 2), también conocidos como aluminosilicatos inorgánicos, término establecido por Joseph Davidovits en 1978, hace referencia a los polímeros sintéticos inorgánicos de aluminosilicatos, los cuales surgen a partir de una reacción química denominada geopolimerización. También son conocidos como cemento alcalino activado, geocemento, concreto polimérico inorgánico e hidrocerámica. Davidovits genera el concepto a propósito de la creación Instituto Géopolymère, en Francia.

Figura 2. Concreto con geopolímeros.



Fuente: RECICLOS (2016).

Los geopolímeros son polímeros inorgánicos conformados por partes tetraédricas de aluminio y silicio “condensadas a temperatura ambiente y resultan de la disolución de materias

primas selectas (que pueden ser desechos industriales y/o arcillas naturales) en presencia de soluciones con pH elevado”. (Burciaga *et al*, 2015: p. 2).

Por su parte, Mena, (2108: p. 5) los define “como un grupo de materiales cementantes que se sintetizan al poner en contacto materiales compuestos primordialmente de aluminosilicatos con una solución alcalina, los cuales forman una pasta que fragua y obtiene una resistencia mecánica con el tiempo”.

Específicamente se reporta que el concreto geopolimérico tiene un alto potencial para sustituir al cemento portland, pero para que eso se consolide es necesario contar con la debida materia prima y consolidar las investigaciones que permitan difundir, de manera científica, las ventajas de este material, del cual se sabe tienen resistencia al ataque de sulfato y de los ácidos, así como baja conductividad térmica.

Este tipo de polímeros puede ser usado en diversos campos, sin embargo, ha tomado relevancia como sustituto del cemento portland. Entre sus características destaca que, al momento de su fabricación, tiene un bajo porcentaje en emisiones de CO₂, además es de gran resistencia térmica y química, igualmente posee propiedades mecánicas.

Como se extrae de la literatura, los geopolimeros se consiguen a partir de la mezcla de minerales naturales, rocas volcánicas, desechos industriales, arcillas calcinadas y soluciones como hidróxido de sodio y silicato de sodio o potasio (León, 2018).

La fórmula general usada para expresar un geopolímero es la siguiente:



Donde M es el catión como el Na⁺ o K⁺, n es el grado de policondensación, z es 1, 2 y 3 y w es la cantidad de agua enlazada.

La importancia de estudiar los geopolímeros como material alternativo en la construcción se debe, principalmente, a que la fabricación del cemento portland se sustenta en un proceso de fabricación que implica un alto consumo de energía, sobre todo para la fase de calcinación de la materia prima. Por su parte, el cemento geopolímero requiere de materiales de muy baja energía, tales como cenizas volantes, escorias entre otros residuos industriales, más una cantidad de materiales de alta energía química (activadores alcalinos) para que se genere la reacción en la superficie de las partículas y así hagan su papel de material adherente o pegamento.

El concreto polimérico contiene una matriz tridimensional compuesta por un agrinado fino, uno grueso y obviamente, por un polímero, lo que resulta en un material sólido, resistente a la compresión y a los ataques químicos, impermeable, entre otras ventajas. Es importante acotar que el cemento polimérico se obtiene, prácticamente, cumpliendo con los mismos requerimientos usados para fabricar concreto con cemento Pórtland, la diferencia radica en que el elemento cementante usado es el polímero, el cual sustituirá la pasta o mezcla de agua y cemento Pórtland.

A la mezcla se le incorpora poliéster y diferentes proporciones de estireno y agregados; para el fraguado se usa octoato de cobalto y peróxido de metiletilcetona. Este fraguado puede hacer efecto en pocas horas si la mezcla queda a temperatura ambiente, pero si se quiere un fraguado más rápido, es necesario que la mezcla se someta a una temperatura mayor.

Otra explicación de la geopolimerización la aporta Días (2018: p. 22), quien indica que esta es un “proceso con el que se forman cadenas compuestas por unidades más simples (monómeros) como cualquier otro polímero, la matriz geopolimérica (polímero inorgánico) tiene la ventaja de utilizar subproductos industriales como materia prima, puesto que se basan en materiales precursores de aluminosilicatos como la ceniza volante y forman redes poliméricas Si-O-Al”. Igualmente, Álvarez s.f citado en Días (2018):

La geopolimerización se puede dividir en 3 etapas: la etapa de disolución de los aluminosilicatos en una solución alcalina fuerte con $\text{pH} > 12$, siendo esta la más importante, puesto que en ella se disuelven las partículas vítreas o amorfas de los aluminosilicatos y se rompen Si-O-Si y Al-O-Si; en la segunda etapa se lleva a cabo la reorientación de los grupos de los iones formados, con los iones formados en la primera etapa se introducen en las cadenas de siloxonato; y finalmente sucede la etapa de policondensación en la cual se intensifica el proceso de síntesis, el sistema continua reordenándose y reorganizándose para aumentar la conectividad de la estructura del geopolímero. (p. 23).

El geocemento o cemento polimérico es entonces un material que se obtiene de hacer una mezcla con algún líquido alcalino, un material de origen geológico (con contenidos de aluminio o silicio) y de esta manera conseguir un aglutinante sin la utilización de cemento portland y la reacción química de tal combinación o mezcla es la que da origen al proceso de polimerización, de la cual se obtiene como resultado un material polimérico.

5.3.1 Materias primas para la elaboración de cemento polimérico.

Los geopolímeros pueden fabricarse a partir del uso de diversos componentes, algunos de ellos reciclados y dependiendo de las proporciones usadas, tendrá unas características físicas y funcionales determinadas, las cuales se abordarán más adelante. En la Tabla 02 se sintetiza lo referente a la materia prima usadas para la fabricación de geopolímeros.

Tabla 2. Materia prima para la fabricación de geopolímeros.

MATERIA PRIMA	CARACTERÍSTICAS
Resinas	Aglutina e integra las partículas de agregados y rellenos (fillers).

	La más utilizadas son: urea- formaldehído, epóxica (o epoxi), poliésterica (o poliéster) y fenólica.
Las cargas cerámicas	Cumplen dos funciones básicas: soportar carga mecánica (agregados gruesos) y llenar vacíos para aumentar la compactación y mejorar propiedades de resistencia a intemperie y al fuego. Las cargas cerámicas son aquellos minerales que se utilizan en materiales compuestos en donde la carga cerámica se agrega para reemplazar otros materiales que son más costosos o en su defecto que se agrega para mejorar propiedades físicas y/o químicas por un menor precio o una relación costo beneficio mejor (al mejorar propiedades), se utilizan: carbonato cálcico (CaCO ₃), caolín, yeso, talco, diatomita, wollastonita, sulfato sódico entre otros (SIEMCALSA, 2007). Además, suele utilizarse arenas de diferente graduación y arcillas (que contiene diferentes minerales), agregados grueso de tamaño 6/8 de pulgadas, 3/8 de pulgada).

Fuente: Elaboración propia (2022), adaptado de Restrepo (2015).

A los aditivos expuestos en la Tabla 02, se deben adicionar los indicados por Lavelle y León (2018: p. 67), a saber:

- Minerales naturales.
- Desechos industriales.
- Arcillas calcinadas.
- Rocas volcánicas o mezclas de varios materiales
- Soluciones como hidróxido de sodio y silicato de sodio o potasio.

Por otra parte, es importante acotar que el uso de geopolímeros en sustitución del concreto convencional, genera beneficios al medio ambiente tales como los expuestos por León (2018):

- Reducción de CO₂.
- Uso de residuos industriales reciclados, lo que se traduce en la disminución de la extracción de materias primas.

5.3.2 *Diferencias entre el cemento portland y el cemento geopolímero.*

Los geopolimeros le han dado una nueva caracterización al concreto, dirigiendo su fabricación y uso de manera más responsable y sostenible, por eso es importante exponer las diferencias entre el cemento convencional y el cemento geopolimérico.

Tabla 3. Diferencias entre el cemento convencional y el cemento geopolimérico.

CEMENTO PORTLAND	CEMENTO GEOPOLIMÉRICO
Susceptible a los ciclos de congelación y descongelación	Resistente a los ciclos de congelación y descongelación
Susceptible al ataque de materiales con pH bajo	Alta resistencia química
Métodos limitados para acelerar el desarrollo de la fuerza	Puede soportar un valor R aislante de hasta 8 por pulgada de material celular
Propiedades modulares típicas y difíciles de modificar	Tiempos de ajuste más rápidos o más lentos que son determinados por el operador
Permeabilidad	Tiene una permeabilidad al aire y al agua extremadamente baja (a menos que se solicite una mezcla permeable)
Algún control sobre la permeabilidad	Puede soportar el calor extremo sin degradarse
Degradación por edad extrema y carbonatación cuando se calienta	Métodos de curado variables para la resistencia final en horas, días o semanas
Métodos de curado extremadamente limitados	

Fuente: Geopolymrs solutions (2022).

5.3.3 *Propiedades de los geopolímeros*

Es muy escasa la literatura en torno al tema de los geopolimeros, sin embargo, se encuentra una variedad de trabajos de investigación que valida, mediante ensayos de laboratorio y el diseño de ciertos componentes constructivos, las propiedades del geocemento, dejando sentada la viabilidad de uso no solo para hacer nuevas construcciones, sino para reparar o sustituir partes o

componentes de las ya construidas. En este contexto, Giraldo, (2015), menciona algunas propiedades:

Tabla 4. Propiedades de un concreto polimérico.

PROPIEDAD	RESULTADO
Resistencia	De 3 a 5 veces más fuerte que el concreto convencional.
Agentes externos	No le afecta la humedad, sales o cambios de temperatura.
Peso	De un tercio hasta un décimo del peso que el del concreto tradicional.
Laborables	Puede aserrarse y perforarse en campo.
Durabilidad	Para uso en la intemperie no se decoloran.
Acabado y estética	Amplia gama de texturas, geometrías y colores.
Instalación y transporte	Fácil y rápido por su tamaño y peso.
Fuerza superior	Resistencia al impacto 10 veces mayor que el mármol

Fuente: (Reforplas 2012 citado en Giraldo, 2015).

Giraldo (2015) completa la información anterior asumiendo las propiedades de los geopolímeros como como ventajas y son las siguientes:

- La gran variedad de materias primas que pueden ser aplicadas dentro de esta tecnología.
- Menor impacto ambiental debido a los bajos niveles de consumo energético y con ello una baja emisión de gases contaminantes a la atmósfera.
- Son preparados fácilmente, al no requerir equipos de elevado costo, esto se realiza por medio de una mezcla homogénea de las materias primas.
- Las temperaturas que promueven el endurecimiento de la pasta no superan los 200 °C, mayormente esto se hace a temperatura ambiente.
- Pueden adquirir elevadas resistencias mecánicas en corto tiempo, solo controlando las condiciones de curado.
- Alta durabilidad. (p. 28).

Por otra parte, la empresa Paviconj (2021), en su blog expone propiedades técnicas más específicas del cemento polimérico u hormigón polímero:

Tabla 5. Propiedades técnicas del cemento polimérico.

PROPIEDAD	VALOR
Densidad kg/m ³	1900 - 2400
Resistencia a la compresión MPa	50 - 150
Resistencia a la flexión MPa	15 - 55
Resistencia a la tracción MPa	5 - 25
Elasticidad GPa	10 45
Porcentaje de deformación última en compresión	< 12%
Coefficiente de viscosidad (Poisson)	0.16 – 0.33
Coefficiente de dilatación lineal 106 K - 1	10 - 35
Resistencia a la temperatura °C	15°C – 25°C
Absorción de agua	0,03 – 1,0 (% peso)

Fuente: Paviconj (2021)

GeologiaWeb (2022), muestra, igualmente, información inherente con las propiedades del cemento polimérico, destacando que:

Los compuestos de hormigón polimérico poseen una combinación única de propiedades que dependen de la formulación (...), la cual incluye secado rápido a temperatura ambiente (-18°C a + 40°C (0 a 104 °F), alta resistencia a la flexión, tracción y compresión, buena adherencia y durabilidad a largo plazo incluso en ambientes de altas y bajas temperaturas constantes. (p. 1)

En este contexto, GeologiaWeb (2022) presenta los siguientes datos:

Tabla 6. Otras especificaciones técnicas y características del cemento polimérico.

PROPIEDAD	VALOR
Fuerza compresiva y flexible	- Aplicado a sistemas prefabricados, puede soportar hasta 1300 kp/cm ² frente a los 700 kp/cm ² soportados por fibrocemento o 500 kp / cm ² soportados por hormigón tradicional antes de romperse. - También aplicado a sistemas prefabricados, puede soportar hasta 18-25 MPa frente a los 15-20 soportados por

	fibrocemento o los 1-5 MPa ² soportados por hormigón tradicional antes de romperse o deformarse.
Resistencia la abrasión	La dureza de los áridos que contienen alto porcentaje de sílice garantiza que este hormigón tenga una buena conservación de las superficies expuestas al tráfico rodado y al desgaste.
Resistencia a los productos químicos	Es uno de los materiales más resistentes a cualquier producto químico, pues sus componentes no reaccionan al contacto y evitan la desintegración y deformación, además, que aumenta su resistencia a la abrasión.
Impermeabilidad	Es un producto impermeable, prácticamente tiene 0% de absorción de agua, lo que garantiza el sellado de las estructuras de ingeniería civil en que se utilice.
Resistente a cambios de temperatura	Es muy resistente a los cambios bruscos de temperatura es decir a los ciclos de congelación y descongelación. Por lo tanto, su resistencia en el tiempo es alto y el porcentaje de grietas se ve muy reducido.
Hormigón impregnando de polímero	Es un hormigón convencional, curado y secado al horno. Un monómero de baja viscosidad se difunde y se polimeriza utilizando radiación, calor o iniciación química. Los monómeros utilizados son metil metacrilato (MMA), estireno, acrilonitrilo, t-butil estireno, etc.
Concreto de cemento polimérico	Se hace mezclando cemento, agregados, agua y monómero, como poliéster-estireno, epoxi-estireno, furano, cloruro de veilden. La mezcla de plástico se moldea, cura, seca y polimeriza.
Hormigón polímero	En este tipo de concreto no se usa cemento y los agregados se unen con un aglutinante polimérico. Es más adecuado para estructuras con una alta relación de carga viva a carga muerta y construcción compuesta.
Concreto polimérico parcialmente impregnado y recubierto con superficie.	Se hace sumergiendo inicialmente las muestras secas en un monómero líquido como metacrilato de metilo y luego sellando al mantenerlas bajo agua caliente a 70 ° c para evitar pérdidas por evaporación. La polimerización se logra mediante la adición de 3 por ciento en peso de peróxido de benzoico al monómero como catalizador. Encuentra su aplicación para mejorar la durabilidad de las cubiertas de puentes.

Fuente: Elaboración propia (2022) con datos de Geología Web (2022).

5.3.4 Usos del concreto geopolimérico

Los geopolímeros son materiales cementicios con características y propiedades que los hacen aptos para ser utilizados en la construcción, además generan menos emisiones contaminantes

en su proceso de producción. Este material se consigue mediante la formación de un polímero inorgánico al activarse “una fuente de alúmina y sílice mediante la adición de una solución a base de un álcali y por lo general un curado en horno a temperaturas mucho menor a las usadas en materiales tradicionales” (Davidovits, 1978 citado en Salirrosas 2020: p. 7).

El concreto geopolimérico o geocemento tiene un amplio uso, por su versatilidad, se utiliza para construir tanques soterrados, revestimientos de paredes, incluso de túneles de minería, soporte de techos, vigas, pilares, losas, muros, hormigón pretensado o prefabricado y reparación de partes y componentes de edificaciones, entre otros usos (Figura 3).

Figura 3. *Brisbane West Wellcamp (Australia): Aeropuerto construido con cemento geopolimérico.*



Un ejemplo del uso del concreto geopolimérico en la construcción es el edificio del Global Change Institute de la Universidad de Queensland, en Australia, en donde el material se utilizó con fines estructurales; además como criterio de diseño para el ahorro energético, se usó también como

elementos de hormigón de geopolímero prefabricado en sustitución del concreto convencional. (Figura 4).

Proyectos como este han permitido nombrar a este material como concreto sostenible.

Figura 4. *Global Change Institute de la Universidad de Queensland.*



Fuente: greenroofs (2022).

Si el uso del geopolímero es para reparaciones tales como fallas estructurales o agrietamientos y presencia de fisuras en componentes o partes de un edificio elaboradas con concreto o morteros, el geocemento se aplica en capas o por infiltración, recursos que, dadas sus propiedades, ofrecen buena resistencia a los químicos y al desgaste, adherencia e impermeabilización y según UMACON (2017), son de 3 tipos:

1.- Impregnación.

2.- Hormigón polímero.

3.- Hormigón polimérico modificado.

Barrera, *et al*, (2012: p.169), describen el concreto polimérico (PC) como un “material compuesto muy versátil debido a su uso, en: construcción y reparación de estructuras, pavimentos de carreteras y puentes, tuberías de aguas residuales y estructurales, así como en paneles decorativos de la construcción”. De forma similar, QuimiNet (2013) enuncia los diversos usos que se le puede dar al cemento polimérico, a saber:

- Construcción.
- Reparación de estructuras.
- Pavimentado de carreteras.
- Pavimentado de puentes.
- Fabricación de tuberías para aguas residuales.
- Paneles decorativos para fachadas.

FibraPlus (2019) también afirma que el cemento u hormigón polimérico puede utilizarse en construcciones nuevas o para reparaciones en las ya existentes, haciendo mención específica a la reparación de hormigón viejo. Indica que este material dadas sus propiedades adhesivas, puede usarse para reparar partes o componentes constructivos elaborados con cemento convencional.

Igualmente, FibraPlus *op cit*, expone que el concreto polimérico tiene resistencia a la corrosión y por esta característica, es frecuente su uso para reparar piscinas, tanques, pisos, estructuras de alcantarillado, canales de drenaje, y “especialmente, en la construcción y/o rehabilitación de pozos de registro debido a su capacidad para soportar los gases de alcantarillado tóxicos, corrosivos y bacterias que se encuentran comúnmente en estos sistemas” (p.1).

También es común usar los geopolímeros como material para revestimientos ornamentales.

Además de los usos ya citados, Paviconj (2021) expone otros usos dados a los geopolímero en construcción:

- Drenajes exteriores e interiores de aguas pluviales.
- Zócalos.
- Protección antiderrames.
- Recubrimiento de estructuras en hormigón que pueden estar sometidas a agentes químicos agresivos, cómo ácidos. Esto es debido a su buen comportamiento ante los mismos.
- Protección de tuberías y depósitos que guardan químicos.
- Restaurar estructuras de hormigón armado que han sido dañadas.
- Pavimentación
- Reparación de fisuras y grietas.
- Como aislante.
- Suelos industriales y garajes. (p. 3).

5.3.5 Aplicación del cemento polimérico o geopoliméro.

La aplicación del cemento polimérico requiere seguir unos pasos básicos, a saber:

- Preparación de la superficie.
- La zona de concreto debe estar seca y sin material desprendible.
- Al tener lista la superficie, se aplica una primera capa, que será la que contribuirá con la adherencia del material polimérico a la superficie o elemento en reparación.
- La segunda capa que se aplica es la del mortero que permitirá nivelar el elemento o superficie y dar la pendiente que corresponda.

- Por último, se aplica la capa que sellará la superficie, tapando posibles poros.
- Al igual que con el concreto convencional, con el concreto polimérico deben respetarse las juntas de dilatación.

6. Estado del conocimiento

Para conocer lo que se viene haciendo en el campo de la investigación sobre el uso de polímeros en sustitución del concreto convencional, se presentan algunos antecedentes de relevancia.

Salirrosas (2020), realizó un estudio para conocer las aplicaciones de geopolímeros en la industria de la construcción. Realizó una caracterización que consistió en obtener la dosificación correcta para conseguir la mayor resistencia a la compresión, obteniendo una dosificación de $MS=1.00$, $Na_2O=8\%$, $w/b=0.26$ y curado a $80^{\circ}C$ durante 7 días, así obtuvo una resistencia a la compresión de 34.01 MPa. El investigador citado realizó un bloque de construcción usando un mortero de geopolímero ligero con base de puzolana natural y fibra natural, de esto obtuvo un bloque con una resistencia de 5.3 y 5.7 MPa a 7 y 28 días, respectivamente. Como complemento del estudio, realizó ensayos de durabilidad bajo ciertas condiciones, obteniendo un buen comportamiento de los bloques ante la acción del fuego, las altas temperaturas y agua. Concluye exponiendo que el estudio realizado deja demostrada factibilidad de emplear los geopolímeros en la construcción.

Contrastando con el trabajo de Salirrosas *op cit*, está el de López (2015), quien evaluó materiales poliméricos hechos con diversos agregados, así como con residuos tanto industriales como agroindustriales. Realizó ensayos de laboratorio con dos matrices, “una de metacaolín y

cascarillas de arroz mediante el método de sol-gel y, la otra, de cenizas volantes con el mismo método” (López, 2015: p. 1). Como resultados encontró que:

Los geopolímeros ensayados con cenizas volantes sin tratamiento térmico presentaron valores cercanos de resistencia a la compresión (en un 70%) a los morteros elaborados con cemento Portland tipo I, a tan solo 14 días después de la preparación. La evaluación de resistencia a la flexión mostró que los materiales presentan valores bajos, pero usualmente no hay punto de falla, sino que los materiales son elásticos, presentan flexión e incluso recuperación de la forma. (López, 2015: p. 1).

Como se evidencia con la investigación de López *op cit*, los geopolimeros ensayados en laboratorio reportan una resistencia casi equiparable a la del concreto convencional. La resistencia del concreto polimérico se obtiene al combinar o mezclar agregados secos como granito, sílice o piedra caliza entre otros, más una resina sintética y el catalizador, se obtiene “una matriz que reforzada o no con fibra de vidrio, adquiere excelente resistencia a la flexión, tensión, compresión (de 840 hasta 1,100 Kg/cm²), además de la excelente resistencia química proporcionada por la resina” (Fibraplus (2019: p. 1).

Otro estudio de interés es el de Lizán *et al* (s.f), quienes utilizaron residuos en hormigones geopoliméricos para uso en bloques de bajo coste económico y medioambiental, siendo el objetivo principal, preparar “hormigones geopoliméricos para elaborar bloques de bajo coste económico y medioambiental, a partir de catalizador de craqueo catalítico usado (FCC) como precursor, y mezclas de ceniza de cáscara de arroz (CCA) e hidróxido sódico como activador alcalino” (p 1).

Los resultados del estudio indican que las pruebas preliminares para bloques con una relación árido/conglomerante de 6,66 y con distintas relaciones agua/conglomerante, demuestra que la dosificación óptima, debido a su adherencia media y trabajabilidad baja, era la B4-H25, con una relación agua/conglomerante de 0,615. La resistencia a compresión media a los 28 días de curado fue de 20,4 MPa. El costo medioambiental que suponen estos bloques geopoliméricos sería menor al de los bloques convencionales, pero el costo económico es mayor debido al gasto energético requerido para lograr la reacción química entre la CCA y el hidróxido sódico, y también por el precio del hidróxido sódico.

Mo, Zhang y Deng (2016) mediante ensayos, encontraron que, en dos muestras con dosificaciones distintas, (una con escoria de acero y otra con escoria de acero más cemento portland, ambas curadas con carbonatación de CO₂) podían obtener elementos con alta resistencia en un lapso de 14 días, aproximadamente 72 MPa.

Destaca igualmente, el estudio de Zhan, Poon y Shi (2016) quienes al utilizar agregados reciclados de concreto, obtuvieron buenos resultados pues manifiestan que los agregados reciclados pueden reaccionar también con el CO₂ que se está incluyendo en la mezcla. Los antecedentes expuestos son de referencia para este trabajo pues demuestran cómo actúa un geopolímero con diversas dosificaciones y la resistencia que el mismo puede obtener.

7. Metodología

Para dar respuesta a los objetivos de la investigación, se realizará una investigación documental, de tipo cualitativa, mediante la cual se busca conocer las características de los geopolímeros al tiempo que se identifica cuáles son las características que hacen que este material

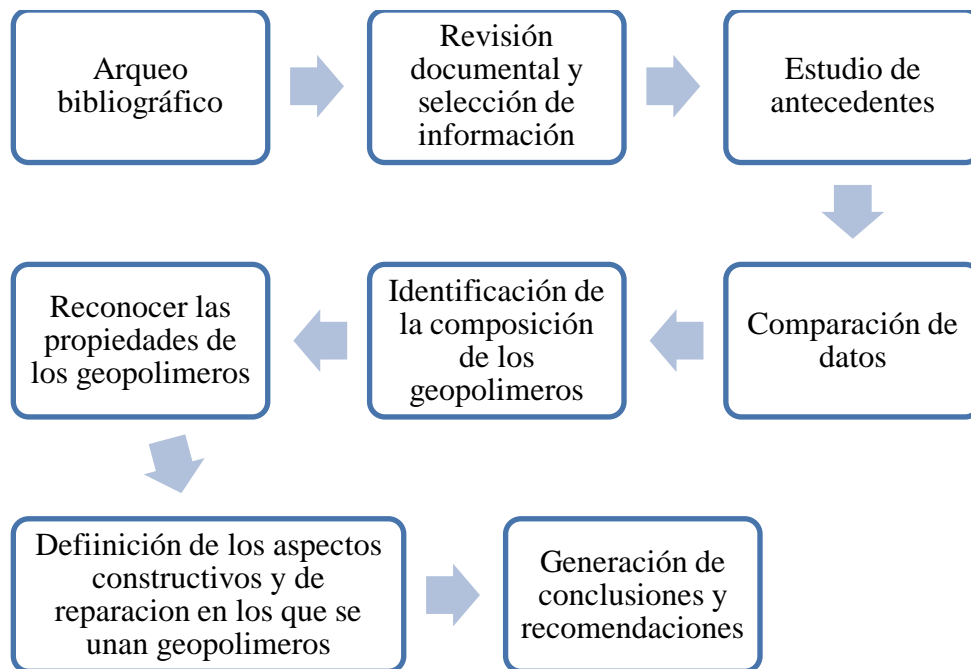
pueda sustituir al concreto convencional en la construcción y reparación de partes y componentes de concreto en edificaciones.

En este sentido, el trabajo se desarrollará en función de las siguientes fases:

1. Recolección y uso de documentos existentes para analizar los datos y resultados de estudios y ensayos con geopolímeros.
2. Los resultados serán producto de un proceso de análisis, síntesis y deducción de la información recabada para dar respuesta a los objetivos de la investigación.

7.1 Esquema metodológico

Figura 5. Marco metodológico de la investigación



Fuente: Elaboración propia (2022).

Conclusiones

De la investigación documental dirigida a conocer las propiedades y usos de los geopolímeros, se pueden exponer las siguientes conclusiones:

- Como se puede extraer de la investigación documental, el concreto polimérico, hormigón polímero o geopolímero, es un material que se obtiene mezclando los componentes como agregados, resinas, minerales naturales, desechos industriales, arcillas calcinadas y soluciones como hidróxido de sodio y silicato de sodio o potasio, lo cual le confiere propiedades de resistencia que han sido documentadas por López (2015), Mo, Zhang y Deng (2016) y FibraPlus (2019).
- Los geopolímeros se instituyen como material viable tanto para la fabricación tanto de componentes constructivos y estructurales, como para la reparación de partes de concreto o mortero que presenten patologías tales como fisuras, agrietamientos, desprendimientos y desgastes en general.
- Por ser un material versátil, durable, resistente a fenómenos naturales y químicos, puede usarse en exteriores e interiores en forma de bloques, tubos, revestimiento, suelos industriales, pavimento de alto y bajo tránsito, entre otros.
- El cemento polimérico se caracteriza por ser un material que ofrece fuerza a la compresión y la flexión; resistencia a la abrasión; resistencia a productos químicos; impermeabilidad y resistencia a los cambios de temperatura, por eso su uso frecuente en pavimentos de puentes, reparación de estructuras, fabricación de tuberías para aguas residuales. paneles decorativos para fachadas y revestimiento de suelo y paredes en diversidad de industrias.

- En el desarrollo de la investigación se presentó como limitante la escasa documentación para el sustento conceptual del trabajo; sin embargo, hay diversidad de investigaciones que demuestran las ventajas del uso de geopolímeros en la construcción y reparación de partes y componentes en edificios.
- A pesar que el geopolímero no es un material nuevo, es poca la difusión que hay de su uso, a pesar de la diversidad de investigaciones que lo validan como material eficiente para sustituir al cemento portland.
- No se pudo encontrar información veraz que permitiera establecer los posibles costos de usar geopolímeros, más allá de referencias como las de GeologiaWeb que afirma que su uso es más costoso que el del concreto convencional.
- Es necesario que se auspicien más investigaciones en cuanto al uso de los geopolimeros en la construcción y reparación de partes y componentes de concreto y mortero en las edificaciones, pues dada la versatilidad del material y su condición de material sostenible, es necesario que su costo sea accesible.
- Deben ampliarse las investigaciones y ensayos de laboratorio que permitan determinar si los geopolímeros, más allá de su uso como material para aislamiento y reparación de estructuras de concreto, puedan utilizarse para la fabricación de estructuras. Este tema tiene una investigación incipiente y a lo largo de este estudio no se encontró ningún antecedente que demostrara que dicho material se ha usado para la construcción de sistemas estructurales en sustitución del concreto tradicional.
- La sostenibilidad de los geopolimeros viene dada porque entre sus componentes se pueden usar residuos de la industria y a agroindustria, y porque su fabricación no emite la cantidad de CO₂ que emite la fabricación de cemento.

- Colombia es un país en el que se encuentran obras arquitectónicas que son icónicas del neobrutalismo, muchas de ellas del reconocido Arquitecto Rogelio Salmona, por ejemplo, en Bogotá se encuentran: Las Torres del Parque, (obra premio nacional de arquitectura); Museo de Arte Moderno; Edificio de Postrado de la Universidad Nacional; Biblioteca Virgilio Barco y Centro Cultural Gabriel García Márquez. En Medellín destacan el Edificio de la Facultad de Arquitectura, las Bibliotecas EPM y la San Javier, por citar algunas, son obras en las que los materiales brutalistas como el ladrillo y el concreto son los protagonistas.
- El geocemento también puede ser un material para mantenimiento y reparación de los espacios públicos colombianos en los que el concreto es un material predominante, particularmente en calzadas, suelos, muros, escaleras, rampas, mobiliario y monumentos, entre otros, citando como ejemplos: la plaza de Bolívar en Bogotá; el Paseo de Bolívar en Barranquilla; Parque de Los Pies Descalzos en Medellín; Parque Águeda Gallardo en Pamplona; Eje Ambiental de Bogotá; Parque del Agua en Bucaramanga, entre muchos otros.

Referencias bibliográficas

- Aguado y Salla, 1987). *Los Hormigones con Polímeros en la Construcción: Propiedades y Aplicaciones*. Informes de la Construcción, Vol. 39 n.º 389, mayo/junio, https://www.researchgate.net/publication/274783650_Los_hormigones_con_polimeros_en_la_construccion_propiedades_y_aplicaciones/fulltext/5aca5e13aca272abdc62508a/Los-hormigones-con-polimeros-en-la-construccion-propiedades-y-aplicaciones.pdf
- Burciaga, O. Escalante, J. y Magallanes, R. (2005). *Resistencia a la compresión y evolución microestructural de geopolímeros base metacaolín expuestos a alta temperatura*. Revista Digital ALCONPAT. Vol 5. N° 1. Revista on line recuperada de https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-68352015000100006#:~:text=Los%20geopol%C3%ADmeros%20son%20pol%C3%ADmeros%20inorg%C3%A1nicos,de%20soluciones%20con%20pH%20elevado.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística (2022). *Estadística de Concreto Premezclado*. [https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/construccion/estadisticas-de-concreto-premezclado#:~:text=En%20julio%20de%202022%2C%20la,metros%20c%C3%BAbicos%20\(Anexo%201\).](https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/construccion/estadisticas-de-concreto-premezclado#:~:text=En%20julio%20de%202022%2C%20la,metros%20c%C3%BAbicos%20(Anexo%201).)
- Díaz, S. (2018). *Desarrollo de un Procedimiento para la elaboración de Geopolímeros Optimizado*. Proyecto de grado en la modalidad de Proyecto de investigación para optar al Título de Ingeniero Civil. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. FACULTAD DE Ingeniería, Escuela de Ingeniería Civil, Tunja. https://repositorio.uptc.edu.co/bitstream/001/2557/1/TGT_1152.pdf

D. Van Gemert, E. Knapen, (2017). *Geopolimers*. Universidad Católica de Lovaina La Vieja.

<https://bwk.kuleuven.be/mat/publications/internationalconference/2006-vangemertcementconcrete-bauchemie.pdf>.

Fibraplus (2019). *Concreto Polimérico*. <http://fibraplus.com/concreto-polimerico/>

Geopolymers solutions (2022). *Hormigón geopolímero*. <https://www.geopolymertech.com/es/>

Greenroofs (2022). *Global Change Institute*. [Greenroofs.com](https://www.greenroofs.com)

Giraldo, S. (2015). *Concreto Polimérico elaborado con Cargas Cerámicas Recicladas*. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Civil. Escuela de Ingeniería de Antioquia.

https://repository.eia.edu.co/bitstream/handle/11190/2055/GiraldoSebastian_2015_ElaboracionConcretoPolimerico.pdf;jsessionid=510D15D3D078ED050A26568637B2F827?sequence=1

González, C., Montaña, A. y Castro, D. (2012). *Se pueden fabricar pastas, morteros y concretos de geopolímeros*. El Hombre y la Máquina. No 38. 59-65.

Jiménez, K. Otero, R. y Uzuriaga, W. (s.f). *Aprovechamiento Sostenible de residuos poliméricos como agregados del concreto*. https://www.interciencia.net/wp-content/uploads/2021/07/01_6813_A_Fuentes_v46n6_8.pdf

Lavelle P. y León, J. (2018). *Ingeniería Ambiental. Manejo de ecosistemas, concepción de políticas públicas y reciclaje de materiales*. Palmira, Colombia: Facultad de Ingeniería y Administración Universidad Nacional de Colombia.

León, J. (2018). *Ingeniería Ambiental*. Palmira, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.

Lizán et al (s.f). *Utilización de residuos en hormigones geopoliméricos para uso en bloques de bajo coste económico y medioambiental*. Documento en línea recuperado de https://www.uhu.es/IICIED/pdf/13_7_hormig.pdf

- López, S. (2019). *Caracterización física de un hormigón Geopolimérico curado por CO₂*. Trabajo de grado para optar al título de Ingeniera Civil. Universidad EIA Ingeniería Civil, Envigado.
- López, C. (2015). *Residuos Agroindustriales e Industriales para la conformación de compuestos empleados como Materiales de Construcción*. Tesis para obtener el Grado Académico de Maestro en Ciencia y Tecnología en la Especialidad de Ingeniería Ambiental. Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica, S.C. Santiago de Querétaro, Qro., México.
- Marín, A. (2017). *Análisis de proyectos de construcción*. Barcelona, España: ELEARNING.
- Martínez, G. Cruz, E. y López M. (2012). *Concreto polimérico reforzado con fibras: Efecto de la radicación Gamma*. Revista Iberoamericana de Polímeros Volumen 13(4), septiembre 2012 13(4), 169-178
- Mena, J. (2018). *Desarrollo de geopolímeros porosos a partir de ceniza volante y paval*. Trabajo Fin de Grado en Ingeniería Química. Departamento de Ingeniería Química y Ambiental Escuela Técnica Superior de Ingeniería Universidad de Sevilla.
- Meng (2021). *Aditivo polimérico en hormigón. Hormigón cemento-polímero, hormigón polímero, hormigón polímeros. Aplicaciones, producción y venta*. <https://m-eng.ru/es/sewer-pipe/polimer-dobavka-v-beton-cementno-polimernyi-beton.html>
- Mo, L., Zhang, F., & Deng, M. (2016). *Mechanical performance and microstructure of the calcium carbonate binders produced by carbonating steel slag paste under CO₂ curing*. Cement and Concrete Research, 88, 217–226.

Proyectos y Servicios a la Industria y Construcción (22 de enero de 2021). *Concreto de alta resistencia: características y usos en contextos industriales.*

<https://psiconcreto.com/english/concreto-de-alta-resistencia/>

QumiNet (2013). *Los usos y aplicaciones más comunes del concreto polimérico.*

<https://www.quiminet.com/articulos/los-usos-y-aplicaciones-mas-comunes-del-concreto-polimerico-3444810.htm>

Brigolini, G. J. (02 de mayo de 2016). *Geopolímeros na construção: aglomerantes sustentáveis.*

RECICLOS. <https://blogreciclos.wordpress.com/2016/05/02/geopolimeros-aplicados-na-construcao-civil/>

Salirrosas, J. (2020). *Geopolímeros en la Industria de la Construcción: Aplicaciones con ceniza volante y puzolana natural.* Tesis para optar el Título de Ingeniero Civil. Lima, Perú.

Pontificia Universidad Católica del Perú. Facultad De Ciencias e Ingeniería.

Sánchez, D. (2001). *Tecnología del Concreto y el Mortero.* 5ta Ed. Bogotá, Colombia: Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de Ingeniería.

Suksiripattanapong, C., Horpibulsuk, S., Chanprasert, P., Sukmak, P., & Arulrajah, A. (2015).

Compressive strength development in fly ash geopolymer masonry units manufactured from water treatment sludge. Construction and Building Materials, 82, 20–30.

UMACON (2017). *Causas y Soluciones para las grietas en el cemento.*

<http://www.umacon.com/noticia.php/es/causas-y-soluciones-para-grietas-cemento/441>

Van Gemert, D., Beeldens, A., Knapen, E., (2011). *Geopolimers*

<https://bwk.kuleuven.be/mat/publications/internationalconference/2004-vangemertcontribution-rilem.pdf>.

Zhan, B. J., Poon, C. S., & Shi, C. J. (2016). *Materials characteristics affecting CO₂ curing of concrete blocks containing recycled aggregates*. *Cement and Concrete Composites*, 67, 50–59.