



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura
Tecnologías

**DESARROLLO DE PANELES ARQUITECTÓNICOS PARA MUROS CON
IMPACTO ENERGÉTICO BAJO: SÍNTESIS DE MATERIAL COMPUESTO DE
GEOPOLÍMERO Y AGREGADOS MINERALES**

TESIS

Que para optar por el grado de
MAESTRA EN ARQUITECTURA

Presenta:

ANA PATRICIA GONZÁLEZ QUIÑONEZ

Comité tutor:

M. en Arq. Ernesto Ocampo Ruiz
Facultad de Arquitectura

Dra. María de Lourdes Chávez García
Facultad de Química

Dra. Maribel Jaimes Torres
Facultad de Arquitectura



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



INSTITUTO
DE INVESTIGACIONES
HISTÓRICAS



AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional Autónoma de México y al Programa de Maestría y Doctorado en Arquitectura.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por la beca otorgada a través del Programa Nacional de Posgrados de Calidad.

Al proyecto del Programa de Apoyo a la Investigación y el Posgrado (PAIP) 5000-9038 de la Facultad de Química de la UNAM.

Al Programa de Apoyo a los Estudios de Posgrado (PAEP), por el apoyo recibido.

A la Dra. María de Lourdes Chávez García, por la asesoría y apoyo brindados para realizar la etapa experimental de este trabajo de investigación en el Laboratorio de Cerámica de la Facultad de Química de la UNAM.

Al M. en Arq. Ernesto Ocampo Ruiz, por su motivación desde el inicio del proyecto.

A los miembros del jurado: M. en Arq. Ernesto Ocampo Ruiz, Dra. María de Lourdes Chávez García, Dra. Maribel Jaimes Torres, Dr. Hermilo Salas Espíndola y Dra. Tania Ariadna Mejía García, por sus valiosas aportaciones durante la revisión del trabajo.

A la Unidad de Servicios de Apoyo a la Investigación y la Industria (USAI). A la Q. Marisela Gutiérrez Franco de Espectroscopía de absorción infrarroja y a la M. en C. Cecilia Salcedo Luna, de Difracción de rayos X en polvos.

A Alberto Huerta Delfino del Laboratorio 12 de la Facultad de Química de la UNAM, por su apoyo para la caracterización por espectroscopía de absorción infrarroja.

A la Dra. Ilse García Villalobos y al Laboratorio de Conservación del Patrimonio Natural y Cultural, por su apoyo en la prueba de intemperismo acelerado.

Al I.Q. Héctor Méndez por la donación de la perlita de Filprosa, S.A. de C.V., utilizada como agregado en esta investigación.

A mis compañeros del Laboratorio de Cerámica: Belén, Stefany y Ada, por su disposición a enseñarme a trabajar en el laboratorio. Y en especial a Yang, por compartir su conocimiento sobre el tema de investigación.

A mis compañeros del Posgrado, por compartir el estrés y los momentos agradables fuera del salón de clases.

A mis amigas de toda la vida: Paty, Bety, Gaby y Zuci. Gracias por estar en los momentos buenos y malos.

A mi mamá. Gracias por todo tu apoyo, siempre te voy a admirar.

A mi papá. Aunque no estás físicamente, siempre estás presente.

CONTENIDO

Resumen	XI
Abstract	XV
Introducción	1
Objetivos del proyecto	
Hipótesis del proyecto	
Capítulo 1. Impacto ambiental y energético de los materiales cerámicos de construcción	9
1.1. Prácticas habituales en la industria de los materiales cerámicos de construcción	
1.2. Modelos económicos presentes y futuros	
1.2.1. Modelo de economía lineal	
1.2.2. Modelo de economía circular	
1.2.3. Ecoeficiencia	
1.3. Cambio climático	
1.4. Desarrollo sostenible	
1.5. Impacto ambiental de los materiales cerámicos de construcción	
1.5.1. Cemento Portland	
1.5.1.1. Concretos ligeros	
1.5.1.2. Impactos ambientales asociados al cemento Portland	
1.6. Alternativas al cemento Portland	
Capítulo 2. Cementos activados alcalinamente	23
2.1. Qué son los cementos activados alcalinamente	
2.2. Clasificación de los cementos activados alcalinamente	
2.2.1. Cementos activados alcalinamente con contenido alto de calcio	
2.2.2. Cementos activados alcalinamente con contenido bajo de calcio	
2.3. Factores que influyen en la producción de geopolímeros	
2.3.1. Factores que influyen durante la síntesis	
2.3.2. Factores que influyen durante el curado	
2.4. Materiales compuestos con matriz de geopolímero	
2.5. Diseño de experimentos	
2.5.1. Diseño de experimentos factorial	

- 2.5.2. Diseño de experimentos en la síntesis de geopolímeros
- 2.6. Material compuesto de geopolímero y agregados minerales
 - 2.6.1. Materias primas
 - 2.6.1.1. Caolín
 - 2.6.1.2. Metacaolín
 - 2.6.1.3. Hidróxido de sodio
 - 2.6.1.4. Mica
 - 2.6.1.5. Perlita
- 2.7. Ventajas de los geopolímeros sobre el cemento Portland y definición del material compuesto GP/agregados

Capítulo 3. Desarrollo experimental

39

- 3.1. Etapas del desarrollo experimental
- 3.2. Reactivos y caracterización
 - 3.2.1. Reactivos
 - 3.2.1.1. Metacaolín
 - 3.2.1.2. Hidróxido de sodio
 - 3.2.1.3. Perlita
 - 3.2.1.4. Mica
 - 3.2.2. Técnicas de caracterización
 - 3.2.2.1. Difracción de rayos X en polvos
 - 3.2.2.2. Fluorescencia de rayos X
 - 3.2.2.3. Espectroscopía de absorción infrarroja
 - 3.2.2.4. Ensayo de resistencia a la compresión
 - 3.2.2.5. Intemperismo acelerado
- 3.3. Experimentos preliminares
- 3.4. Síntesis de material compuesto y caracterización
- 3.5. Diseño de experimento
- 3.6. Análisis estadístico
- 3.7. Resumen del desarrollo experimental

Capítulo 4. Resultados y discusión de la etapa experimental

51

- 4.1. Contenido del capítulo
- 4.2. Caracterización del material precursor
 - 4.2.1. Fluorescencia de rayos X del material precursor
 - 4.2.2. Difracción de rayos X en polvos del material precursor
 - 4.2.3. Espectroscopía de absorción infrarroja del material precursor

- 4.3. Definición del experimento definitivo
- 4.4. Resistencia a la compresión
- 4.5. Intemperismo acelerado
- 4.6. Análisis estadístico
 - 4.6.1. Análisis de la varianza ANOVA
 - 4.6.2. Análisis de los efectos estandarizados (Gráfico de Pareto)
- 4.7. Caracterización de los materiales compuestos
 - 4.7.1. Material compuesto GP/mica
 - 4.7.1.1. Difracción de rayos X en polvos de GP/mica
 - 4.7.1.2. Espectroscopía de absorción infrarroja de GP/mica
 - 4.7.2. Material compuesto GP/perlita
 - 4.7.2.1. Difracción de rayos X en polvos de GP/perlita
 - 4.7.2.2. Espectroscopía de absorción infrarroja de GP/perlita
- 4.8. Conclusiones de la etapa experimental

Capítulo 5. Propuesta de panel arquitectónico prefabricado para muros **73**

- 5.1. Panel arquitectónico prefabricado para muros
- 5.2. Metodología TRL
- 5.3. Condiciones químicas y físicas del material compuesto
 - 5.3.1. Formación de zeolitas
 - 5.3.2. Carbonatación
 - 5.3.3. Burbujas de aire
- 5.4. Pruebas adicionales
- 5.5. Diseño del panel y propuesta de aplicación
- 5.6. Comentarios finales sobre la propuesta del elemento constructivo

Capítulo 6. Conclusiones del proyecto **85**

Normas aplicadas	91
Glosario	93
Índice de abreviaturas	95
Índice de figuras	99
Índice de tablas	101
Anexo 1. Experimentos preliminares	103
Referencias	115

RESUMEN

El propósito de este trabajo de investigación fue estudiar un material compuesto con matriz de geopolímero (GP) de metacaolín (MK) activado con hidróxido de sodio (NaOH), y dos agregados minerales por separado: la mica y la perlita; para proponer su aplicación como paneles arquitectónicos prefabricados para muros, ya que dichos elementos constructivos convencionalmente se fabrican de un material compuesto con matriz de cemento Portland (CP), el cual requiere una temperatura de producción de aproximadamente 1450 °C, mientras que los GPs se sintetizan a temperatura ambiente y se consolidan a menos de 100 °C. Para ello, fue necesaria la participación de investigadores del área de la química y la arquitectura, por lo que el trabajo fue transdisciplinario.

Este documento es el reporte final de la investigación y desarrollo + diseño (I&D+D), realizada durante dos años para la obtención del grado de Maestría en Arquitectura, en el Campo de Conocimiento de Tecnologías, del Programa de Maestría y Doctorado de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). La metodología de investigación y la planeación del proyecto fueron diseñadas durante los talleres de investigación tecnológica del campo de conocimiento, así como con el apoyo y la asesoría de los miembros del comité tutorial, con los que se formó y estructuró el reporte.

El primer capítulo define los conceptos de cambio climático, desarrollo sostenible y ecoeficiencia; y continúa con la mención de los tratados internacionales implementados con el objetivo de disminuir los impactos ambientales generados por las actividades antropogénicas. Se incluye una revisión detallada de los impactos ambientales asociados a todas las etapas del ciclo de vida de los materiales cerámicos de construcción, con énfasis en el CP.

El segundo capítulo introduce a los cementos activados alcalinamente, y su clasificación según su composición

química. Se incluye una explicación de los diferentes factores que tienen influencia sobre las propiedades de estos materiales, y se presentan ejemplos de materiales compuestos con matriz de GP encontrados en la bibliografía consultada. Se decidió investigar un material compuesto nuevo para la industria de la construcción, el cual tiene una matriz aglutinante de GP. Durante el proceso, se probaron dos variantes del material compuesto, cambiando sus agregados aglutinados dentro de la matriz. Uno con agregado de mica (GP/mica), y otro con perlita (GP/perlita), ambos de origen mineral.

El diseño experimental empleado para verificar la viabilidad de la aplicación de los materiales GP/mica y GP/perlita como paneles arquitectónicos prefabricados se presenta en el capítulo tres. El experimento se llevó a cabo en el Laboratorio de Cerámica de la Facultad de Química de la UNAM. La síntesis y consolidación de GP depende de un amplio intervalo de factores o parámetros, por lo que no es posible investigarlos todos en un solo estudio. Por lo tanto, se diseñó un experimento de tipo factorial, en el que se estableció a la resistencia a la compresión de los materiales como el factor de respuesta de interés. Se estudiaron como factores el contenido de agregado, la temperatura y el porcentaje de humedad relativa de curado. Se evaluaron dos tipos de agregado: la mica y la perlita, los cuales en el diseño se representaron como bloques. Esto permitió identificar las condiciones necesarias para obtener un material con resistencia a la compresión adecuada para su aplicación como paneles arquitectónicos prefabricados para muros.

El capítulo cuatro se ocupa de describir los resultados obtenidos. Previo a la síntesis de las corridas experimentales establecidas por el diseño de experimento, los materiales precursores caolín y MK se caracterizaron por las técnicas de fluorescencia de rayos X (FRX), difracción de rayos X

en polvos (DRX) y espectroscopía de absorción infrarroja (FTIR). Se sintetizaron probetas cilíndricas de los materiales compuestos GP/mica y GP/perlita, las cuales se sometieron al ensayo de resistencia a la compresión, con base en la norma de la Sociedad Americana para pruebas y materiales (ASTM, por sus siglas en inglés, American Society for Testing and Materials) ASTM C39 (ASTM, 2018c), y los fragmentos resultantes se caracterizaron por DRX y FTIR. Los resultados de resistencia a la compresión se analizaron para determinar el significado estadístico de cada uno de los valores estudiados. Ambos materiales compuestos se sometieron a intemperismo acelerado para observar su comportamiento ante la humedad y la radiación ultravioleta (UV).

El capítulo cinco se dedicó a la propuesta del diseño del prototipo del panel para muros no estructurales de los materiales compuestos con matriz de GP y agregados minerales (GP/agregados), siguiendo la metodología de niveles de madurez de la tecnología (TRL, por sus siglas en inglés: Technology Readiness Level). En él se describieron las características a mejorar de los materiales compuestos, basado en los resultados de las etapas de experimentación y caracterización. Se establecieron las características físicas del panel para su funcionamiento adecuado como elemento constructivo, y las pruebas adicionales necesarias para confirmar que el material es adecuado para su aplicación como panel arquitectónico para muros no estructurales.

Por último, en el capítulo seis se presentan las conclusiones de la investigación y las perspectivas relacionado con este trabajo.

XIV Desarrollo de paneles arquitectónicos para muros no estructurales con consumo de energía bajo: Síntesis de material compuesto de geopolímero y agregado mineral

ABSTRACT

The purpose of this research work was to study a composite material with a geopolymer matrix of metakaolin activated with sodium hydroxide, and two mineral aggregates separately: mica and perlite; to propose its application as architectural wall panels, because these construction elements are conventionally manufactured with a composite material with Portland cement matrix, which requires a production temperature of 1450 °C, while the geopolymers synthesized at ambient temperature and consolidated at less than 100 °C. For it, the participation of researchers from the areas of chemistry and architecture was necessary, so the work was transdisciplinary.

This document is the final report of the investigation and development + design, made for two years to obtain the master's degree in Architecture, in the Technologies' field of knowledge, from the Master's and Doctoral Program in Architecture of the Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). The investigation's methodology and the planning of the project was designed during the technology research workshops of the field of knowledge, as well as with the support and advisory of the members of the tutor committee, with which the report was formed and structured.

The first chapter defines the concepts of climate change, sustainable development and ecoefficiency; and it continues with the mention of the international deals implemented with the aim of decrease the environmental impacts generated by the anthropogenic activities. It is included a detailed review of the environmental impacts associated with all the steps of the life cycle of the ceramic construction materials, with emphasis in the Portland cement.

The second chapter introduce the alkali activated cements, and its classification according to its chemical composition. It is included and explanation of the different factors that have influence on the properties of this materials

and it presents examples of composite materials with geopolymer matrix, found in the bibliography consulted. It was decided to investigate a composite material, which has a binder matrix. During the process, two variables of the composite material were tested, changing its aggregates inside the matrix. One with mica aggregate, and other with perlite, both of mineral origin.

The experimental design employed to verify the feasibility of the application of the composite materials as prefabricated architectonic wall panels is presented in the third chapter. The experiment was carried out in the Ceramic's Laboratory of the Facultad de Química at UNAM. The synthesis and consolidation of geopolymers depends on a wide range of factors, so it is not possible to investigate them all in a single study. Thus, a factorial experiment was designed, in which the compressive strength was established as the response factor of interest. The amount of aggregate, the temperature and the relative humidity percentage were studied as factors. Two aggregates were evaluated: the mica and the perlite. This allowed to identify the necessary conditions to obtain a material with a compressive strength suitable for its application as prefabricated architectonic wall panels.

The fourth chapter deals with describing the results obtained. Prior the synthesis of the established experimental runs by the experimental design, the precursor materials kaolin and metakaolin were characterized by the X-ray fluorescence, X-ray powder diffraction and Fourier transform infrared spectroscopy. Cylindrical specimens were synthesized, which were subjected to the compressive strength test, based on the ASTM C39 standard, and the remaining fragments were characterized by X-ray powder diffraction and Fourier transform infrared spectroscopy. The compressive strength results were analyzed to determine the statistical meaning of

each of the studied factors. Both composite materials were subjected to an accelerated weathering test to observe its behavior in humidity and ultraviolet radiation.

Chapter five is dedicated to the design proposal of the non-structural wall panel prototype of the composite material with geopolymer matrix and mineral aggregates, following the method of technology readiness level. It describes the characteristics to improve the composite materials, based on the experimental results. The physical characteristics of the panel were established for its good performance as construction element, and the additional tests necessary to confirm that the material is adequate for its application as non-structural wall panel.

Finally, chapter six presents the investigation conclusions and the prospective related with this work.

INTRODUCCIÓN

A nivel global, el 40 % de las emisiones de Gases Efecto Invernadero (GEI) y el consumo del 40 % de las materias primas, se asocian a la construcción y la operación de los edificios (Gursel, Masanet, Horvath, & Stadel, 2014). Todos los materiales y procesos tienen un ciclo de vida, el cual se compone de cinco etapas: 1) la extracción de materias primas, 2) la producción, 3) el transporte, 4) el uso y 5) la disposición (ISO, 2006); cada una de ellas genera impactos ambientales.

Los humanos necesitan protegerse de las condiciones ambientales, y los materiales cerámicos son los preferidos para ello. En la prehistoria, la arcilla se utilizó para construir edificaciones de tapial y adobe por sus propiedades plásticas (húmeda es moldeable y al secarse es firme), su abundancia y su facilidad de extracción (Carter & Norton, 2013). Actualmente, los cerámicos en construcción se aplican como materiales estructurales, de recubrimiento o como pavimentos interiores o exteriores. En el ciclo de vida de los materiales cerámicos de construcción, las etapas de extracción de materias primas y de producción, son las que generan los impactos ambientales más importantes. En el caso de la producción, se debe a que las reacciones químicas necesarias para fabricar materiales como ladrillos y losetas, se producen con temperatura mayor a 950 °C (Carter & Norton, 2013; Zabalza-Bribián, Valero-Capilla, & Aranda-Usón, 2011).

El cemento Portland (CP) es el material de construcción más utilizado. Debido al incremento de la población mundial, los patrones de urbanización y el desarrollo de infraestructura, se espera que la demanda del cemento, crezca entre 12 % y 23 % para 2050, en comparación con la demanda de 2014 (IEA & CSI, 2017). La industria del cemento es la responsable del 7 % en masa de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) (Güereca, Torres, & Juárez-López, 2015); de ellas, el 60 % se debe a la calcinación de la roca caliza, la cual

causa su disociación en óxido de calcio, el cual forma parte de las reacciones químicas responsables del desarrollo de resistencia a la compresión del cemento, y CO_2 , el cual se libera a la atmósfera; mientras que el 40 % restante se debe a la quema de combustibles fósiles durante la calcinación de las materias primas, a 1450°C (Güereca et al., 2015; Huntzinger & Eatmon, 2009).

Por la importancia del CP, en cuanto a tendencias de consumo y a los impactos ambientales asociados a su producción, se trabajó con materiales que lo sustituyen: los geopolímeros (GP). Estos se generan a partir de una reacción química entre un mineral aluminosilicato y una solución alcalina a temperatura ambiente y se consolidan a menos de 100°C . El científico Joseph Davidovits acuñó el término geopolímero en la década de 1970. Sin embargo, la producción de publicaciones científicas relacionadas con estos materiales creció a partir del inicio del siglo XXI, con un acumulado de más de 1000 artículos científicos relacionados con el tema (Pacheco-Torgal, Labrincha, Leonelli, Palomo, & Chindaprasirt, 2015). Compañías en países como Francia, Estados Unidos, India, entre otros, comercializan los GPs (Geopolymer Institute, 2019). En 2013, se construyó el edificio del Instituto del Cambio Global de la Universidad de Queensland, Australia con una estructura de GP (Arch Daily, 2013); mientras que, en 2014, se utilizó concreto de GP en la construcción de la pista de aterrizaje, el edificio terminal y las obras civiles del aeropuerto West Wallcamp en Brisbane, Australia (Glasby, Day, Genrich, & Aldred, 2015). A pesar de ello, para lograr posicionar a los GP como una alternativa del cemento, la investigación en laboratorio y la difusión de los resultados obtenidos es fundamental. Resulta importante estandarizar los valores para cada uno de los factores que influyen en el desarrollo de resistencia a la compresión de los GP, para predecirla en función de las condiciones de síntesis y curado. La investigación debe encaminarse al desarrollo

de normatividad para GP, ya que no es correcto juzgar sus propiedades con las normas establecidas para el cemento, como se ha hecho hasta ahora.

Este proyecto de investigación estudió un material compuesto de GP de metacaolín (MK) e hidróxido de sodio (NaOH), y agregados minerales de tipo mica y perlita, para proponer su aplicación como paneles arquitectónicos prefabricados para muros. Esto con el propósito de reducir la temperatura durante la producción de este tipo de elementos constructivos, ya que habitualmente se producen de un material compuesto con matriz de CP y agregados, como la arcilla expandida. En comparación, los GP se sintetizan a temperatura ambiente, y se consolidan a menos de 100 °C, mientras que el CP se produce por arriba de 1450 °C.

OBJETIVOS DEL PROYECTO

Objetivo general del proyecto

Desarrollar la metodología de síntesis de un material compuesto de geopolímero y agregados minerales, para proponer su aplicación como panel arquitectónico prefabricado para muros, con una resistencia a la compresión similar o mayor que los producidos con cemento Portland.

Objetivos particulares del proyecto

1. Identificar un material que requiera una temperatura de síntesis baja, en comparación con la temperatura de producción del cemento, mediante la construcción de un estado del arte.
2. Establecer las condiciones de síntesis y curado de los materiales compuestos de geopolímero y agregados minerales, para el desarrollo de una resistencia a la compresión similar o mayor que la de los paneles arquitectónicos de muros no estructurales, mediante un diseño de experimento 2^k.
3. Proponer las características y detalles de innovación y desarrollo + diseño, que los paneles de geopolímero y agregados minerales requieren para materializarse en un elemento constructivo eficaz para muros no estructurales, empleando el método de niveles de madurez de la tecnología.

HIPÓTESIS DEL PROYECTO

La resistencia a la compresión del material compuesto GP/agregados, será similar o mayor que la de los paneles de cemento Portland comerciales.

Capítulo 1

**IMPACTO AMBIENTAL
Y ENERGÉTICO DE LOS
MATERIALES CERÁMICOS
DE CONSTRUCCIÓN**

1.1. PRÁCTICAS HABITUALES EN LA INDUSTRIA DE LOS MATERIALES CERÁMICOS DE CONSTRUCCIÓN

El modelo de economía lineal tiene como consecuencia el abuso en la explotación de los recursos no renovables para satisfacer los patrones de consumo de las personas, lo cual afecta negativamente para las condiciones de habitabilidad de los seres vivos en la Tierra. Fenómenos como la extinción de especies animales, la presencia de desechos en zonas alejadas de los asentamientos humanos y los cambios climáticos en regiones específicas, han originado el desarrollo de estrategias que ayuden a preservar la vida en el planeta.

La industria de la construcción implica la producción de materiales de construcción, actividades de construcción, consumo de recursos para la operación y mantenimiento de los edificios, y generación de residuos sólidos de demolición, por lo que su consumo de recursos y generación de emisiones es enorme. Reducir todos los impactos ambientales asociados a la industria de la construcción requiere de la aplicación de estrategias múltiples, y no es viable resolverlas en un solo estudio. Este trabajo de investigación se centra en los materiales cerámicos de construcción, entre los que destaca el cemento Portland (CP), por ser el material de construcción más utilizado, y ser el responsable de la generación del 7 % de las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) a nivel mundial (IEA & CSI, 2017).

En este capítulo se comparan los modelos económicos lineal y circular y se define el concepto de ecoeficiencia; se describe qué es el cambio climático y sus consecuencias; se reseñan los acuerdos internacionales establecidos para reducir los impactos ambientales generados por las naciones; y, por último, se explican los impactos ambientales y energéticos asociados a los procesos de producción habituales de los materiales cerámicos de construcción, con énfasis en el CP.

1.2. MODELOS ECONÓMICOS PRESENTES Y FUTUROS

Los modelos económicos impactan en las tendencias de producción, consumo y desecho de productos, servicios y procesos. Desde la revolución industrial, el modelo adoptado de forma general es el de economía lineal, en el cual se da prioridad a la ganancia económica sobre la calidad, la conservación de los recursos naturales y la generación de residuos. Conforme el ser humano ha tomado consciencia de que el modelo actual es insostenible, ha resultado evidente la necesidad de cambiar a uno que procure fabricar productos con un tiempo de vida útil máximo y que aproveche los materiales que comúnmente se consideran como desechos.

1.2.1. Modelo de economía lineal

El modelo de economía lineal considera que los productos, servicios y procesos industriales tienen una vida lineal, que consta de tres etapas principales: la producción, el uso y el desecho, cuando éste resulta obsoleto o deja de funcionar (Stahel, 2016). El objetivo del modelo de economía lineal es generar ingresos constantes a las empresas, y para lograrlo, se vale de estrategias como la fabricación de productos de calidad baja o con obsolescencia programada, lo cual incita a los consumidores a adquirir productos nuevos cada determinado tiempo. Además, en este modelo, las empresas no se responsabilizan por lo que ocurre con sus productos al finalizar su vida útil, por lo que estos son desechados de manera no controlada.

Debido al aumento de la población mundial, y a que el planeta Tierra cuenta con recursos finitos, el modelo de economía lineal no es sostenible a largo plazo. Por ello, se ha propuesto el modelo de economía circular como alternativa.

1.2.2. Modelo de economía circular

El modelo de economía circular está inspirado en los procesos naturales, los cuales se comportan como ciclos. En este modelo, los productos, procesos o servicios, son diseñados con la posibilidad de ser reparados, actualizados

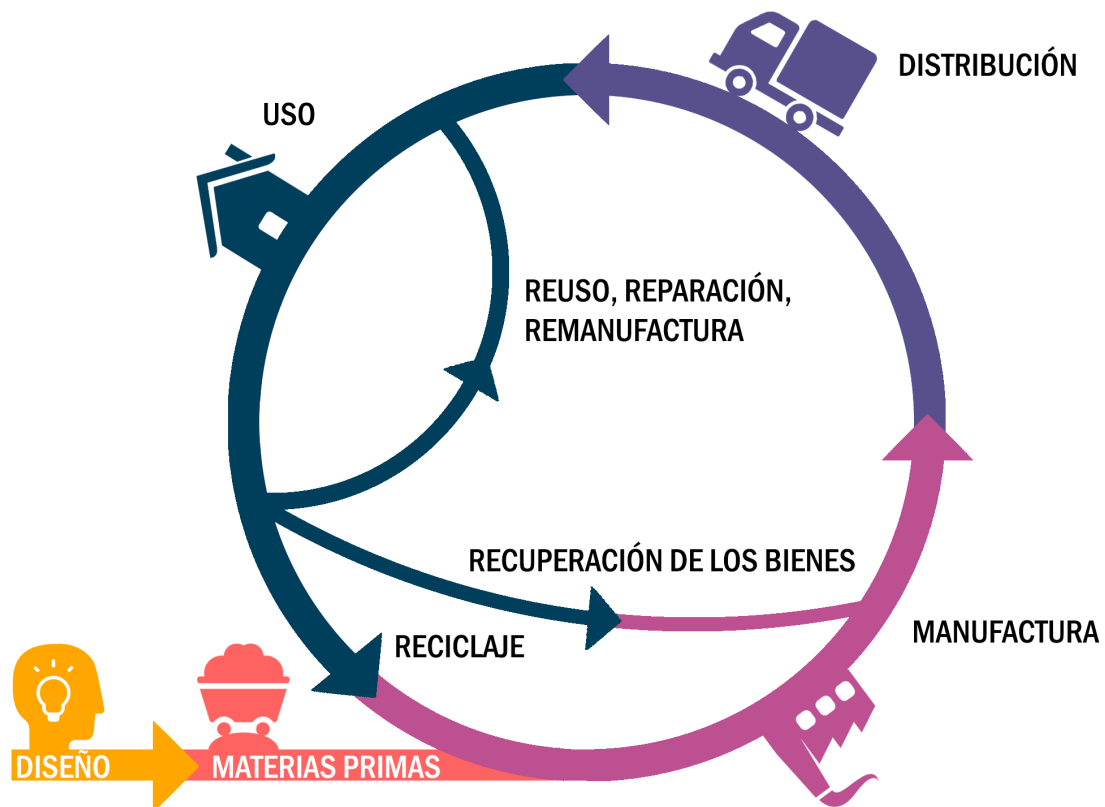


Figura 1. Modelo de economía circular.

Elaboración propia, adaptado de Bonciu, 2014 y Stahel, 2016.

o remanufacturados, con el objetivo de retrasar el fin de su vida útil, y cuando éste es alcanzado, se les emplea como materia prima para la fabricación de otros productos, procesos o servicios, **Figura 1** (Stahel, 2016). De esta manera, se generan una cantidad menor de desechos, y se previene la explotación de los recursos naturales.

Para las empresas, adoptar del modelo de economía circular tiene beneficios como la reducción de las emisiones asociadas a sus procesos, la disminución de gastos por disposición de desechos, porque su volumen se reduce, y la reducción de gastos por adquisición de materias primas, debido a que se aprovechan materiales considerados como desecho. Mientras que, para los consumidores, adquirir productos o servicios que siguen este modelo económico, garantiza su funcionamiento adecuado por un periodo largo de tiempo, disminuyendo gastos.

A pesar de las ventajas de la economía circular, predomina el modelo lineal. Para que el modelo de economía

circular sea exitoso, es necesaria la generación de legislación que favorezca la colaboración entre empresas de diferentes sectores, así como entre empresas y consumidores (Bonciu, 2014). El modelo de economía circular va de acuerdo con los objetivos del desarrollo sostenible y se relaciona con el concepto de ecoeficiencia.

1.2.3. Ecoeficiencia

El término ecoeficiencia fue introducido por el Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sostenible (WBCSD, por sus siglas en inglés, World Business Council for Sustainable Development); se trata de una herramienta para evaluar el desempeño de las organizaciones, tomando en cuenta dos aspectos: la prosperidad económica y el uso eficiente de los recursos (García-Besné et al., 2018).

La ecoeficiencia se evalúa como una relación entre costo e impacto ambiental; su función principal, es ser un apoyo en la toma de decisiones, y es aplicable a procesos industriales y productos de diferentes sectores. Los estudios de ecoeficiencia están normados por la norma ISO 14045, que a su vez se apoya de las normas ISO 14040 y 14044 de análisis de ciclo de vida (ACV), para evaluar el impacto ambiental (Gusmão-Caiado, de Freitas-Dias, Veiga-Mattos, Gonçalves-Quelhas, & Leal-Filho, 2017).

Para las organizaciones, aplicar la ecoeficiencia representa ventajas económicas y medioambientales, como la reducción de costos de suministros, de energía y de disposición de residuos; así como la mejora de su imagen corporativa (Kabongo & Boiral, 2017). El WBCSD definió que algunas maneras de mejorar la ecoeficiencia son: la reducción de consumo de materiales y energía, maximizar el uso sustentable de recursos renovables, y aumentar la durabilidad y reciclabilidad de los productos (Gusmão-Caiado et al., 2017).

1.3. CAMBIO CLIMÁTICO

Las emisiones de Gases Efecto Invernadero (GEI) han aumentado desde la era preindustrial, como resultado de las actividades antropogénicas (IPCC, 2018). Los GEI que se encuentran en proporción mayor en la atmósfera son: el vapor de agua (H_2O), el dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4), el óxido de nitrógeno (N_2O), y el ozono (O_3). Los rayos solares atraviesan la atmósfera terrestre, y al impactar con la superficie, una parte de ellos se refleja y regresa al espacio. Los GEI evitan que toda la radiación solar escape, y así conservar una temperatura adecuada para la vida. En promedio, la superficie terrestre registra $14\text{ }^{\circ}C$; de no ser por los GEI, la temperatura promedio sería de $-21\text{ }^{\circ}C$ (T. R. Anderson, Hawkins, & Jones, 2016). Al aumentar las concentraciones de estos gases, se genera el efecto invernadero; en el cual, una cantidad mayor de radiación solar permanece en la Tierra, lo cual provoca efectos como el aumento de la temperatura de la superficie terrestre, el calentamiento y acidificación de los océanos, el aumento de las precipitaciones, la pérdida de masa de los mantos de hielo, y la elevación del nivel medio del mar; afectando a los ecosistemas y al desarrollo de la vida humana.

El Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés, Intergovernmental Panel on Climate Change) expuso en su Informe Especial Calentamiento Global de $1.5\text{ }^{\circ}C$ (IPCC, 2018), la necesidad de estabilizar el incremento en la temperatura a menos de $1.5\text{ }^{\circ}C$ durante el siglo XXI, comparado con los niveles de la era preindustrial; para lograrlo, se requiere replantear de manera urgente las actividades antropogénicas habituales, mientras más tiempo se espere para tomar acciones, el costo y los desafíos tecnológicos, económicos, sociales e institucionales a enfrentar serán mayores. La temperatura ya aumentó $1\text{ }^{\circ}C$ desde la era preindustrial, y se prevé alcanzará $1.5\text{ }^{\circ}C$ entre 2030 y 2052, si se mantiene la tasa de aumento (IPCC, 2018).

Los efectos adversos provocados por el cambio climático han generado preocupación en la humanidad. Como resultado, desde los años 1970's, la Organización de las Naciones Unidas (ONU), ha realizado reuniones para analizar los problemas a los que la sociedad se enfrenta y se enfrentará en el futuro de no aplicar acciones efectivas para estabilizar el cambio climático global; así como, proponer soluciones. Para obtener los resultados deseados, es primordial el compromiso de todos los países, sobre todo de los desarrollados, ya que son los que generan la cantidad mayor de GEI, en comparación con los emergentes y subdesarrollados. A nivel global, la industria de la construcción genera el 40 % de las emisiones antropogénicas de GEI, y es responsable del consumo del 40 % de las materias primas (Gursel et al., 2014); estos datos hacen evidente la necesidad de un cambio en las técnicas empleadas tanto en la fabricación de los materiales de construcción, como en la construcción y la operación de los edificios.

1.4. DESARROLLO SOSTENIBLE

La Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Humano de Estocolmo, Suecia, en 1972, fue la primera donde se planteó la preocupación sobre la protección del medio ambiente a nivel mundial. Las cuestiones que se trataron durante la reunión fueron: el incremento descontrolado de la población mundial, la necesidad de una distribución equitativa de los recursos y la necesidad de cooperación internacional para resolver problemas ambientales. Como resultado, se creó la "Declaración de Estocolmo" y el "Plan de acción para el medio humano", donde se plantearon 109 recomendaciones sobre las actuaciones internacionales respecto al medio ambiente (ONU, 2019b).

En 1983, se creó la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo (CMMAD), para apoyar al Programa del Medio Ambiente de las Naciones Unidas (PNUMA). En

1987, una comisión especial de la CMMAD elaboró y publicó el informe “Nuestro Futuro Común”; en él se definió por primera vez el término “desarrollo sostenible” como, “aquel que satisface las necesidades de la generación actual sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades” (ONU, 2019b).

En 1985, se elaboró el Protocolo de Montreal, con el objetivo de combatir el deterioro de la capa de ozono causada por el uso de clorofluorocarbonos (CFC). La capa de ozono se encarga de absorber entre el 97 y 99 % de la radiación ultravioleta proveniente del Sol, la cual es potencialmente dañina para la vida en la Tierra. Debido a las acciones tomadas a partir del Protocolo de Montreal, la capa de ozono estará recuperada en el hemisferio norte en la década de 2030, en el hemisferio sur en 2050 y las regiones polares en 2060 (WMO, 2018). El Protocolo de Montreal ha sido ratificado por los 193 Estados miembros de la ONU, por lo que es el tratado medioambiental internacional más exitoso.

La Cumbre de la Tierra, realizada en Río de Janeiro en 1992, tuvo como resultado principal la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), la cual ha sido ratificada por 197 países. Su objetivo es impedir una interferencia antropogénica peligrosa en el sistema climático, mediante la estabilización de los GEI en la atmósfera, en un plazo que permita la adaptación natural de los ecosistemas al cambio climático (ONU, 2019b).

Desde 1995, los países que han ratificado la CMNUCC se reúnen anualmente en las Conferencias de las Partes, para lograr acuerdos que permitan la estabilización de las concentraciones de GEI en la atmósfera y poner en marcha estrategias conjuntas para enfrentarse al cambio climático. Durante la Conferencia de las Partes de 1997, se adoptó el Protocolo de Kioto, el cual entró en vigor en 2005. Fue el primer tratado internacional en establecer objetivos de reducción de emisiones netas de GEI para 38 países desarrollados y

economías en transición, con un calendario de cumplimiento. Se estableció que las emisiones de CO₂, CH₄, N₂O, y tres gases industriales fluorados, hidrofluorocarburos (HFC), perfluorocarbonos (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF₆) debían reducirse al menos 5 % por debajo de los niveles de 1990 en el periodo de 2008 a 2012, conocido como el primer periodo de vigencia del Protocolo de Kioto; el segundo periodo de vigencia va desde enero de 2013 hasta diciembre de 2020, en el cual se establecieron nuevos compromisos. Las emisiones de GEI de los 38 países se redujeron, hasta 2012, en un 24 %, con respecto a los niveles de 1990 (Shishlov, Morel, & Bellassen, 2016); sin embargo, un estudio estadístico de la efectividad de los objetivos de reducción de emisiones de CO₂ vinculantes del Protocolo de Kioto, concluyó que el Protocolo no tuvo una influencia significativa en la reducción de GEI, es decir, que los países con objetivos de emisiones vinculantes no emitieron menos CO₂ durante el periodo de 1998 a 2011 de lo que habrían emitido en ausencia de los objetivos dictados por el Protocolo de Kioto (Almer & Winkler, 2017). De no ser por factores externos como la disolución de la Unión Soviética y la ausencia de participación de Estados Unidos, que no ratificó el Protocolo, y Canadá, que se retiró en 2011, no se habría alcanzado la reducción del 5 % con respecto a los niveles de 1990 (Shishlov et al., 2016). Los países no desarrollados, como México, no tienen obligación de reducir sus emisiones, por lo que no se puede afirmar que el Protocolo de Kioto contribuyó en la reducción de las emisiones de GEI a nivel mundial.

El objetivo del desarrollo sostenible es el equilibrio entre el crecimiento económico, el cuidado del medio ambiente y el bienestar social; contrario al concepto de desarrollo tradicional, donde solo se toma en cuenta el bienestar económico, sin importar si se compromete la vida en el planeta o la calidad de vida de la especie humana. Por ello, durante la Cumbre sobre el Desarrollo Sostenible,

en septiembre de 2015, se adoptó la Agenda 2030 para el desarrollo sostenible, la cual establece 17 objetivos que incluyen temas sociales, medioambientales y económicos (ONU, 2019a).

A diferencia de los objetivos establecidos anteriormente por la ONU, la Agenda 2030 es aplicable para todos los países, no solo para los desarrollados. Sin embargo, no son vinculantes, no proveen de una guía sobre cómo se interrelacionan los objetivos entre ellos, ni se describen los cambios a nivel social y político necesarios para alcanzar los objetivos. Uno de los instrumentos para el cumplimiento del objetivo 13 de desarrollo sostenible, acción por el clima, es el Acuerdo de París; éste se adoptó en 2015 en la XXI conferencia sobre cambio climático y comenzará a aplicarse en 2020, cuando finalice el segundo periodo de vigencia del Protocolo de Kioto.

1.5. IMPACTO AMBIENTAL Y ENERGÉTICO DE LOS MATERIALES CERÁMICOS DE CONSTRUCCIÓN

Durante la producción de los materiales cerámicos de construcción, la etapa de cocción en el horno representa hasta el 80 % del total del consumo de energía (Zabalza-Bribián et al., 2011). La **Tabla 1** presenta los resultados obtenidos por Zabalza, et. al. (2011), mediante la metodología del ACV, para los indicadores de la demanda de energía primaria, el potencial de cambio climático (GWP, por sus siglas en inglés, Global Warming Potential) y la demanda de agua, para materiales cerámicos de construcción.

1.5.1. Cemento Portland

El cemento es el material de construcción más utilizado en el planeta, tuvo una producción de 4.1 Gt en 2018 a nivel mundial (USGS, 2019). Está presente en las cimentaciones,

Tabla 1. Resultados de ACV para materiales cerámicos de construcción. Elaboración propia con información de (Zabalza-Bribián et al., 2011)

Material	Densidad	Conductividad térmica	Demanda de energía primaria	Potencial de cambio climático	Demanda de agua
	(kg/m ³)	(W/mK)	(MJ-Eq/kg)	(kg CO ₂ -Eq/kg)	(L/kg)
Tabique ordinario	1800	0.95	3.562	0.271	1.890
Tabique ligero	1020	0.29	6.265	-0.004	1.415
Tabiques de cal y arena	1530	0.7	2.182	0.120	3.009
Baldosas cerámicas	2000	1.0	15.649	0.857	14.453
Baldosa sin vitrificar	2100	1.5	2.200	0.290	3.009
Teja cerámica	2000	1.0	4.590	0.406	2.456
Teja de concreto	2380	1.65	2.659	0.270	4.104
Tejas de fibrocemento	1800	0.5	11.543	1.392	20.368
Cemento	3150	1.4	4.235	0.819	3.937

los muros estructurales y los divisorios, los techos y los pisos de los edificios; así como, en las obras civiles como los puentes, las carreteras y las presas. En 1824, Joseph Aspdin patentó el CP, el tipo de cemento más utilizado, ya que es un elemento principal en concretos, morteros y acabados. En México, en 2016 se produjeron 40.6 Mt de cemento, de los cuales, alrededor del 80 %, se concentró en 37 plantas, que pertenecen a 6 empresas (Cemento Cruz Azul, Cemento Fortaleza, Cemento Moctezuma, CEMEX, GCC y Holcim) (CANACEM, 2016), y aportan alrededor del 1 % del PIB nacional (Güereca et al., 2015).

El clínker de CP se produce en hornos giratorios, a partir de carbonato de calcio (CaCO₃), y minerales de sílice, hierro y aluminio; los cuales se someten a una temperatura aproximada de 1450 °C y alcanzan más de 2000 °C (Güereca et al., 2015; Huntzinger & Eatmon, 2009). El clínker se muele y se mezcla con yeso, el cual retarda el fraguado, para obtener el producto final (IEA & CSI, 2017).

1.5.1.1. Concretos ligeros

El concreto es un material compuesto, conformado por cemento, agregados y agua; cuando se le refuerza con varillas, se le conoce como concreto armado, y tiene un peso volumétrico aproximado de 2400 kg/m³; a los concretos con un peso menor, se le conoce como concretos ligeros. La disminución de peso se logra generalmente al sustituir los agregados tradicionales por otros más ligeros, como la vermiculita y la perlita expandida; o mediante técnicas para dejar huecos de aire dentro del elemento, en los llamados concretos celulares.

El concreto ligero se clasifica, según su densidad, en tres grados: concreto de densidad baja, menor de 800 kg/m³; concreto de resistencia moderada, entre 800 y 1400 kg/m³; y concreto estructural, entre 1400 y 2000 kg/m³ (Q. L. Yu, Spiesz, & Brouwers, 2015). Debido a su densidad baja, los concretos ligeros tienen las ventajas de representar una carga muerta menor en las estructuras, costos de transportación menores, y una conductividad térmica menor a la del concreto convencional (Q. L. Yu et al., 2015).

1.5.1.2. Impactos ambientales asociados al cemento Portland

La industria cementera es responsable de aproximadamente 7 % en masa, de las emisiones globales de CO₂ (IEA & CSI, 2017). Durante la producción de cemento, del 30 % al 40 % de las emisiones de CO₂ son producto del uso de combustibles; mientras que, el 60 % al 70 % restante proviene de la descomposición del carbonato de calcio (CaCO₃) en óxido de calcio (CaO) y CO₂. El CaO es precursor en la formación de silicatos de calcio, los cuales dan al cemento su resistencia, mientras que el CO₂, se libera a la atmósfera (IEA & CSI, 2017). La industria cementera es la tercera consumidora de energía industrial (IEA & CSI, 2017). La producción de 1 t de clínker de CP, requiere 760,740 Kcal de energía para el horno de cemento (Güereca et al., 2015). Dicha energía proviene generalmente de combustibles

fósiles; en México, el combustible más utilizado para esta aplicación es el coque de petróleo, el cual es un residuo sólido del proceso de refinación del petróleo (Güereca et al., 2015). Las emisiones durante la calcinación en hornos de cemento, por ser un proceso con quema de combustibles fósiles, son partículas suspendidas (PS), dióxidos de azufre (SO_2), óxidos de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO), compuestos orgánicos volátiles (VOC), hidrocarburos, cadmio, mercurio, talio, dioxinas y furanos, antimonio, arsénico, níquel, plomo, cromo y CO_2 (Güereca et al., 2015; Gursel et al., 2014). Otro residuo, es el polvo de horno de cemento, el cual se desecha en vertederos o se almacena en pilas de reserva en el sitio; por su naturaleza cáustica y su potencial para ser un irritante respiratorio, de ojos y piel, representa riesgos para la salud humana y contaminación del aire. Se estima que la tasa de generación de polvo de horno de cemento es del 15 al 20 % (en masa) de la producción de clínker (Huntzinger & Eatmon, 2009).

En promedio, se necesitan 1.58 t de materias primas, para producir 0.95 t de clínker o 1 t de cemento terminado (Huntzinger & Eatmon, 2009). La extracción de las materias primas del CP, genera impactos ambientales asociados con la producción y uso del diésel, la gasolina, los explosivos, el agua, la descarga de aguas residuales, y la emisión de PS (Güereca et al., 2015; Gursel et al., 2014), que se transportan a través del aire y representan riesgos de salud respiratoria. La extracción de las materias primas, consume el 60 % del agua necesaria, y genera el 90 % del total de emisiones de PS del proceso de producción de cemento (Gursel et al., 2014). Las materias primas se obtienen a través de minería a cielo abierto, la cual causa impactos significativos al medio ambiente como la destrucción del sistema ecológico de la región, el deterioro de la biodiversidad y de las condiciones para la agricultura, la reducción de la cobertura vegetal, la contaminación y erosión del suelo, contaminación del agua

y el aire, así como en la producción de ruido y polvo (Kumar & Reddy, 2016). Una vez obtenidas, las materias primas se trituran y muelen para obtener un polvo fino (Huntzinger & Eatmon, 2009); este proceso, también genera impactos ambientales, los cuales se asocian con la producción uso del diésel y la gasolina, y a la producción y uso de electricidad (Güereca et al., 2015).

1.6. ALTERNATIVAS AL CEMENTO PORTLAND

El CP es un material de construcción de impacto ambiental y demanda alta, por lo que, reducir las emisiones de GEI, principalmente el CO_2 asociado a su producción, va de acuerdo con los objetivos de la Agenda 2030 para el desarrollo sostenible establecidos por la ONU. Para lograr este objetivo, la industria del cemento debe apoyarse en los principios de la ecoeficiencia y del modelo de economía circular, ya que actualmente se rige por el modelo de economía lineal, donde se extraen las materias primas para su producción, y los productores no se hacen responsables por lo que sucede con su producto al finalizar su vida útil.

A pesar de las mejoras en la eficiencia de los hornos utilizados en la producción del cemento, el cero neto de emisiones en esta industria está lejos de alcanzarse, ya que la reacción química que da lugar a la resistencia de este material libera CO_2 . Si bien este GEI es tratable, una opción más adecuada es la de utilizar materiales sustitutos del cemento, que provengan de materias primas que no emitan CO_2 durante su producción.

Capítulo 2

**CEMENTOS ACTIVADOS
ALCALINAMENTE**

2.1. QUÉ SON LOS CEMENTOS ACTIVADOS ALCALINAMENTE

Los cementos activados alcalinamente son una alternativa al cemento Portland (CP); estos se obtienen a partir de un precursor mineral del tipo de los aluminosilicatos, que se activan con álcali a temperatura ambiente, y se consolidan a menos de 100 °C. La fabricación de cementos activados con álcali produce emisiones bajas o nulas de dióxido de carbono (CO_2); 1 t con base de caolín, genera 0.18 t de CO_2 , comparado con 1 t de CO_2 para una tonelada de CP (Davidovits, 2015). Entre las propiedades de estos materiales, destacan su resistencia alta a la compresión y a los ácidos (Davidovits, 2015).

2.2. CLASIFICACIÓN DE LOS CEMENTOS ACTIVADOS ALCALINAMENTE

Los cementos activados con álcali se clasifican con base en la composición química de su precursor mineral.

2.2.1. Cementos activados alcalinamente con contenido alto de calcio

Los cementos activados alcalinamente con contenido alto de calcio son los que emplean precursores ricos en calcio y silicio, como la escoria de alto horno ($\text{SiO}_2 + \text{CaO} > 70\%$). El producto principal de su activación alcalina, es un gel C-A-S-H (C = CaO, A = Al_2O_3 , S = SiO_2 , H = H_2O); similar al formado en el CP (Pacheco-Torgal et al., 2015).

2.2.2. Cementos activados alcalinamente con contenido bajo de calcio

Los cementos activados alcalinamente con contenido bajo de calcio son los que utilizan materiales ricos en silicio y aluminio como precursores, como el metacaolín (MK) y la ceniza volante. El producto principal de la activación alcalina de estos materiales es un gel N-A-S-H (N = Na_2O , A = Al_2O_3 , S = SiO_2 , H = H_2O) (Pacheco-Torgal et al., 2015). A este tipo de cementos también se les conoce como geopolímeros (GPs).

2.3. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA PRODUCCIÓN DE GEOPOLÍMEROS

Las propiedades de los GPs dependen de un número alto de factores. Durante la síntesis, influyen el material precursor y su tamaño de partícula, la relación de silicio/aluminio (Si/Al), la sustancia activadora y su concentración, la relación de líquido/sólido, el tiempo de reacción y de vibrado, entre otros; mientras que en los procesos de precurado y curado, influyen la temperatura, el tiempo y la humedad relativa, entre otros.

2.3.1. Factores que influyen durante la síntesis

Distintas publicaciones estudiaron la influencia de ciertos factores sobre la resistencia a la compresión de GPs de MK. Los activadores alcalinos empleados comúnmente en la síntesis de GPs son hidróxidos o silicatos de sodio o de potasio. Al comparar la resistencia a la compresión entre GPs de MK activados con silicatos de sodio y potasio, la resistencia fue mayor para los de sodio (F. Zhang et al., 2017); sin embargo, se observó que el efecto del tipo de álcali varió en función de la relación Si/Al, y que el desempeño mejoró con la mezcla de ambos tipos (Duxson, Mallicoat, Lukey, Kriven, & van Deventer, 2007). Los mecanismos de reacción variaron según el tipo de activador. La activación de MK con hidróxido de sodio (NaOH), dependiendo de la relación silicio/sodio (Si/Na) (a mayor cantidad de sodio, mayor cristalización), propició la formación de fases cristalinas de zeolitas. Mientras que, la activación de MK con silicato de sodio produjo una estructura amorfa, y por lo tanto, una resistencia mayor a la de los GPs activados con hidróxidos (B. Zhang, MacKenzie, & Brown, 2009). A pesar de ello, la producción de silicatos implica un impacto ambiental dos veces mayor que la producción de hidróxidos (Habert & Ouellet-Plamondon, 2016). Por su parte, el aumento en la concentración de los activadores alcalinos, afectó positivamente la resistencia a la compresión (García-Mejía &

Chávez-García, 2016; Phair & Van Deventer, 2002; Sakulich, Anderson, Schauer, & Barsoum, 2009; F. Zhang et al., 2017).

En cuanto a la relación Si/Al, las publicaciones han estado de acuerdo en que cuando ésta se encuentra en alrededor de 2, la resistencia a la compresión aumentó, en comparación a relaciones menores (Duxson et al., 2007; He et al., 2016; Ozer & Soyer-Uzun, 2015); y que cuando la relación sobrepasó 2.5, los GPs desarrollaron eflorescencia (He et al., 2016). La relación Si/Al determina las propiedades de los GPs y, por lo tanto, su campo de aplicación. Davidovits propuso una clasificación, en la cual determina que la relación Si/Al de 1 produce materiales adecuados para su aplicación como ladrillos y cerámicas; la relación de 2, materiales adecuados para su aplicación como cementos y concretos con emisiones de CO₂ bajas, así como para la encapsulación de desechos radioactivos y tóxicos; la relación de 3, genera materiales adecuados para su uso en equipos de fundición; mientras que en relaciones mayores a 15, se obtienen materiales con resistencia al calor y al fuego (Davidovits, 2015).

2.3.2. Factores que influyen durante el curado

El proceso de curado en los GPs tiene como objetivo mantener las condiciones que optimicen la reacción de geopolimerización. Es durante el curado, donde se desarrolla la carbonatación o la eflorescencia de las muestras. Esta se produce cuando el CO₂ de la atmósfera se incorpora y difunde a través de la red de poros de la muestra, donde reacciona con el agua presente, formando ácido carbónico (H₂CO₃), el cual, a su vez, reacciona con el NaOH, produciendo los carbonatos (García-Mejía & Chávez-García, 2016; Pacheco-Torgal et al., 2015; Phair & Van Deventer, 2002; Sakulich et al., 2009). La carbonatación modifica el pH en el sistema, lo cual reduce la velocidad de la activación del precursor y la resistencia mecánica de los GPs (Criado, Palomo, & Fernandez-Jimenez, 2005).

El tiempo de curado influye, en función de otros factores. Se observó que cuando los GPs de MK se curaron por encima de la temperatura ambiente sin humedad, a tiempos mayores, la resistencia disminuyó (Ozer & Soyer-Uzun, 2015); mientras que, cuando se aplicó humedad, un tiempo de curado mayor, aumentó la resistencia (Criado et al., 2005; García-Mejía & Chávez-García, 2016).

La temperatura de curado es un factor importante en el fraguado y endurecimiento de los GPs. Por ello, publicaciones distintas estudiaron el efecto de este factor, con el objetivo de determinar su valor óptimo. En el caso de GPs de MK activados con una solución de silicato de potasio, la resistencia a la compresión más alta se alcanzó cuando el curado se realizó a 80 °C por 7 días, con 106 MPa (Yuan et al., 2016); mientras que, en otro estudio, la resistencia a la compresión más alta se obtuvo cuando el curado fue a 65 °C por 28 días, con 12 MPa (Aredes et al., 2015). En otra publicación, donde se estudiaron GPs de MK activados con silicato de sodio, las muestras curadas a 60 y 80 °C, alcanzaron su resistencia a la compresión final 24 h después de la síntesis; por su parte, las mezclas curadas a 20 y 40 °C, mostraron un retraso en el desarrollo de resistencia, con valores más altos tras 28 días, en comparación con los de temperatura alta. Este comportamiento se debió a que los productos de reacción desarrollados a edades mayores fueron de calidad mayor en términos de porosidad menor y dureza mayor, en comparación con los productos de reacción a edades tempranas (Rovnaník, 2010). En GPs de MK activados con hidróxido de potasio (KOH), la resistencia a la compresión mayor se obtuvo a 60 °C (García-Mejía & Chávez-García, 2016).

Cuando el curado de los GPs se llevó a cabo por encima de la temperatura ambiente, la reacción de geopolimerización se acelera. Sin embargo, en algunos casos, el agua contenida dentro de las muestras se expulsó abruptamente, generando

una estructura porosa y la aparición de grietas. Para evitarlo, otro factor que se debe tomar en cuenta, y que ha sido estudiado con frecuencia menor, es la humedad relativa durante el curado. El aumento en la humedad relativa (HR) de curado (85 a 95 %HR), tuvo un efecto negativo sobre la resistencia a la compresión de los GPs de MK activados con KOH (García-Mejía & Chávez-García, 2016). El porcentaje de HR es un factor clave en la carbonatación de las muestras, la cual ocasiona una disminución de las propiedades mecánicas del material, y es resultado de la concentración alta del activador alcalino y de la exposición al CO_2 ambiental. Con valores de HR alrededor del 80 %, los poros de las muestras se llenan de agua, impidiendo así la disolución de CO_2 en el sistema (Criado et al., 2005; García-Mejía & Chávez-García, 2016).

2.4. MATERIALES GEOPOLÍMERO

COMPUESTOS CON MATRIZ DE

Los materiales compuestos con matriz de GP se estudiaron, con el objetivo de mejorar las propiedades de la matriz, para aplicaciones específicas. Se determinó que un material compuesto con matriz de GP de MK y agregado de vermiculita expandida, presenta densidad y propiedades mecánicas y de conductividad térmica, comparables con materiales utilizados en el sector de la construcción, como el concreto celular y los paneles de yeso (Medri et al., 2015). En GPs reforzados con fieltro de fibra de carbono, el aumento de la proporción de agregado, de 20 a 40 % en volumen, tuvo un efecto positivo sobre la resistencia a la flexión y el módulo de Young del material, y le dio propiedades de absorción de microondas (He et al., 2018). Reforzar una matriz de GP con fibras en proporción de 1.2 % en volumen, incrementó la resistencia a la flexión a 28 días en 31.45 % para fibras de acero y en 39.84 % para fibras de alcohol polivinílico (PVA), en comparación con el GP sin reforzar; mientras que, la

resistencia a la compresión a 28 días aumentó ligeramente para los compuestos con fibras de acero y fibras de PVA en 3.37 % y 4.26 % respectivamente (Al-mashhadani, Canpolat, Aygörmez, Uysal, & Erdem, 2018). La adición de fibras de bambú a una matriz de GP, incrementó la resistencia a la flexión alrededor de 3.5 veces, en comparación al GP sin agregado; obtuvo una resistencia a la compresión entre 23 y 38 MPa (Sá Ribeiro, Sá Ribeiro, Sankar, & Kriven, 2016), la cual está de acuerdo con la resistencia del CP (ASTM, 2018b).

2.5. DISEÑO DE EXPERIMENTOS

Un experimento es un procedimiento que consiste en el estudio de un fenómeno, como la resistencia a la compresión, la densidad o la conductividad térmica, entre otras, y se le conoce como factor de respuesta, mediante la manipulación de variables que presumiblemente son su causa o lo afectan, como la relación Si/Al, la molaridad del activador o la temperatura de curado, entre otros, y se les conoce como factores. Los experimentos, tradicionalmente se desarrollan variando los valores de un factor a la vez, para observar cómo influyen los cambios sobre el factor de respuesta. De esta manera, si se pretende estudiar más de un factor, se debe hacer una serie de experimentos para cada uno de ellos, lo cual implica costos y tiempo. Los experimentos tradicionales, además, no consideran las interacciones entre factores, por lo que se puede llegar a conclusiones erróneas, debido a su visión limitada (P. Yu, Low, & Zhou, 2018).

Los diseños de experimentos (DDE) son modelos estadísticos cuyo objetivo es investigar si factores determinados influyen en el factor de respuesta, y si es así, cuantificar dicha influencia. Al implementarlos, la etapa experimental se optimiza, porque se investiga más de un factor a la vez, y, por lo tanto, el número de corridas experimentales, costos y tiempo se reducen, en comparación con los experimentos tradicionales (M. J. Anderson, 2015).

Los DDE toman en cuenta la influencia de los factores no controlables, y aplican estrategias para minimizar la variabilidad no planificada debido a ellos, por medio de realizar las corridas experimentales en orden aleatorio, para asegurar que las diferencias provocadas por factores relacionados con los materiales, los equipos, las condiciones ambientales, entre otros factores no controlables, se repartan de manera homogénea entre las corridas experimentales. Otra estrategia consiste en establecer factores de bloqueo o bloques, los cuales no se quieren estudiar en el experimento, aunque se considera que afectan la respuesta observada, y se espera que el subconjunto de datos dentro de cada bloque sea más homogéneo que el conjunto total de datos. Ejemplos de factores de bloqueo son el tipo de agregado de materiales compuestos diferentes o el operador de una máquina de la cual se quiere medir su eficiencia, porque la habilidad y el conocimiento del operador influye en el resultado, entre otros.

En un DDE los resultados de las corridas experimentales se complementan entre sí y la información se obtiene de la combinación de ellos. Es aplicable para el estudio de factores múltiples a la vez, cuantificar la influencia de los factores sobre el factor de respuesta y para aproximarse a la estrategia experimental óptima del sistema estudiado. Existen un número considerable de modelos de DDE, para estudiar la diversidad de problemas prácticos, y se debe elegir el adecuado en función del objetivo del experimento, el número de factores y niveles a estudiar, los efectos que se pretenden investigar, así como el costo, el tiempo y la precisión deseada del experimento.

2.5.1. Diseño de experimento factorial

Los DDE factoriales se basan en la combinación de factores, son ortogonales y balanceados. Permiten el estudio de factores múltiples y sus interacciones de manera simultánea (P. Yu et al., 2018), siguen la ecuación (**E1**):

(E1)

$$n = m^k$$

Donde n es el número total de experimentos, k es el número de factores, y m es el número de niveles de cada factor. Convencionalmente, los experimentos usan el diseño factorial completo en dos niveles y con un número de factores pequeño, resultado en un diseño 2^k .

2.5.2. Diseño de experimentos en la síntesis de geopolímeros

El DDE se aplicó en el estudio de la influencia de factores determinados sobre las propiedades de los GP. La influencia de la concentración del activador, la temperatura, el tiempo y la HR de curado sobre la resistencia a la compresión de GPs de MK activados con KOH, se estudió mediante un DDE factorial 2^k , considerando dos niveles por factor (alto y bajo), y dos repeticiones en el punto central. La resistencia a la compresión más alta fue de 20 MPa, se obtuvo mediante la activación con KOH 12 M y un curado a 60 °C y 85 %HR por 28 días. El análisis estadístico de los resultados mostró que el aumento en la concentración del activador, la temperatura y el tiempo de curado tuvieron un efecto positivo sobre la resistencia a la compresión, mientras que el aumento de la HR de curado, de 85 %HR a 95 %HR, tuvo un efecto negativo (García-Mejía & Chávez-García, 2016). El efecto de las relaciones molares $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ y $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ y la temperatura de curado, en la resistencia a la compresión de GPs de MK, se estudió por medio de un DDE factorial completo. El análisis estadístico de los resultados indicó que los factores con influencia significativa fueron la relación molar $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$, donde el aumento de la relación de 13.75 a 21.25, tuvo un efecto negativo, y la interacción de las relaciones $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ y $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$, con un efecto positivo. (Ghanbari, Hadian, & Nourbakhsh, 2015). Se estudió la influencia de la temperatura de curado y las relaciones molares $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ y $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$, sobre la resistencia a la compresión de GPs de MK, mediante un

diseño central compuesto. Los resultados indicaron que los cuatro factores estudiados, así como las interacciones entre las relaciones molares $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ y $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ y $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ y $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ tienen influencia en el sistema. La resistencia a la compresión óptima predicha fue de 64.1 MPa, con las condiciones de temperatura de curado de 67 °C, relación $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ de 2.90, relación $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ de 0.20 y relación $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ de 13.75. Comparado con los otros parámetros, la relación molar $\text{H}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ tuvo el impacto mayor, ya que un incremento en la relación redujo significativamente la resistencia a la compresión (Ghanbari, Hadian, Nourbakhsh, & MacKenzie, 2017). La influencia de la variación de las proporciones de MK, NaOH, silicato de sodio y agua sobre la resistencia a la compresión de GPs, se estudió mediante un DDE ortogonal. La resistencia a la compresión mayor se obtuvo con las proporciones en peso MK 41.6%, NaOH 6.7%, silicato de sodio 45.0%, y agua 6.7% (Chen, Wang, Wang, & Feng, 2016). La influencia del porcentaje de fibras, la relación en masa entre la cantidad de activador y el MK y el tiempo de curado a temperatura ambiente, sobre el módulo de elasticidad de un material compuesto con matriz de GP de MK activado con NaOH y silicato de sodio y agregado de fibras de sisal, se estudió mediante un diseño central compuesto. Se identificó a la relación en masa entre los activadores y el MK como factor significativo. El aumento en el porcentaje de fibras de sisal tuvo un efecto positivo en el incremento del módulo de elasticidad (da Silva Alves, dos Reis Ferreira, Bellini Machado, & de Castro Motta, 2019).

2.6. MATERIAL COMPUESTO DE GEOPOLÍMERO Y AGREGADOS MINERALES

Las diferencias en las características de los estudios sobre GPs y materiales compuestos con matriz de GP, dificultan la comparación de los resultados publicados. Los GP se evalúan con base en propiedades como la resistencia a la compresión, la conductividad térmica o la densidad,

para comparar sus resultados con los de otros materiales. Dichas propiedades se ven afectadas por la modificación en los valores de factores como las relaciones Si/Al, Si/Na y líquido/sólido, el tipo y la concentración del activador y el tipo y el tamaño de partícula del mineral precursor, así como el tiempo, la temperatura y el porcentaje de HR de curado. Por el número alto de factores involucrados, investigarlos todos en un solo estudio resultaría en una etapa experimental larga y costosa.

Este trabajo de investigación estudió la influencia de los factores contenido de agregado, temperatura y %HR de curado sobre la resistencia a la compresión a 7 días de materiales compuestos con matriz de GP de MK activado con NaOH 12 M y agregados de origen mineral, mediante un DDE factorial 2^{k+1} . En cuanto a los agregados, se estudiaron dos tipos: la mica y la perlita, los cuales se establecieron en el DDE como bloques. Esto porque el interés de la etapa experimental fue estudiar los factores de síntesis y curado que influyen en el desarrollo de la resistencia a la compresión de los materiales compuestos con matriz de GP y agregados de origen mineral (GP/agregados), y no la comparación entre ellos.

2.6.1. Materias primas

Las materias primas empleadas en la conformación del material compuesto GP/agregado son: como matriz, el GP sintetizado con MK activado con NaOH; y, para el agregado, la mica y la perlita, sistemas estudiados por separado.

Los precursores en la síntesis de GPs son minerales del tipo de los aluminosilicatos, naturales o sintéticos. Materiales como la escoria de alto horno y la ceniza volante se utilizan como precursores en la síntesis de GPs, con el beneficio de reutilizar desechos industriales y sus implicaciones, como la reducción de residuos sólidos desechados en vertederos y de la contaminación del aire por la propagación de sus partículas. A pesar de ello, tienen la desventaja de que su composición química varía de manera significativa entre una

planta de producción u otra, lo que dificulta la estandarización de los factores involucrados en la síntesis y curado de GPs. En la investigación, el caolín se utiliza como un modelo por sus características como su pureza y su composición química definida.

2.6.1.1. Caolín

El caolín es una arcilla mineral, compuesto principalmente por la caolinita; es un polvo blanco de grano fino, con variaciones de color debido a impurezas. Además de caolinita, el caolín suele contener cuarzo y mica, y en proporción menor, feldespatos, illita, montmorillonita, bauxita, zircón, rutilo, grafito y halloysita (Mohiuddin, Makarfi Isa, Mdleleni, & Key, 2018).

La fórmula química ideal de la caolinita es $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$; se compone por: 39.8 % alúmina, 46.3 % silicio y 13.9 % agua. Su estructura cristalina es triclinica, tiene un peso molecular de 258.071 g/mol, una densidad de 2.6 g/cm³ y una dureza de 2 (Varga, 2007).

El caolín, se utiliza como relleno en plásticos y pinturas, en la fabricación de porcelanas, papel, refractarios, vidrio, cemento, cosméticos, material eléctrico, caucho, hule, metales, química, forraje y en las industrias farmacéutica y agroquímica (USGS, 2019). En México, el 99 % de la producción nacional de caolín se concentra en los estados de Chihuahua, Guanajuato, Veracruz y Michoacán (Romero-Guerrero, Moreno-Tovar, Arenas-Flores, Marmolejo-Santillán, & Pérez-Moreno, 2018).

2.6.1.2. Metacaolín

El MK se obtiene mediante la deshidroxilación del caolín a una temperatura en el intervalo de 700 a 800 °C. Con el calor aplicado, la pérdida de agua, causa la descomposición parcial de la estructura cristalina de la caolinita, dando lugar a una estructura amorfa y reactiva (Bich, Ambroise, & Péra, 2009; Ilić, Mitrović, & Miličić, 2010; Konan et al., 2009; Pacheco-Torgal et al., 2015; Varga, 2007). Es aplicado en la fabricación del cemento puzolánico, y es uno de los materiales

precursores utilizados con frecuencia en la investigación de GPs, porque la calcinación genera una estructura amorfa, lo cual lo hace más susceptible a la activación alcalina, en comparación con el caolín, sin perder sus características de pureza y composición química definida (García-Mejía & Chávez-García, 2016; He et al., 2016; Medri et al., 2015; Sá Ribeiro et al., 2016; Yuan et al., 2016; F. Zhang et al., 2017).

2.6.1.3. Hidróxido de sodio

El NaOH es un compuesto inorgánico alcalino, sólido, blanco, inodoro, higroscópico y corrosivo; también es conocido comercialmente como sosa cáustica. Es utilizado de forma amplia en la industria farmacéutica y alimentaria; así como en la fabricación de detergentes, papel, explosivos, tinturas, textiles y productos de petróleo. Es un componente común en limpiadores de desagües y hornos. En la fabricación de GPs, es un activador empleado con frecuencia por su alcalinidad y costo bajo relativo; además, representa una alternativa más amigable con el medio ambiente, comparado con otros activadores alcalinos como el silicato de sodio (Pacheco-Torgal et al., 2015).

2.6.1.4. Mica

Las micas son los filosilicatos más abundantes en la corteza terrestre; se caracterizan porque su estructura se exfolia en láminas delgadas y flexibles fácilmente. Su sistema cristalino es monoclinico. Se conforman principalmente por silicio, aluminio, magnesio y hierro (Akalin, Hıçsönmez, & Yilmaz, 2018; Rieder et al., 1998). Las variedades de micas más abundantes son las biotitas y las moscovitas. Son utilizadas en la industria por sus propiedades de aislamiento térmico y eléctrico (USGS, 2019).

2.6.1.5. Perlita

La perlita es un vidrio natural de origen volcánico, compuesto comúnmente por ~74 % de sílice (SiO_2) y ~12 al 13 % de alúmina (Al_2O_3) (Zujovic, Wheelwright, Kilmartin, Hanna, & Cooney, 2018). Cuando se calienta rápidamente, expande hasta 20 veces su volumen original y se transforma

a perlita expandida; se utiliza como agregado de morteros, paneles y bloques de concreto ligero; y como relleno en edificios, para dar aislamiento térmico y acústico, así como resistencia al fuego (USGS, 2019).

2.7. VENTAJAS DE LOS GEOPOLÍMEROS SOBRE EL CEMENTO PORTLAND Y DEFINICIÓN DEL MATERIAL COMPUESTO GP/ARGREGADOS

Los impactos ambientales asociados a los GP y al CP se describen de manera general en la **Tabla 2**. Donde los materiales se diferencian es durante la etapa de manufactura, pues la producción de GPs requiere una temperatura menor en comparación con la del CP, el cual es uno de los motivos principales de aplicar este material en un elemento constructivo.

Un número alto de factores influyen en la síntesis de GPs, por lo que para esta investigación se diseñó un experimento de tipo factorial, donde se estudió la influencia de los factores siguientes: contenido de agregado, temperatura y porcentaje de la humedad de curado sobre la resistencia a la compresión de los materiales compuestos GP/mica y GP/perlita. Dichos materiales se sintetizaron a partir de una matriz de GP de MK activado con NaOH, y agregados minerales de tipo mica y perlita, para proponer su aplicación como paneles arquitectónicos no estructurales.

Tabla 2. Impactos ambientales durante el ciclo de vida del cemento Portland y los GPs

Etapa del ciclo de vida	Cemento Portland	Geopolímeros
Extracción de materias primas	Extracción de roca caliza y otras arcillas de minas de cielo abierto.	Extracción del material precursor en minas de cielo abierto. En el caso del MK, el tratamiento térmico para su cambio de fase. Aunque, es posible fabricarlos a partir de materiales de desecho industrial como la escoria de alto horno y la ceniza volante. Impactos asociados a la fabricación del activador alcalino.
Producción o manufactura	Su producción requiere una temperatura de 1450 °C, la cual se alcanza mediante la quema de combustibles fósiles. Se emiten de polvo de horno de cemento, CO₂ y otros gases. (Ver 1.5.1.2. Impactos ambientales asociados al cemento Portland)	La síntesis se realiza a temperatura ambiente, y el curado a menos de 100 °C. Generando una mínima cantidad de CO₂ y otros gases.
Transporte, distribución o comercialización	Impactos ambientales relacionados con el empaque del producto (plástico, adhesivo y cartón) y los combustibles fósiles del transporte de la planta de producción al centro de distribución y al destino final.	Impactos ambientales relacionados con el empaque del producto (plástico, adhesivo y cartón) y los combustibles fósiles del transporte de la planta de producción al centro de distribución y al destino final.
Uso o destino	Desprendimiento de polvo y posibilidad de causar irritación en la piel durante la instalación.	Desprendimiento de polvo y posibilidad de causar irritación en la piel durante la instalación.
Disposición o fin de vida	Difícil de reciclar porque no se descompone en sus partes básicas. Sin embargo, triturado se utiliza como agregado en la fabricación de concreto ciclópeo.	Difíciles de reciclar, porque sus componentes no se separan. Es viable utilizarlo como material precursor de nuevos GP (Gharzouni, Vidal, Essaidi, Joussein, & Rossignol, 2016).

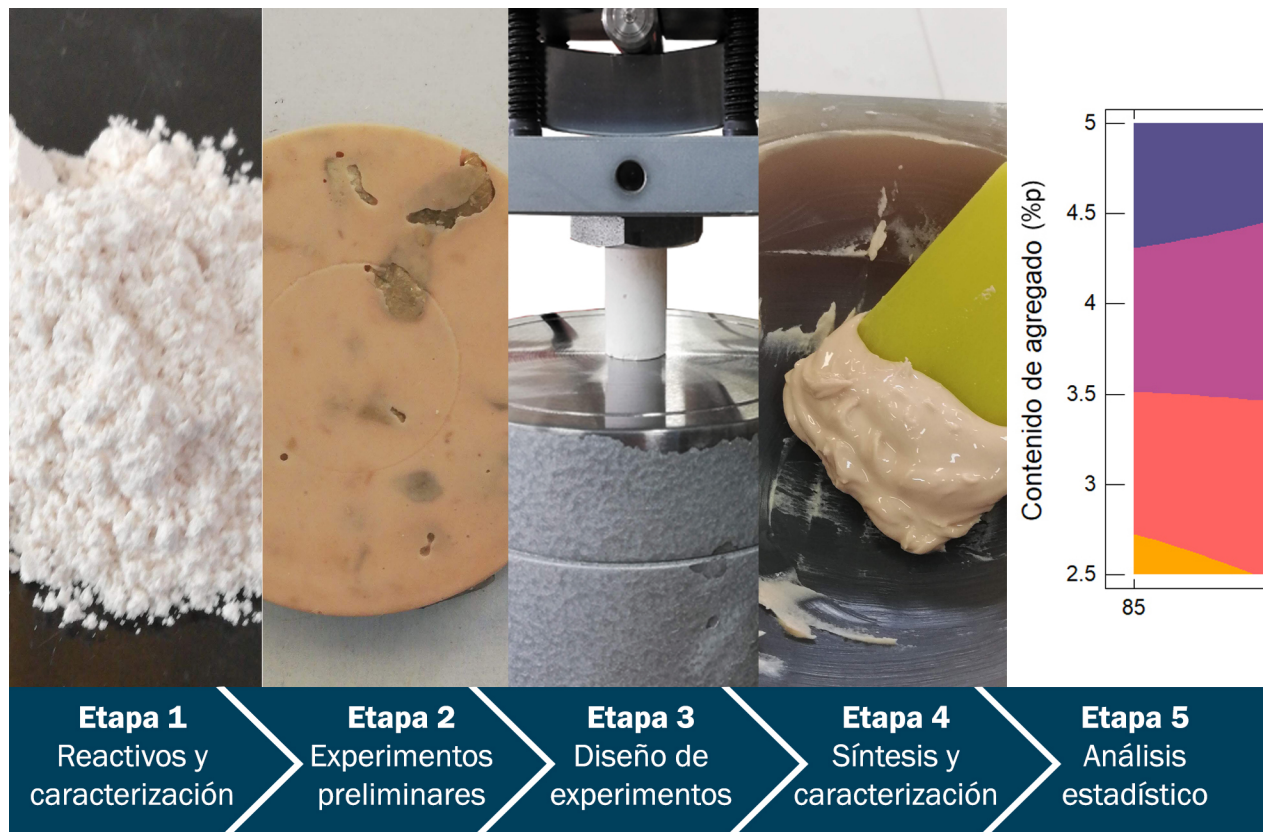
Capítulo 3

DESARROLLO EXPERIMENTAL

3.1. ETAPAS DEL DESARROLLO EXPERIMENTAL

En el desarrollo de materiales nuevos para la industria de la construcción, la experimentación en laboratorio es fundamental para conocer sus propiedades y anticipar su comportamiento en condiciones normales de uso. En el caso de la aplicación de los materiales compuestos con matriz de geopolímero (GP) y agregados de mica (GP/mica) y perlita (GP/perlita) como paneles para muros no estructurales, se realizaron experimentos preliminares para determinar las condiciones favorables para la síntesis del GP de metacaolín (MK) activado con hidróxido de sodio (NaOH), y para la adición de los agregados minerales; se caracterizaron los materiales precursores y los productos para conocer su estructura química, así como su comportamiento ante la humedad y la radiación ultravioleta (UV); y se diseñó un experimento para determinar los factores que influyen en el desarrollo de la resistencia a la compresión de los materiales compuestos.

Figura 2. Etapas del desarrollo experimental



Etapa 1
Reactivos y
caracterización

Etapa 2
Experimentos
preliminares

Etapa 3
Diseño de
experimentos

Etapa 4
Síntesis y
caracterización

Etapa 5
Análisis
estadístico

La etapa experimental se llevó a cabo en el Laboratorio de Cerámica de la Facultad de Química de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), con base en el diseño de experimento factorial 2^{k+1} en dos bloques. El experimento se dividió en cinco etapas, ilustradas en la **Figura 2**. A continuación se describen los objetivos establecidos para el experimento.

OBJETIVO DEL EXPERIMENTO

Determinar los valores de los factores: contenido de agregado, temperatura y humedad relativa de curado, para obtener los materiales compuestos GP/mica y GP/perlita, con una resistencia a la compresión adecuada para la fabricación de paneles arquitectónicos para muros no estructurales.

Objetivos particulares del experimento

1. Sintetizar geopolímeros a partir de MK activado con NaOH.
2. Diseñar un experimento para estudiar la influencia de los factores: cantidad de agregado, temperatura y humedad relativa de curado, en el desarrollo de la resistencia a la compresión a 7 días de los materiales GP/mica y GP/perlita.
3. Determinar la resistencia a la compresión de los materiales compuestos de geopolímero y agregados minerales, siguiendo la norma ASTM C39, y compararla con la del concreto ligero a base de cemento Portland.
4. Analizar estadísticamente los resultados del diseño experimental, para determinar la influencia de los factores estudiados sobre la resistencia a la compresión de los materiales compuestos de GP y agregados minerales.
5. Caracterizar el mineral precursor mediante las técnicas de fluorescencia de rayos X, difracción de rayos X en polvos y espectroscopía de absorción infrarroja; así como el material compuesto de

geopolímero y agregado mineral, por las técnicas de difracción de rayos X en polvos y espectroscopía de absorción infrarroja.

6. Exponer a los materiales compuestos GP/mica y GP/perlita, a intemperismo acelerado para observar su comportamiento ante la radiación UV y la humedad.

3.2. REACTIVOS Y CARACTERIZACIÓN

3.2.1. Reactivos

Para la síntesis de los GPs, se requirieron los reactivos MK y NaOH en concentración 12M; y como agregados minerales, la perlita y la mica.

3.2.1.1. Metacaolín

El caolín con tamaño de partícula $< 38 \mu\text{m}$ se calcinó a $800 \text{ }^\circ\text{C}$ por 3 h, para obtener el material precursor MK. La microestructura del caolín y del MK se estudió por medio de las técnicas de difracción de rayos X (DRX) y espectroscopía de infrarrojo (FTIR); además, el MK se analizó por la técnica de fluorescencia de rayos X (FRX), para conocer su composición química elemental.

3.2.1.2. Hidróxido de sodio

Se preparó la solución de NaOH a una concentración de 12 M, mediante la disolución en agua destilada de perlas de NaOH con 98 % de pureza, marca J.T. Baker.

3.2.1.3. Perlita

La perlita cruda tipo AC, marca Termolita, se empleó como agregado en el material compuesto de matriz geopolimérica. Se caracterizó por DRX y FTIR.

3.2.1.4. Mica

También como agregado, se utilizó la mica en láminas de $\sim 5 \text{ mm}$. El mineral se caracterizó por DRX y FTIR.

3.2.2. Técnicas de caracterización

Para obtener información de la estructura y la morfología, tanto de los materiales precursores, como del material compuesto GP/agregado mineral, se utilizaron las siguientes técnicas.

3.2.2.1. Difracción de rayos X en polvos

La DRX se realizó en un difractómetro de rayos X, modelo D8 Advance Davinci, desde 5 hasta 60 ° de 2 θ . La identificación de las fases presentes en el mineral precursor se hizo tomando en cuenta las señales de intensidad mayor y su posición angular 2 θ . Las fases se identificaron con las tarjetas de la base de datos ICDD-PDF4 (International Center for Diffraction Data – Powder Diffraction File)

3.2.2.2. Fluorescencia de rayos X

El análisis químico elemental se obtuvo en un espectrómetro de fluorescencia de rayos X.

3.2.2.3. Espectroscopía de absorción infrarroja

Los grupos funcionales del precursor y los productos sintetizados se analizaron con la técnica de espectroscopía de absorción infrarroja con transformada de Fourier y reflectancia total atenuada (ATR). Se utilizó un espectrofotómetro de FTIR Spectrum 400 de Perkin-Elmer, en la región del infrarrojo medio (4000 a 400 cm⁻¹).

3.2.2.4. Ensayo de resistencia a la compresión

Previo a los ensayos, se tomaron las medidas de las muestras cilíndricas con un vernier, para verificar la relación altura/diámetro de 2, y calcular su área transversal, según indica la norma de la Sociedad Americana para pruebas y materiales (ASTM, por sus siglas en inglés, American Society for Testing and Materials) ASTM C39: Método de ensayo normalizado para resistencia a la compresión de especímenes cilíndricos de concreto (ASTM, 2018c). En los casos en que fue necesario, las probetas fueron lijadas en su cara superior e inferior para garantizar una superficie lisa. Los ensayos de resistencia a la compresión se realizaron con

la máquina Humboldt HM-2800 (capacidad de carga de 50 kN), con un desplazamiento de 0.10 mm/min; obtenido el desplazamiento mayor antes de la fractura de la probeta, se calculó la fuerza aplicada en megapascales (MPa).

3.2.2.5. Intemperismo acelerado

Dos muestras de 75 x 75 x 5 mm, una de GP/mica y otra de GP/perlita, se expusieron a intemperismo acelerado en una cámara QUV marca Q-Lab. La cámara se configuró con el ciclo 6 de la norma ASTM G154: Práctica estándar para la operación de aparatos de lámparas fluorescentes de luz UV para la exposición de materiales no metálicos (ASTM, 2016). El ensayo tuvo una duración total de 336 h.

3.3. EXPERIMENTOS PRELIMINARES

La síntesis de GPs se desarrolló por medio de experimentos preliminares, con el objetivo de determinar las condiciones adecuadas para su síntesis y consolidación, en base a la literatura consultada, y así establecer un experimento definitivo, con el que se llevaron a cabo las pruebas finales (Aredes et al., 2015; García-Mejía & Chávez-García, 2016; He et al., 2016; Ozer & Soyer-Uzun, 2015; Yuan et al., 2016; F. Zhang et al., 2017). Las condiciones de cada uno de los experimentos preliminares y sus resultados se presentan en el **Anexo 1. Experimentos preliminares.**

3.4. SÍNTESIS DE MATERIAL COMPUESTO Y CARACTERIZACIÓN

La síntesis del material compuesto se realizó con MK, con un tamaño de partícula de 38 μm , con NaOH, 12 M, de acuerdo con la relación NaOH/MK de 0.70. La reacción se realizó en un mortero eléctrico (Fritsch Pulverisette 2) durante 10 min, controlando la adición del NaOH, a continuación el agregado se adicionó hasta obtener una distribución uniforme en la pasta, para su posterior vertido en moldes cilíndricos de policloruro de vinilo (PVC), con una relación altura/diámetro de 2 (ASTM, 2018c). El sistema se vibró en un vórtex (Vortex Mixer VM-10) por 15 min para



Figura 3. Diagrama de los procesos de síntesis, precurado, curado y caracterización de material compuesto GP/agregado

eliminar el aire ocluido dentro de las muestras, las cuales se sometieron a un proceso de precurado, con los moldes cubiertos para mantener la humedad y evitar la formación de grietas, a temperatura ambiente, durante 48 h. Al término del precurado, las muestras se desmoldaron y se sometieron al proceso de curado por 7 días, en una cámara con temperatura y humedad controlada (HINOTEK LSH-100CH), la cual se configuró con los valores indicados por el DDE factorial (**Tabla 4**). Finalmente, las probetas se ensayaron a compresión, según la norma ASTM C39 (ASTM, 2018c); los fragmentos se molturaron para su caracterización por DRX y FTIR. La **Figura 3** ilustra los procesos de síntesis, precurado, curado y caracterización.

Para someter a los materiales compuestos GP/perlita y GP/mica al ensayo de intemperismo acelerado, se siguió el mismo proceso para la síntesis, curado y precurado, con la variante de que el molde utilizado fue de cartón, con

dimensiones de 75 x 75 x 5 mm. Para ambos materiales compuestos se adicionó 2.5 % en peso de agregado, y se curaron a 50 °C y 85 %HR.

3.5. DISEÑO DE EXPERIMENTO

El experimento se diseñó para evaluar la influencia de la cantidad de agregado, la temperatura y la humedad de curado (factores) sobre la resistencia a la compresión a 7 días de los materiales compuestos GP/mica y GP/perlita (factor de respuesta). Los factores se analizaron en tres niveles: alto, medio y bajo, **Tabla 3**.

Tabla 3. Factores y niveles del experimento

Factor	Niveles		
	Bajo	Medio	Alto
Temperatura de curado	50 °C	60 °C	70 °C
Humedad relativa de curado	85 %HR	90 %HR	95 %HR
Cantidad de agregado	2.5 %p	3.75 %p	5 %p

Tabla 4. Diseño de experimento factorial 2^{k+1} en dos bloques

Bloque	Corrida	Tipo de agregado	Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)	Contenido de agregado (%p)
A	A1	Mica	60	90	3.75
	A2	Mica	50	95	5
	A3	Mica	50	85	2.5
	A4	Mica	70	95	2.5
	A5	Mica	70	85	5
B	B1	Perlita	50	95	2.5
	B2	Perlita	70	95	5
	B3	Perlita	60	90	3.75
	B4	Perlita	50	85	5
	B5	Perlita	70	85	2.5

Las condiciones para cada corrida experimental se establecieron mediante la combinación de los factores y sus niveles con el software Statgraphics Centurion XVI, para un total de 10 combinaciones diferentes. El experimento se llevó a cabo en orden aleatorio, de acuerdo con la **Tabla 4**. Se sintetizaron tres muestras por cada corrida del experimento, para determinar su promedio.

3.6. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

El análisis de los resultados de las pruebas de resistencia a la compresión se realizó por medio del análisis de la varianza (ANOVA) para determinar el significado estadístico de cada factor estudiado y de las interacciones entre ellos sobre la resistencia a la compresión. La prueba se efectuó con un nivel de confianza del 95 %, empleando el modelo siguiente (E2):

$$(E2) \quad y_{ijk} = \mu + A_i + B_j + C_k + AB_{ij} + AC_{ik} + BC_{jk} + \varepsilon_{ijk}$$

Donde y_{ijk} es el valor del factor de respuesta (resistencia a la compresión) estimado en i, j y k ; μ es la media general del valor estimado del factor de respuesta; A_i , B_j y C_k son los efectos individuales de los factores; AB_{ij} , AC_{ik} y BC_{jk} representan el efecto de las interacciones entre los factores; y ε_{ijk} representa el error aleatorio asociado a la combinación de los tratamientos matemáticos.

La prueba ANOVA define la importancia relativa de cada factor, mediante el valor P ; si su valor es menor 0.05, indica que el efecto de ese factor es estadísticamente significativo.

Se estudiaron, además, el gráfico de Pareto y el gráfico de superficie de respuesta. El primero representa los efectos de cada factor significativo desplegados en orden decreciente. El segundo es una representación gráfica de la predicción del factor de respuesta, como una función de dos de los factores estudiados.

3.7. RESUMEN DEL DESARROLLO EXPERIMENTAL

La etapa experimental en laboratorio se llevó a cabo con el fin de comprobar la hipótesis establecida. Para ello, se diseñó un experimento de tipo factorial, se sintetizó y caracterizó los materiales compuestos y se analizaron estadísticamente los resultados de resistencia a la compresión, haciendo uso de los reactivos y técnicas descritas durante el capítulo.

Capítulo 4

RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LA ETAPA EXPERIMENTAL

4.1. CONTENIDO DEL CAPÍTULO

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos durante la etapa experimental del proyecto y la discusión de estos, con base en publicaciones relacionadas con el tema desarrollado.

4.2. CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL PRECURSOR

El metacaolín (MK) se caracterizó por la técnica de fluorescencia de rayos X (FRX) para determinar su composición química elemental. El MK y el caolín, además, se caracterizaron por difracción de rayos X en polvos (DRX) y espectroscopía de absorción infrarroja (FTIR).

4.2.1. Fluorescencia de rayos X del material precursor

La composición química elemental del MK, obtenida por FRX (**Tabla 5**), muestra información útil para el cálculo de la relación Si/Al, con un valor de 2.06, lo cual indicó que el mineral es apto para sintetizar geopolímeros (GPs), con propiedades cementantes (Davidovits, 2015).

Tabla 5. Composición química del MK utilizado para la producción de GPs, obtenida por FRX

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	PXC
%	47.24	19.46	1.18	9.27	0.781	3.86	8.06	2.41	2.15	1.56	3.99

4.2.2. Difracción de rayos X en polvos del material precursor

El caolín y el MK se caracterizaron por DRX, **Figura 4**. En la caracterización del caolín por DRX se identificó a la caolinita como la fase presente en proporción mayor; y en menor, otros minerales como el cuarzo, la alunita, la cristobalita, la ortoclasa y el rutilo, **Figura 4**.

El análisis del difractograma del MK presentó un halo entre 20 y 30 ° de 2θ, lo cual indicó la presencia de una fase de semi amorfa a cristalina, adecuada para la activación

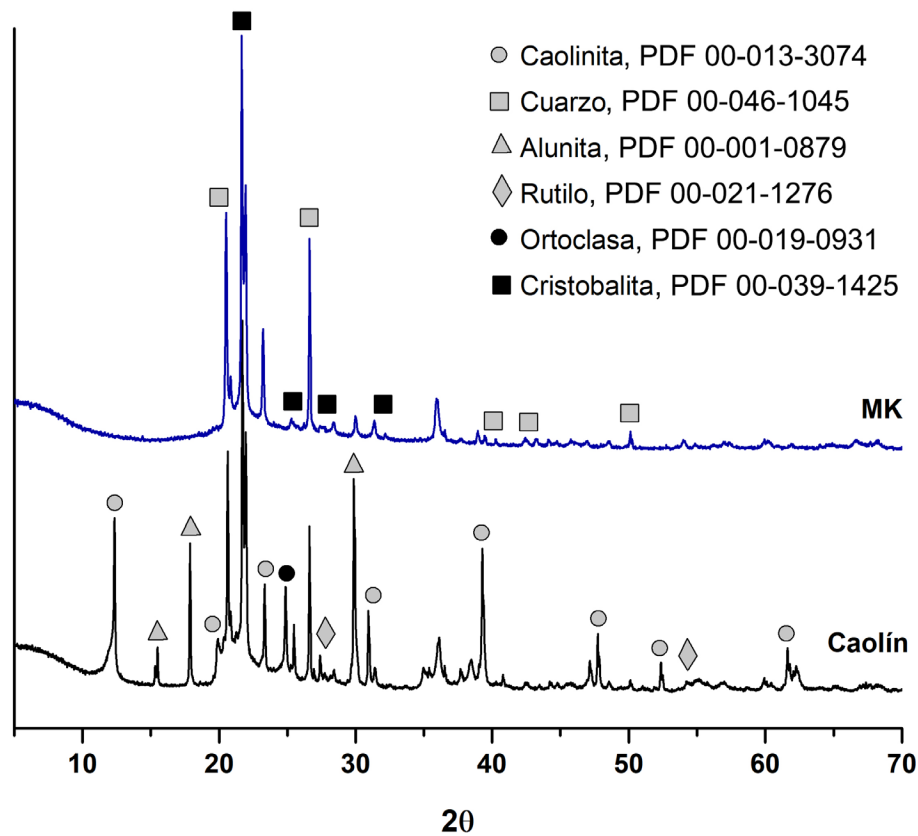


Figura 4. Difractograma de RX comparativo del caolín y el MK

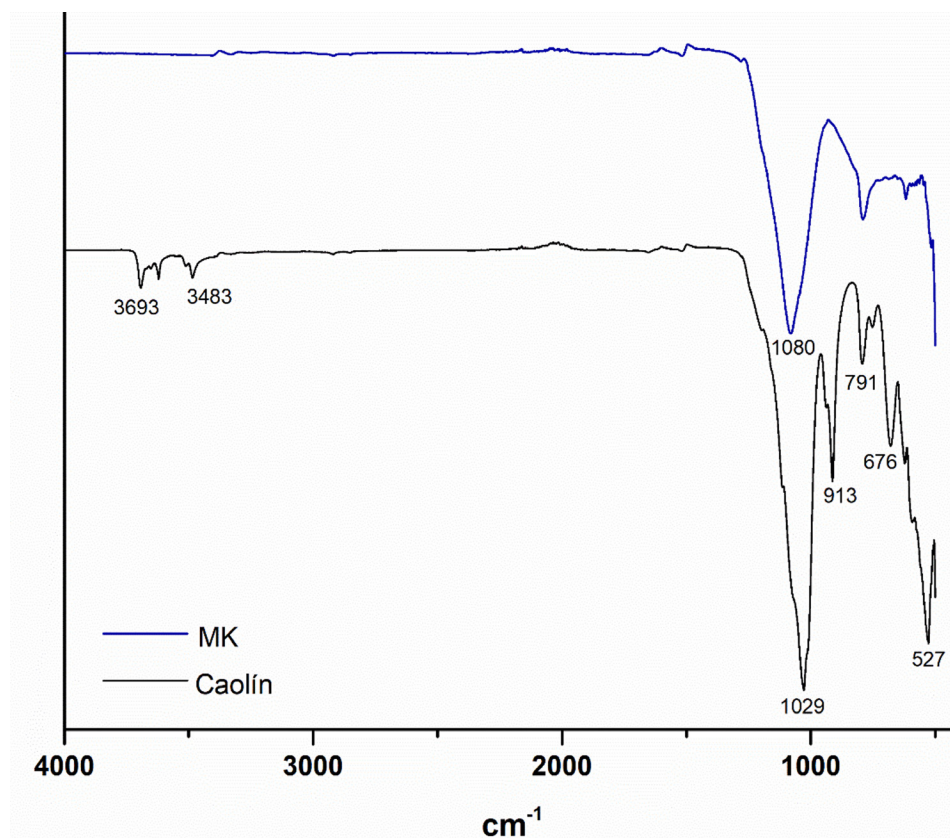
alcalina. La transformación de la caolinita a 800 °C por 3 h se comprobó, debido a la ausencia de sus señales, causada por la deshidroxilación de su estructura cristalina, con la pérdida de agua estructural (Ozer & Soyer-Uzun, 2015). Los polimorfos de SiO₂, el cuarzo y la cristobalita se conservaron tras el tratamiento térmico, **Figura 4**.

4.2.3. Espectroscopía de absorción infrarroja del material precursor

El análisis del caolín y el MK, por medio de la técnica de FTIR, **Figura 5**, mostró en el caolín, las bandas de intensidad baja entre 3500 y 3800 cm⁻¹, las cuales se relacionaron a las vibraciones de tensión de enlaces O-H del agua (Phair & Van Deventer, 2002; Rovnaník, 2010; Sakulich et al., 2009); mientras que, en el MK, éstas desaparecieron, debido a la deshidroxilación del material (Ilić et al., 2010; Varga, 2007). La banda presente a 913 cm⁻¹ en el caolín, se asoció a

vibraciones del enlace Al-O-H, ausente en el espectro del MK (Ilić et al., 2010). La banda de intensidad alta del caolín, se ubicó alrededor de 1030 cm^{-1} , la cual se relacionó a las vibraciones de tensión de los enlaces Si-O (Bich et al., 2009; Ilić et al., 2010), en coordinación tetraédrica (Varga, 2007). En comparación, en el espectro del MK, la banda predominante se desplazó alrededor de 1080 cm^{-1} , con una disminución de su intensidad, lo cual se relacionó a la deformación de los tetraedros Si-O de la caolinita, debido al tratamiento térmico. Por lo tanto, el cambio de fase provoca la deshidroxilación, con la modificación de la estructura de la caolinita (Konan et al., 2009). La señal alrededor de los 791 cm^{-1} , se ha asociado a las vibraciones del enlace Si-O-Al (Bich et al., 2009; Ilić et al., 2010), que en el caolín fue estrecha e intensa, mientras que en el MK se volvió ancha, lo que ha sido relacionado con el grado de desorganización de la estructura de la metacaolinita (Konan et al., 2009).

Figura 5. Espectro de IR comparativo del caolín y el MK



4.3. DEFINICIÓN DEL EXPERIMENTO DEFINITIVO

En la consolidación de los materiales compuestos GP/agregados, con base en los resultados del experimento preliminar 7 (**Tabla 22**), del cual se detallan las condiciones exploradas y los resultados obtenidos en el **Anexo 1: Experimentos preliminares**; se decidió que los factores: el precursor y su tamaño de partícula; el activador y su concentración; la relación NaOH/MK; y los tiempos de reacción, vibrado y precurado, se establecieron con los valores fijos de la **Tabla 6** para el desarrollo del experimento definitivo. Mientras que, los factores que se estudiaron por medio del DDE factorial 2^{k+1} , fueron: el contenido de agregado y la temperatura y la humedad relativa de curado, en tres niveles, **Tabla 4**.

Tabla 6. Factores fijos en la síntesis de GPs-MK/agregado con NaOH

Factor	Valor definido
Precursor	Metacaolín
Tamaño de partícula de precursor	38 μm
Activador	NaOH
Concentración del activador	12 M
Relación NaOH/MK	0.70
Tiempo de reacción	10 min
Tiempo de vibrado	15 min
Tiempo de precurado	48 h a temperatura ambiente

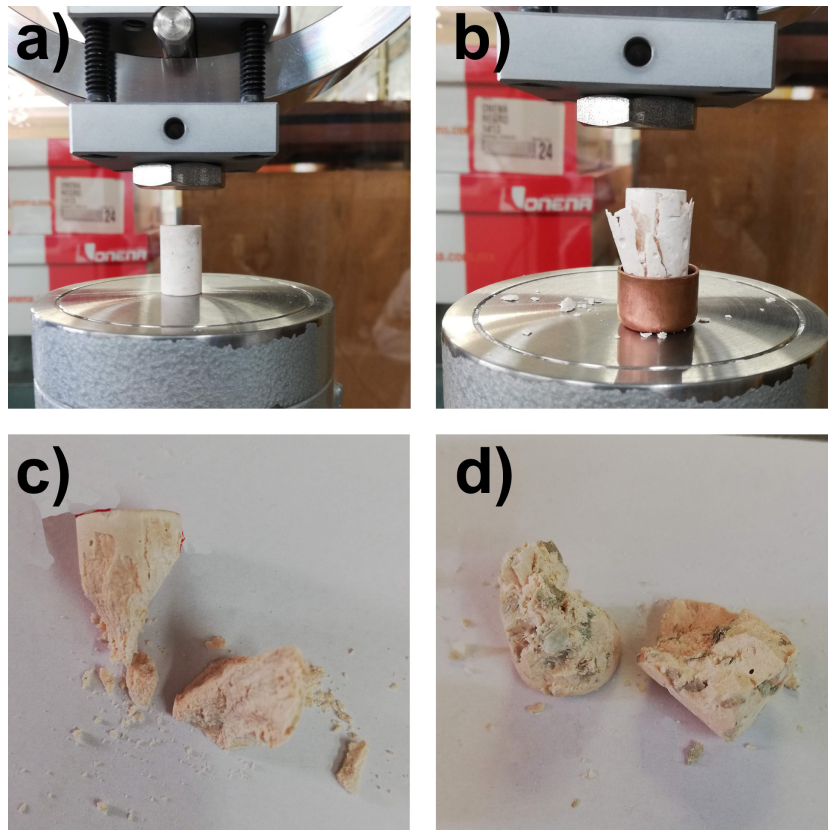
4.4. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

Las pruebas de resistencia a la compresión mostraron que las condiciones físicas de las probetas afectaron su resistencia, **Figura 6**. Las probetas en las que la superficie superior o inferior, no fue plana, presentaron falla tipo columnar (ASTM, 2018c), debido a que recibieron la carga en la sección de altura mayor y, por lo tanto, tuvieron desprendimiento de material en la cara; mientras que, los cilindros que no se colocaron exactamente en el centro de la prensa presentaron falla de tipo corte (ASTM, 2018c),

debido al desplazamiento sufrido durante el ensayo. Las probetas con buenas condiciones físicas, es decir, caras superior e inferior planas, y que se colocaron en el centro de la prensa, presentaron falla de tipo cono (ASTM, 2018c). Un comportamiento observado en todas las probetas fue que las burbujas de aire presentes desde el conformado favorecieron la propagación de grietas, **Figura 9**. Las resistencias máximas obtenidas variaron entre 1.8 y 5.2 MPa; los resultados se presentan en la **Tabla 7**.

La morfología y el tamaño de partícula de los agregados afectó la resistencia a la compresión de los materiales compuestos obtenidos. La perlita se utilizó en polvo, mientras que la mica se utilizó en hojuelas, siendo las partículas de la primera de un tamaño menor que la segunda. Ello provocó una distribución homogénea del agregado en la matriz de las muestras de GP/perlita, y, por lo tanto, una resistencia a la compresión mayor en comparación con las muestras de GP/mica.

Figura 6. Imágenes de probetas sometidas al ensayo de resistencia a la compresión. (a) Antes del ensayo; (b) Falla tipo columnar; (c) Falla tipo cono; (d) Falla tipo corte

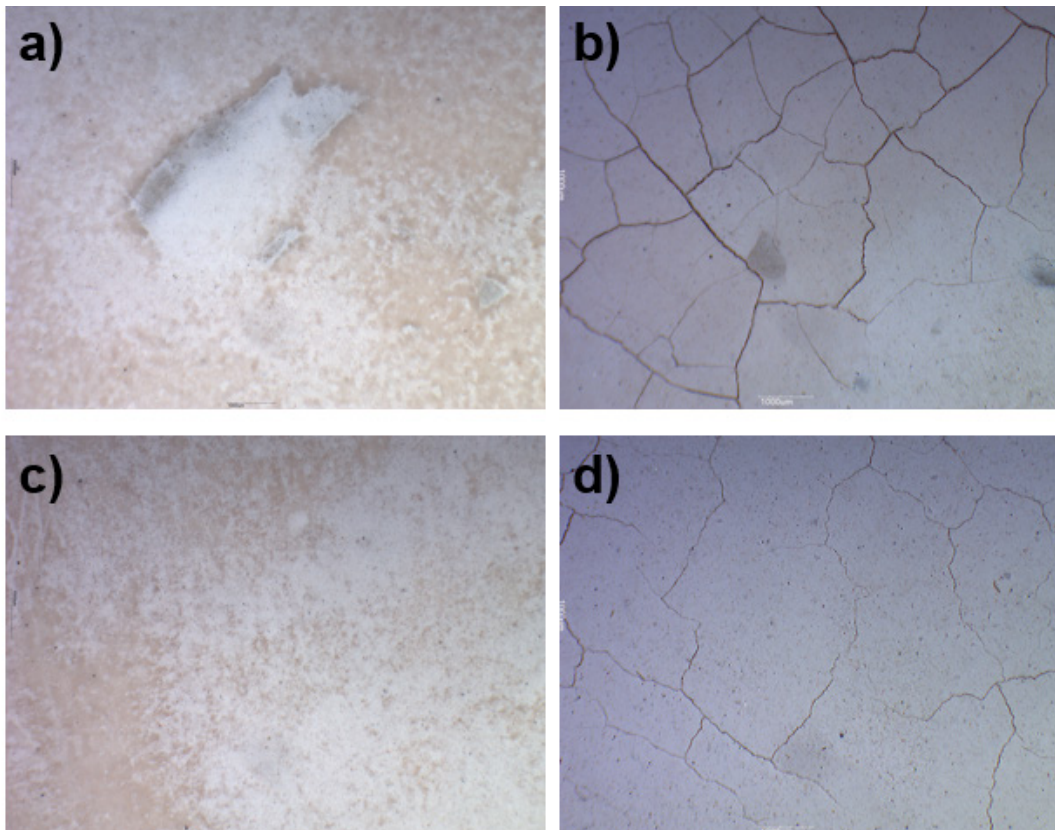


4.5. INTEMPERISMO ACELERADO

El ensayo de intemperismo acelerado, provocó la formación de grietas y de una superficie craquelada observable a simple vista, tanto en la muestra de GP/mica, como la de GP/perlita; lo cual se observó con mayor detalle por medio del microscopio estereoscópico SMZ-171 marca Motic, **Figura 7**. Debido las discontinuidades, ambos especímenes se fracturaron, **Figura 8**. Desde el conformado de las muestras, se observó la presencia de burbujas de aire, a través de las cuales se incorporó la humedad generada durante el ciclo de intemperismo acelerado, favoreciendo la propagación de las grietas y del craquelado, **Figura 9**.

Figura 7. Microscopía estereoscópica a 1x antes y después de exposición a intemperismo acelerado. (a) GP/mica antes; (b) GP/mica después; (c) GP/perlita antes; (d) GP/perlita después

Debido a que se busca aplicar el material compuesto como paneles para muros, se debe mejorar el conformado de las muestras para evitar la formación de burbujas de aire dentro de las mismas; ya que, de no hacerlo, los paneles no podrían instalarse en exteriores, o interiores con ambientes húmedos con el caso de baños o cocinas.



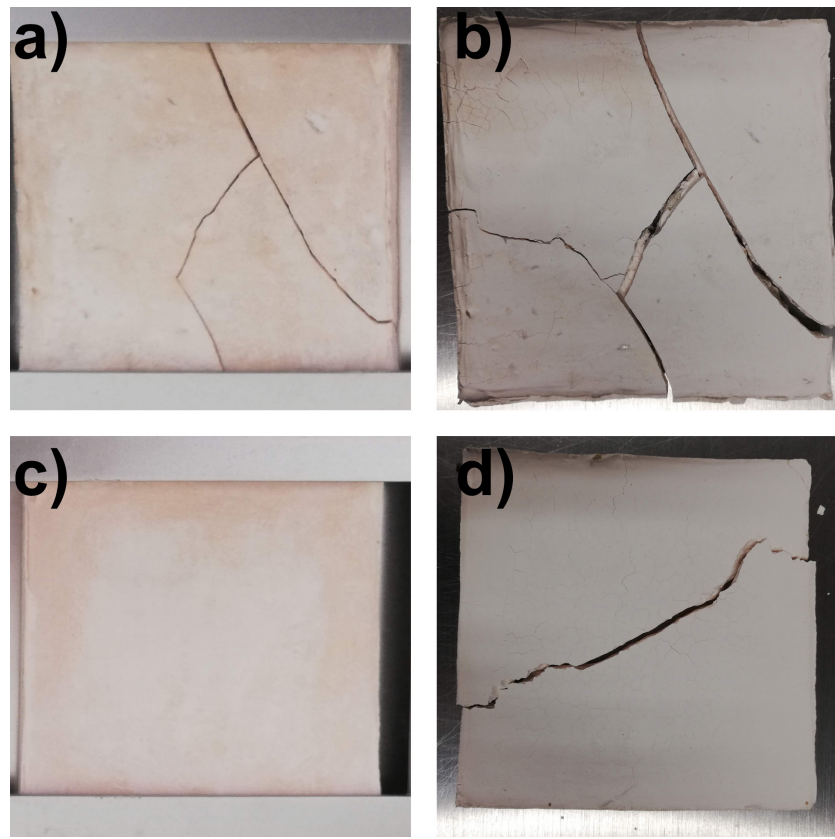


Figura 8. Fotografías antes y después de exposición a intemperismo acelerado. (a) GP/mica antes; (b) GP/mica después; (c) GP/perlita antes; (d) GP/perlita después



Figura 9. Propagación de grietas a través de burbujas de aire en el ensayo de intemperismo acelerado

4.6. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Los resultados de resistencia a la compresión (RC) obtenidos para los GP/agregado, mediante el diseño de experimento, se presentan en la **Tabla 7**.

Los valores de resistencia a la compresión oscilaron en el intervalo de 1.8 ± 0.33 a 5.2 ± 0.22 MPa. La resistencia más alta obtenida en este diseño fue la de la corrida experimental B5, la cual tuvo las condiciones siguientes: agregado de perlita, con relación MK/perlita de 0.025 y un curado a 70 °C y 85 %HR.

Los resultados de la **Tabla 7** se analizaron estadísticamente, para determinar el factor o interacción de factores que presentan una influencia significativa sobre la resistencia a la compresión de los GP/agregados, y su validez. El análisis estadístico incluyó el análisis de la varianza ANOVA y el análisis de los efectos estandarizados, representado por un gráfico de Pareto.

Tabla 7. Resultados de las corridas del diseño de experimento factorial en dos bloques con un punto central

Bloque	Corrida	Tipo de agregado	A	B	C	RC a 7d*	Desviación estándar
			°C	% HR	%p	MPa	
A	A1	Mica	60	90	3.75	3.0	0.08
	A2	Mica	50	95	5.00	1.8	0.28
	A3	Mica	50	85	2.50	3.4	0.59
	A4	Mica	70	95	2.50	2.5	0.24
	A5	Mica	70	85	5.00	2.2	0.15
B	B1	Perlita	50	95	2.50	4.0	0.73
	B2	Perlita	70	95	5.00	4.9	0.34
	B3	Perlita	60	90	3.75	3.5	0.71
	B4	Perlita	50	85	5.00	3.1	0.33
	B5	Perlita	70	85	2.50	5.2	0.17

*Promedio de tres muestras

4.6.1. Análisis de la varianza ANOVA

El análisis de la varianza (ANOVA) de los factores estudiados, se presenta en la **Tabla 8**. Los factores con valor-*P* menores a 0.05, para un nivel de confianza del 95 %, se consideraron estadísticamente significativos sobre el factor de respuesta (resistencia a la compresión). El valor R^2 se empleó para determinar si el modelo estimado, explica los datos observados para el factor de respuesta. Dado que R^2 sobrestima la habilidad del modelo para predecir la respuesta, también se evaluó el valor R^2_{ajustado} , con respecto a los grados de libertad.

Tabla 8. Tabla ANOVA del diseño experimental

Factor	Suma de cuadrados	G.l.	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
A: Temperatura	2.66667	1	2.66667	5.97	0.0250
B: Humedad	0.201667	1	0.201667	0.45	0.5100
C: Contenido de agregado	3.375	1	3.375	7.56	0.0132
AB	0.24	1	0.24	0.54	0.4729
AC	0.96	1	0.96	2.15	0.1598
BC	5.04167	1	5.04167	11.29	0.0035
Bloques	18.0337	5	3.60673	8.08	0.0004
Error total	8.035	18	0.446389		
Total (corr.)	38.5537	29			

$$R^2 = \mathbf{79.1589} \%$$

$$R^2_{\text{ajustada por G.l.}} = \mathbf{66.4227} \%$$

$$\text{Error estándar del est.} = \mathbf{0.668123}$$

$$\text{Error absoluto medio} = \mathbf{0.394111}$$

$$\text{Estadístico Durbin-Watson} = 2.58574 \text{ (} P=0.7286 \text{)}$$

$$\text{Auto correlación residual de Lag 1} = -0.301591$$

El ANOVA mostró que los factores significativos estadísticamente para el desarrollo de la resistencia a la compresión en los GP/agregados, fueron: A, la temperatura; C, el contenido de agregado; BC, la interacción entre humedad y contenido de agregado y el tipo de agregado, que en el DDE son los bloques. El valor de R^2 indicó que el modelo obtenido, explicó el 79.16 % de los datos experimentales para la

resistencia a la compresión, con un nivel de confianza del 95%. El valor R^2_{ajustado} del 66.42 %.

La ecuación de regresión ajustada a los datos es (E3):

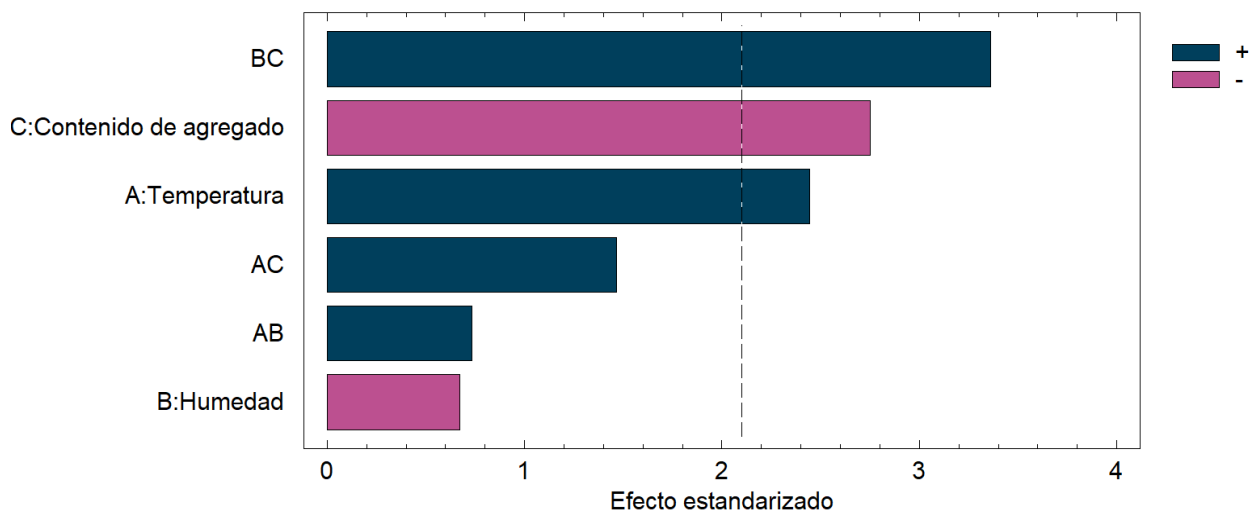
$$(E3) \quad RC = 28.8817 + 0.0333333 * A - 0.293333 * B - 6.9 * C + 0.0733333 * BC$$

4.6.2. Análisis de los efectos estandarizados (Gráfico de Pareto)

El gráfico de Pareto es una representación de los efectos de cada factor estadísticamente significativo, desplegados en orden decreciente de su magnitud absoluta con un nivel de confianza del 95 % (nivel de significancia del 5 %). Los factores, representados en barras, que rebasan la línea vertical, son estadísticamente significativos. El color de las barras determina si el efecto de cada factor es positivo (azul) o negativo (rosa), **Figura 10**.

El análisis del gráfico de Pareto indicó que la interacción entre el contenido de agregado y la humedad, el contenido de agregado y la temperatura de curado fueron estadísticamente significativas, en el orden decreciente: interacción contenido de agregado y humedad > contenido de agregado > temperatura (BC>C>A). Los factores BC y A tuvieron un efecto positivo, es decir, su aumento incrementó la resistencia a la compresión de los GP/agregados; mientras

Figura 10. Gráfico de Pareto estandarizado del diseño experimental

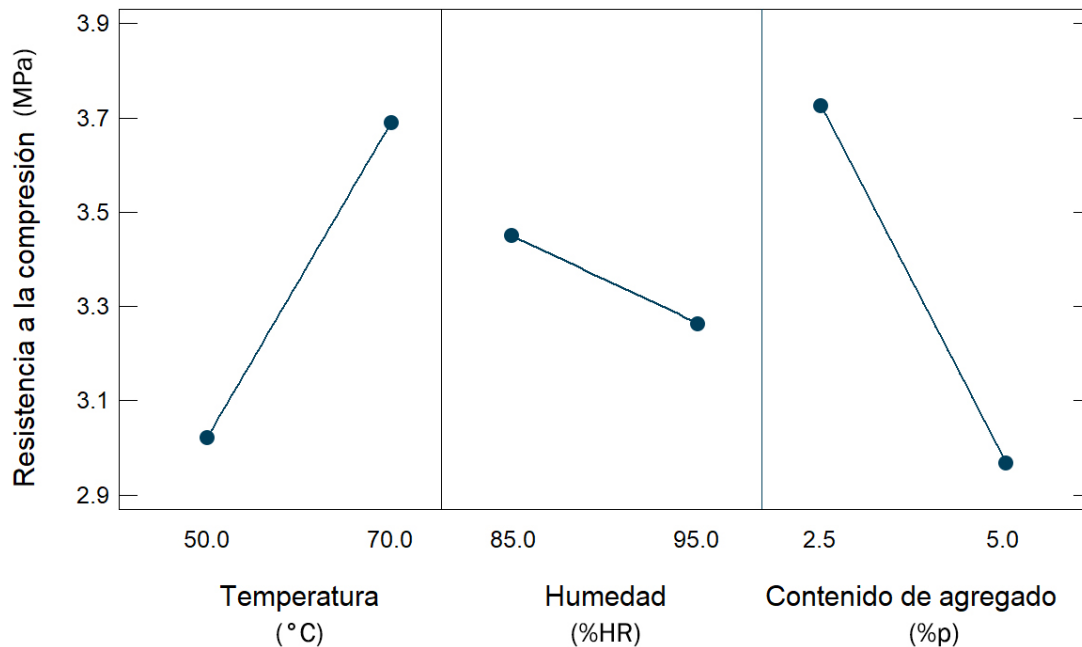


que los factores C y B tuvieron un efecto negativo. En cuanto al porcentaje de HR de curado (factor B), si bien su aumento de 85 %HR a 95 %HR tuvo un efecto negativo en este estudio, las publicaciones indicaron que un porcentaje por debajo de 75 %HR favorece el desarrollo de carbonatación, por lo que se debe mantener un valor de alrededor de 80 %HR, donde los poros de las muestras se llenan de agua, evitando la disolución del CO_2 ambiental en el sistema (Criado et al., 2005).

Los efectos de los factores estudiados se ilustran en la Gráfica de efectos principales (**Figura 11**).

La superficie de respuesta para la resistencia a la compresión (**Figura 12**) se muestra como una función de la humedad relativa durante el curado y el contenido de agregado a una temperatura de 70 °C. A medida que la humedad relativa del curado y el contenido de agregado disminuye, la resistencia a la compresión aumenta, lo cual está representado en el área de color amarillo de la gráfica, **Figura 12**.

Figura 11. Gráfica de efectos principales para resistencia a la compresión



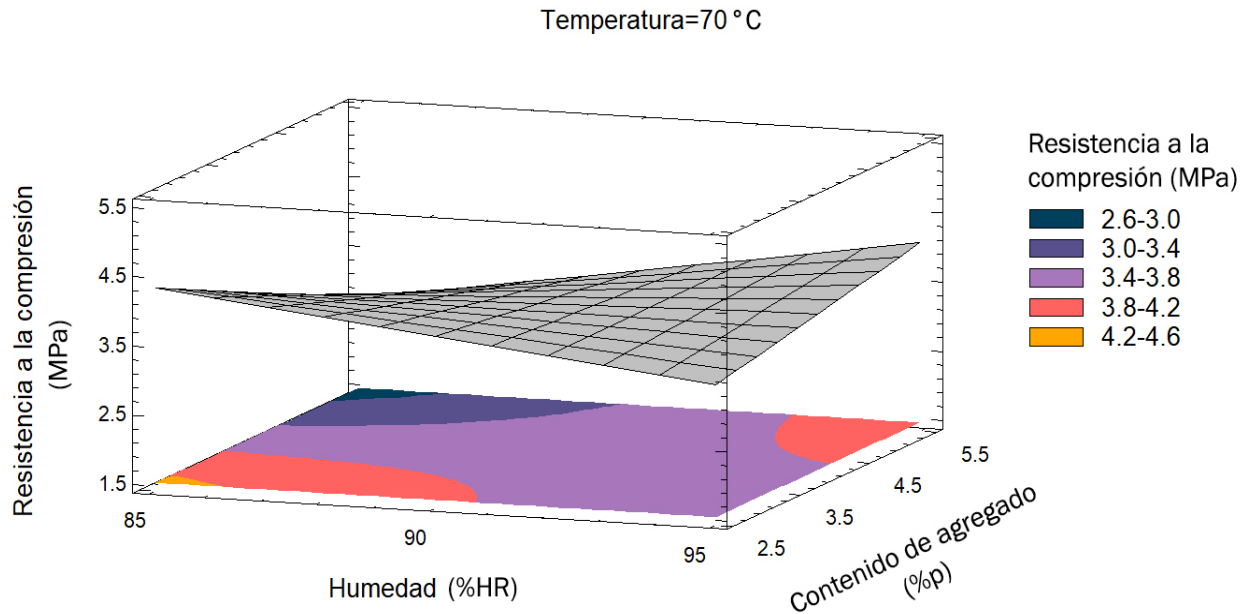
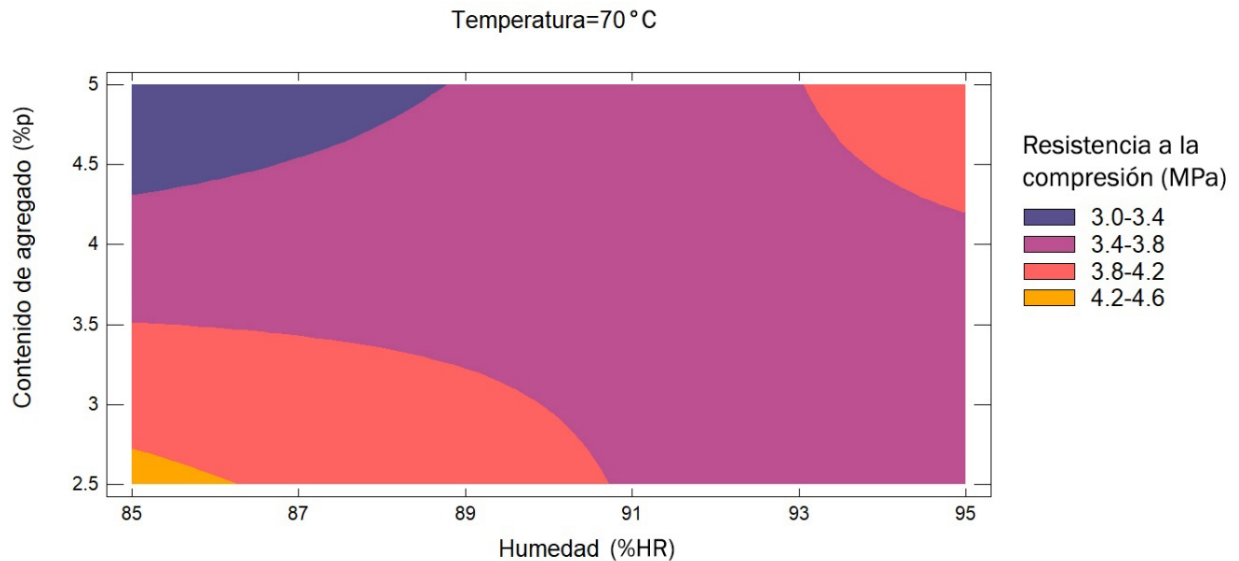


Figura 12. Superficie de respuesta estimada

El gráfico de contorno representa el comportamiento de la superficie en dos dimensiones. Cada franja representa un número de combinaciones de humedad relativa y contenido de agregado, para los cuales la resistencia a la compresión esperada se encuentra en el intervalo indicado (**Figura 13**).

Figura 13. Contorno de la superficie de respuesta estimada



4.7. CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES COMPUESTOS

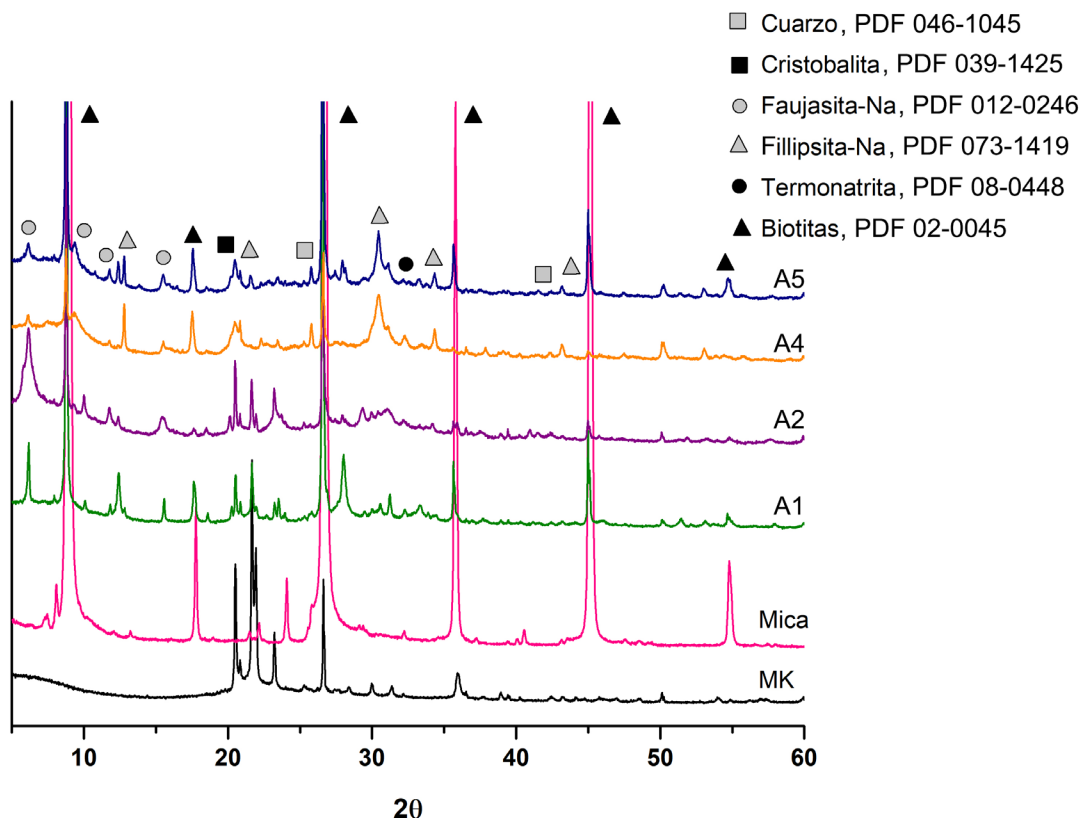
4.7.1. Material compuesto GP/mica

El material compuesto de matriz de GP y agregado de mica se caracterizó por las técnicas de DRX y FTIR.

4.7.1.1. Interpretación de la difracción de rayos X en polvos de GP/mica

El MK, la mica y el material compuesto GP/mica, se caracterizaron por la técnica de DRX, **Figura 14**. La mica se identificó como una de tipo biotita, con señales de intensidad alta. El difractograma del MK mostró un halo entre 20 y 30° de 2θ , lo que se relaciona con la presencia de material amorfo y reactivo; el cual, tras la activación alcalina, se desplazó entre los ángulos 25 y 35° de 2θ . En el GP/mica, las señales de los polimorfos de SiO_2 persistieron con intensidad menor, en comparación al MK, así como las identificadas con las zeolitas del tipo faujasita-Na y filipsita-Na; y en 32° de 2θ , correspondiente a la termonatrita o carbonato de sodio hidratado.

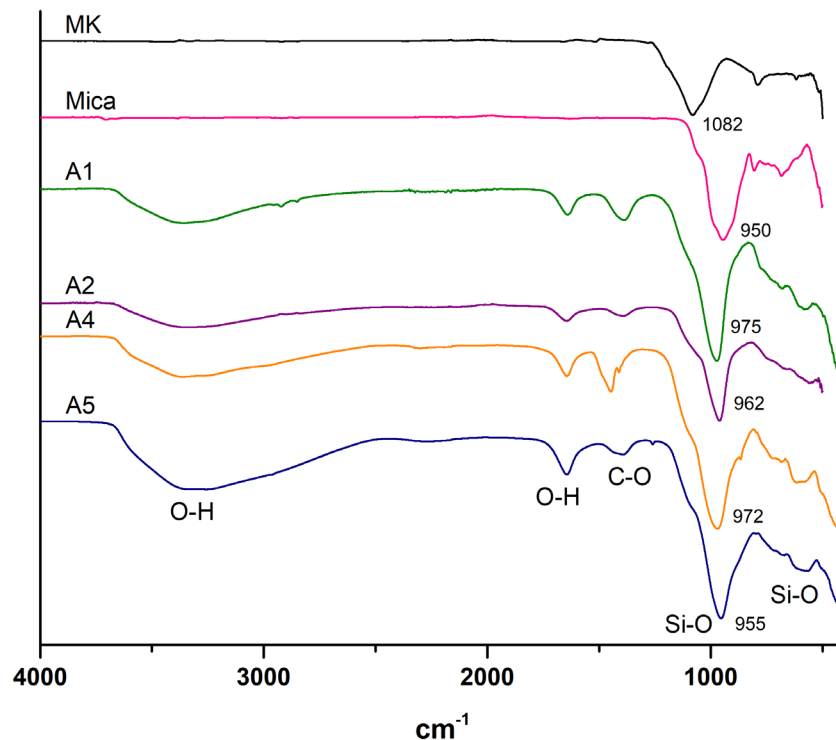
Figura 14. Difractograma de RX comparativo del MK, mica y GP/mica



4.7.1.2. Interpretación de la espectroscopía de absorción infrarroja de GP/mica

Los espectros de FTIR del MK, la mica y el material compuesto GP/mica con 7 días de curado, se compararon, **Figura 15**. Las señales en 3456 y 1681 cm^{-1} presentes en el espectro del GP/mica, se relacionaron con la presencia de H_2O en el sistema (Phair & Van Deventer, 2002; Rovnaník, 2010; Sakulich et al., 2009), ausente en el MK y en la mica. Las señales ubicadas en 1456 y 848 cm^{-1} , se relacionaron a los enlaces C-O, las cuales se han atribuido a la carbonatación (Pacheco-Torgal et al., 2015; Phair & Van Deventer, 2002; Sakulich et al., 2009). El desplazamiento de la banda predominante de 1082 cm^{-1} en el MK, a 955 cm^{-1} para la muestra A5, se asoció a la modificación de la estructura del material precursor mediante la geopolimerización (Pacheco-Torgal et al., 2015; Phair & Van Deventer, 2002; Rovnaník, 2010; Sakulich et al., 2009). Mientras que, las señales en 792 y 576 cm^{-1} se han relacionado a las vibraciones diferentes de los enlaces Si-O (Pacheco-Torgal et al., 2015; Phair & Van Deventer, 2002; Sakulich et al., 2009).

Figura 15. Espectro de IR comparativo del MK, mica y GP/mica



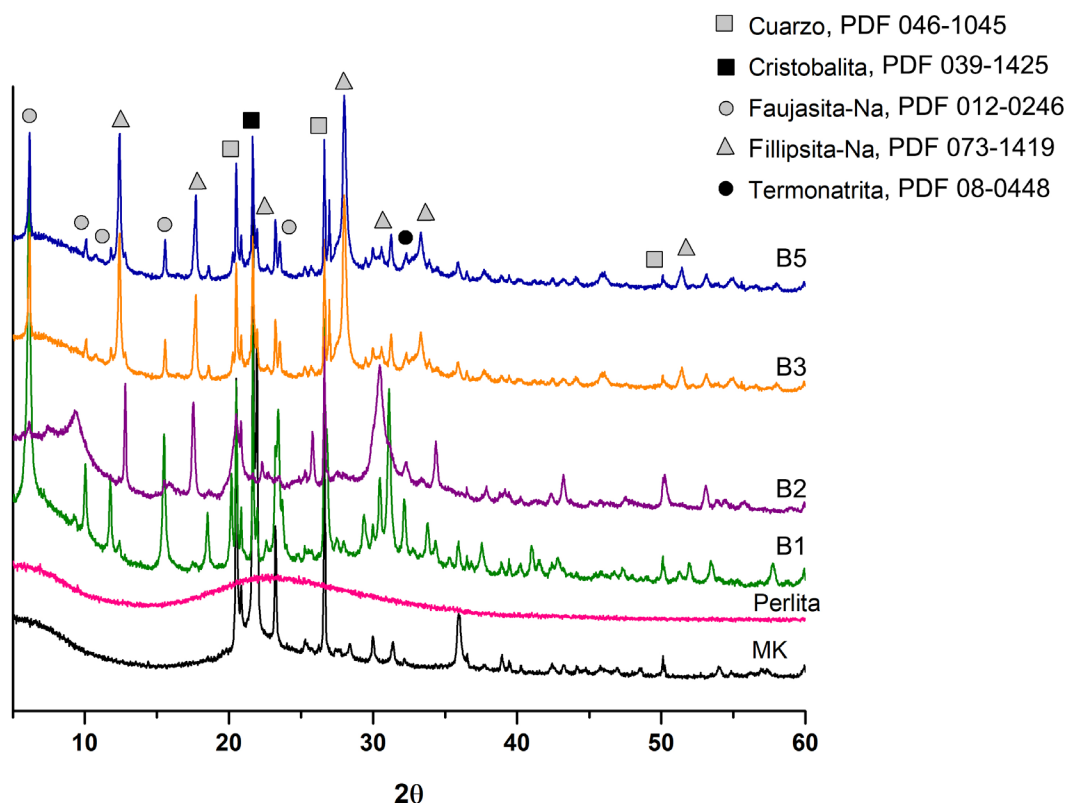
4.7.2. Material compuesto GP/perlita

El material compuesto con matriz de GP y agregado de perlita se caracterizó por las técnicas de DRX y FTIR.

4.7.2.1. Interpretación de la difracción de rayos X en polvos de GP/perlita

El MK, la perlita y el material compuesto GP/perlita, se caracterizaron por la técnica de DRX, **Figura 16**. La perlita presentó una estructura amorfa, con un halo entre 17 y 30° de 2θ . El difractograma del MK mostró un halo entre 20 y 30° de 2θ , indicativo de la reactividad del material precursor; el cual, tras la activación alcalina, se desplazó entre los ángulos 27 y 38° de 2θ . El GP/perlita, mostró las señales de los polimorfos de SiO_2 , de intensidad menor, en comparación al MK; así como las señales de las zeolitas del tipo faujasita-Na y fillipsita-Na y la de la termonatrita o carbonato hidratado de sodio en 32° de 2θ .

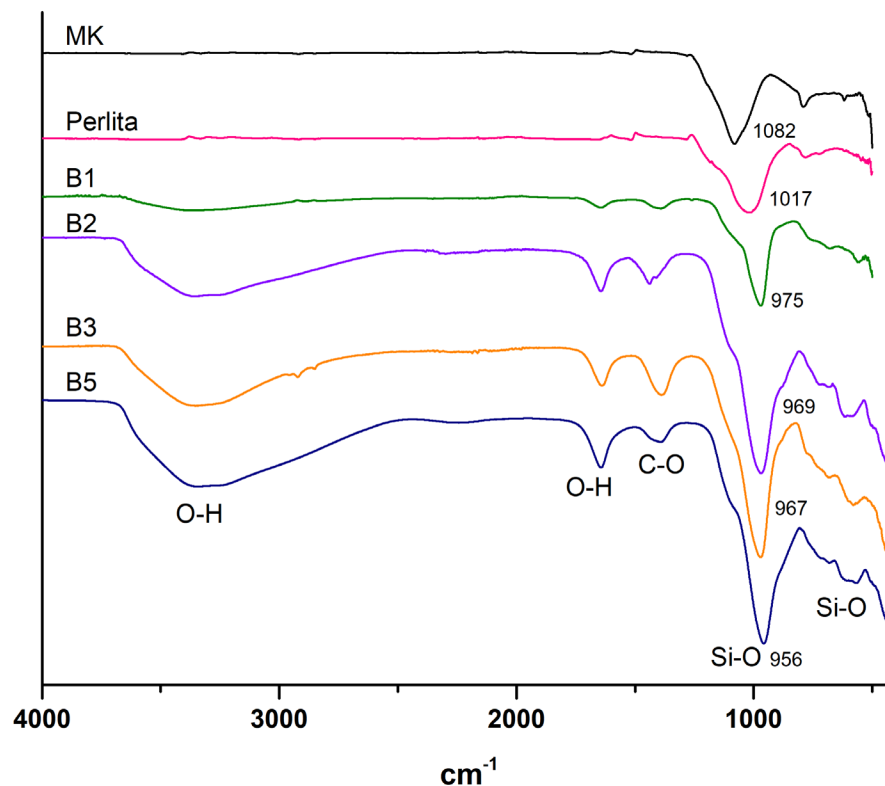
Figura 16. Difractograma de RX comparativo del MK, perlita y GP/perlita



4.7.2.2. Interpretación de la espectroscopía de absorción infrarroja de GP/perlita

Se caracterizó el MK, la perlita y el material compuesto GP/perlita a los 7 días de curado, por la técnica de FTIR para comparar sus espectros, **Figura 17**. En el sistema GP/perlita, las señales en 3452 y 1662 cm^{-1} se relacionan a las vibraciones de tensión y flexión del enlace O-H, respectivamente (Phair & Van Deventer, 2002; Rovnaník, 2010; Sakulich et al., 2009); estas son indicativas del grado de hidratación de las muestras (mayor para la muestra B5, en comparación con las demás), y están ausentes en el MK y en la perlita (Phair & Van Deventer, 2002). La banda en 1460 cm^{-1} del GP/perlita, se relacionó con las vibraciones de enlaces O-C, correspondientes a la carbonatación, debido a que el CO_2 de la atmósfera se incorporó y difundió a través de la red de poros de la muestra, donde reaccionó con el agua presente, formando ácido carbónico (H_2CO_3), el cual, a su vez, reaccionó con el NaOH, produciendo los carbonatos

Figura 17. Espectro de IR comparativo del MK, perlita y GP/perlita



(García-Mejía & Chávez-García, 2016; Pacheco-Torgal et al., 2015; Phair & Van Deventer, 2002; Sakulich et al., 2009); lo cual se verificó con algunas publicaciones, las cuales afirman que los GPs activados con soluciones alcalinas concentradas, son susceptibles a desarrollar carbonatación (Pacheco-Torgal et al., 2015). La comparación de los tres espectros mostró que la banda predominante del MK se ubicó en los 1082 cm^{-1} , mientras que la de la perlita y la del GP/perlita, se ubican en 1017 y 969 cm^{-1} , respectivamente. El desplazamiento de la banda principal, entre el MK y el GP/perlita, de 1082 a 969 cm^{-1} , se relacionó a la sustitución parcial de Si por Al, formando el enlace Si-O-Al, debido a la disolución del precursor durante la geopolimerización, lo que ha sugerido que se debe a la reorganización de la estructura en la formación del gel N-A-S-H (Pacheco-Torgal et al., 2015; Phair & Van Deventer, 2002; Rovnaník, 2010; Sakulich et al., 2009). En el espectro del GP/perlita, la señal en 848 cm^{-1} , se relacionó con las vibraciones de flexión de enlaces $[\text{CO}_3]^{2-}$ (Pacheco-Torgal et al., 2015); las señales en 792 y 576 cm^{-1} se asociaron a las vibraciones de enlaces Si-O (Pacheco-Torgal et al., 2015; Phair & Van Deventer, 2002; Sakulich et al., 2009).

4.8. CONCLUSIONES DE LA ETAPA EXPERIMENTAL

- La caracterización de los materiales precursores por DRX y FTIR, confirmó la transformación del caolín a MK tras la calcinación del primero a 800 °C por 3 h.
- La caracterización del MK por FRX indicó la factibilidad de obtener GPs cementantes a partir de dicho precursor, por su relación Si/Al igual a 2.06.
- Durante el ensayo de intemperismo acelerado se observó que la humedad se introduce a través de las burbujas de aire de la muestra, provocando su ruptura. Para evitar dicho comportamiento, es necesario mejorar las condiciones de conformación, con el fin de evitar la formación de burbujas de aire.
- La resistencia a la compresión mayor (5.2 MPa), se obtuvo con perlita como agregado en 2.5 % y condiciones de curado de 70 °C y 85 %HR.
- La morfología y tamaño de partícula de los agregados influyó en la resistencia a la compresión. La perlita se adicionó en polvo, por lo que se adhirió de manera más uniforme en la matriz de GP, obteniendo una resistencia mayor, en comparación con la mica que se adicionó en láminas.
- De los factores estudiados, los que tienen influencia significativa en el desarrollo de resistencia a la compresión son la interacción entre el contenido de agregado y la humedad, el contenido de agregado y la temperatura.
- La temperatura tiene un efecto positivo en el desarrollo de resistencia a la compresión, mientras que la humedad y el contenido de agregado tienen un efecto negativo.
- La caracterización por DRX confirmó la reacción de geopolimerización para GP/mica y GP/perlita, debido al desplazamiento del halo relacionado con la presencia de material amorfo desde 20 ° a 30 °

de 2θ en el MK, hasta $\sim 25^\circ$ a 35° de 2θ en los materiales compuestos.

- La caracterización por DRX de los materiales compuestos obtenidos, mostró que la reacción de geopolimerización generó estructuras cristalinas de zeolitas. Este tipo de estructura es abierta, por lo que reduce la resistencia a la compresión de las muestras y se debe evitar su formación en los GP. Se observó que el experimento A2 tuvo las señales de zeolitas más intensas y presentó la resistencia a la compresión menor del DDE.
- La caracterización por FTIR de los materiales compuestos obtenidos confirmó la reacción de geopolimerización, por medio del desplazamiento de la banda predominante desde 1082 cm^{-1} en el MK, a $\sim 955\text{ cm}^{-1}$ para los materiales compuestos.
- La caracterización por DRX y FTIR de los materiales compuestos, indicó la presencia de carbonato de sodio en el sistema, el cual se formó por la incorporación de CO_2 ambiental durante el precurado o el curado.

Capítulo 5

**PROPUESTA DE PANEL
ARQUITECTÓNICO
PREFABRICADO PARA
MUROS**

5.1. PANEL ARQUITECTÓNICO PREFABRICADO PARA MUROS

Los alcances del proyecto de investigación se analizaron por medio de la metodología de niveles de madurez de la tecnología (TRL, por sus siglas en inglés, Technology Readiness Level), para medir el grado de madurez de la tecnología desarrollada, es decir, los paneles arquitectónicos prefabricados para muros de geopolímero (GP) y agregados minerales (GP/agregados). Con base en el resultado de la evaluación por TRL, se propusieron los pasos a seguir para hacer la transferencia tecnológica entre el laboratorio y su aplicación en construcciones reales.

Los resultados de la caracterización de los materiales compuestos de GP/agregados, mostraron que, para aplicarse como paneles arquitectónicos prefabricados para muros, se deben mejorar las condiciones químicas y físicas de las muestras. Además, es necesario someter al material a pruebas adicionales a las realizadas durante este trabajo de investigación, con el fin de conocer sus características y determinar su cumplimiento con las especificaciones requeridas para su aplicación.

Con base en la bibliografía consultada, el experimento realizado y el diseño propuesto de componentes constructivos explorados, en este capítulo se describen las condiciones que influyen en la formación de características químicas y físicas desfavorables para los GPs, y cómo estas se deberían modificar para mejorar la resistencia a la compresión y el comportamiento ante la intemperie de los materiales. También se describen las pruebas adicionales a realizar al material, así como los valores que deben cumplir para ser adecuados para su aplicación como paneles arquitectónicos prefabricados para muros, según las normas de la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM, por sus siglas en inglés, American Society for Testing and Materials)

Para finalizar el capítulo, se proponen las dimensiones de los paneles arquitectónicos prefabricados para muros de

GP/agregados, su aplicación como elemento constructivo en detalle, dentro del sistema edificio, como un muro no estructural, incluido el sistema de instalación propuesto, que en las etapas posteriores a este trabajo deben desarrollarse, manufacturarse, probarse y madurarse mediante un proceso TRL.

5.2. METODOLOGÍA TRL

La metodología TRL es una manera de medir el grado de madurez de una tecnología. Considera 9 niveles, los cuales van desde los principios básicos de una tecnología nueva hasta ser probado con éxito en un entorno real.

En este trabajo de investigación, el material compuesto investigado de matriz de GP y agregados minerales, se encontró en TRL 4 (**Tabla 9**), ya que se comprobó la factibilidad de fabricar materiales cementantes a una temperatura de curado de 70 °C, la cual es mínima en comparación con los 1450 °C requeridos en la fabricación del cemento Portland, y se sometió el material a pruebas de resistencia a la compresión e intemperismo acelerado. En cuanto a los paneles arquitectónicos prefabricados para muros, alcanzó el TRL 3, ya que se comprobó la factibilidad de fabricar paneles arquitectónicos prefabricados para muros del material GP/agregados. El TRL 4 está en proceso, ya que para demostrar que el material compuesto es adecuado para aplicarse como panel arquitectónico prefabricado para muros, deben realizarse experimentos adicionales para mejorar sus condiciones químicas y físicas, los cuales se describen en 6.3. Condiciones químicas y físicas, así como someterse a pruebas adicionales, las cuales se establecen por la norma ASTM C1325 (ASTM, 2018a), y se describen en 6.4. Pruebas adicionales.

Para lograr la transferencia tecnológica del elemento constructivo a su aplicación en edificios, se deberá comprobar su funcionalidad en un entorno relevante (TRL 5 y 6) y en un entorno real (TRL 7 a 9). Como parte de ese proceso,

en el 6.5. Diseño del panel y aplicaciones, se proponen las dimensiones del panel prefabricado para muros del material GP/agregados y su propuesta de instalación.

Tabla 9. Niveles TRL del material compuesto GP/agregados y del panel GP/agregados

Nivel TRL	Etapa	Intención de la etapa	Alcance para el material compuesto GP/agregados
TRL 1	Principios básicos observados y reportados	Transición desde la investigación científica a la investigación aplicada.	Elaboración del Estado del Arte.
TRL 2	Propuesta de solución	La teoría y los principios específicos son enfocados en la aplicación específica para definir el concepto del producto.	Se definió generar materiales compuestos con matriz de geopolímero y dos agregados minerales: la mica y la perlita.
TRL 3	Prueba de la función crítica	Se inicia el proceso de desarrollo tecnológico con la generación de estudios analíticos y de laboratorio aplicados al producto.	Se probó la viabilidad de generar materiales compuestos con matriz cementante, con una síntesis a temperatura ambiente y un curado a menos de 100 °C, la cual es una temperatura mínima, en comparación con los 1450 °C requeridos durante la fabricación de cemento.
TRL 4	Validación del prototipo en ambiente controlado de laboratorio	La implementación de un prototipo es realizada y probada. Los componentes se prueban tanto por separado, como integrados en un sistema.	Se diseñó un experimento, donde se probó la resistencia a la compresión de los materiales compuestos. Se determinaron los factores con influencia significativa sobre esa propiedad. En cuanto al desarrollo del panel de este material, es necesario realizar las pruebas adicionales descritas en la Tabla 10 , para validarlo como elemento constructivo.

5.3. CONDICIONES QUÍMICAS Y FÍSICAS DEL MATERIAL COMPUESTO

La caracterización de los materiales compuestos de GP y agregados minerales, por las técnicas de DRX, FTIR, resistencia a la compresión e intemperismo acelerado, indicó que se debe evitar la formación de carbonatos de sodio y de zeolitas en la estructura química de los geopolímeros, así como la formación de burbujas de aire en la superficie de las muestras de GP/agregados.

5.3.1. Formación de zeolitas

La caracterización por DRX de los GP/agregados, indicó que durante la reacción de geopolimerización, se formaron estructuras cristalinas de zeolitas. La comparación entre el análisis por DRX y los resultados de los ensayos de resistencia a la compresión, mostró que la muestra que presentó a las señales de faujasita-Na hidratada con intensidad mayor en DRX, fue la que obtuvo la resistencia a la compresión menor del DDE, por lo que se busca evitar la formación de las fases correspondientes a zeolitas y carbonatación, para obtener un material compuesto con estructura amorfa.

La formación de zeolitas en los GP de MK activados con NaOH, según publicaciones, depende de la relación de Si/Na (B. Zhang et al., 2009), por lo que se propone realizar un experimento variando dicha relación, y dar seguimiento por la técnica de DRX para determinar qué valor de Si/Na genera una estructura amorfa en los GP/agregados. Se espera que, si el GP/agregados tiene una estructura amorfa, la resistencia a la compresión aumentará, en comparación con los GP/agregados obtenidos en este estudio, los cuales presentaron una estructura semi cristalina.

5.3.2. Carbonatación

El análisis por DRX y FTIR de los materiales compuestos GP/agregados, indicó la presencia de carbonato hidratado de sodio o termonatrita en las muestras. La carbonatación se

produce cuando el CO_2 ambiental se disuelve en el sistema a través de los poros de la muestra. Este fenómeno tiene un efecto negativo sobre la resistencia a la compresión de los GP, porque reduce el pH del sistema y desacelera la reacción.

Para evitar la carbonatación de los GP/agregados, se proponen cuatro acciones. La primera es mantener las muestras selladas durante el proceso de precurado, ya que, en el caso de esta investigación, dicho proceso se llevó a cabo en condiciones no controladas, a temperatura ambiente, lo cual permitió la incorporación del CO_2 ambiental en las muestras.

La segunda acción es controlar el porcentaje de HR durante el curado. El análisis estadístico realizado en esta investigación concluyó que el aumento en la humedad relativa de 85 %HR a 95 %HR tuvo un efecto negativo en el desarrollo de resistencia a la compresión de los materiales compuestos. Sin embargo, las publicaciones indicaron que un porcentaje por debajo de 75 %HR favorece el desarrollo de carbonatación, por lo que se debe mantener un valor de alrededor de 80 %HR, donde los poros de las muestras se llenan de agua, evitando la disolución del CO_2 ambiental en el sistema (Criado et al., 2005).

Los GP activados con soluciones alcalinas concentradas, como es el caso de esta investigación, tienen un riesgo alto de desarrollar carbonatación (Pacheco-Torgal et al., 2015); sin embargo, el aumento en la concentración del activador alcalino tiene un efecto positivo sobre la resistencia a la compresión de los GP (García-Mejía & Chávez-García, 2016; Phair & Van Deventer, 2002; Sakulich et al., 2009; F. Zhang et al., 2017). Por lo tanto, la tercera acción que se propone es realizar un experimento variando la molaridad de la solución activadora, para encontrar la concentración que permita sintetizar materiales con una resistencia a la compresión adecuada para su aplicación, y a la vez evite la formación de carbonatos.

Por último, se propone reducir el número y tamaño de las burbujas de aire en las muestras, ya que la presencia de ellas favorece la incorporación del CO_2 ambiental en el sistema. Las acciones propuestas para mejorar esta condición física de las muestras se describen a continuación.

5.3.3. Burbujas de aire

La presencia de burbujas de aire en las muestras de GP/agregados, afectó negativamente su resistencia a la compresión. En primer lugar, porque al aplicar la carga durante el ensayo de resistencia a la compresión, las burbujas favorecen la propagación de grietas, y, en segundo lugar, porque la presencia de burbujas permite la disolución del CO_2 ambiental en el sistema, favoreciendo la carbonatación. En el caso de la prueba de intemperismo acelerado, la humedad penetró en las muestras a través de las burbujas de aire, provocando la fractura de las muestras.

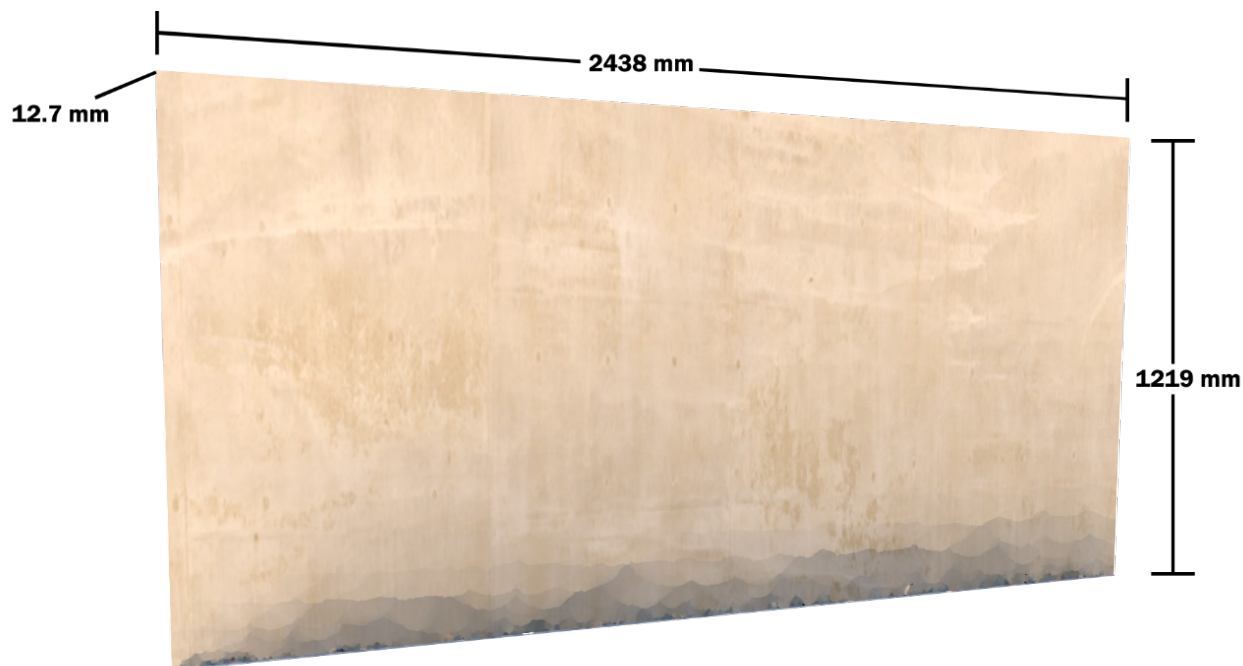
Para evitar la formación de burbujas de aire en las muestras de GP/agregados, se propone hacer la mezcla más fluida. Para encontrar la relación de líquido/sólido adecuada, es necesario realizar un experimento variando dicha relación, y dar seguimiento por DRX y FTIR, ya que adicionar una cantidad mayor de sodio favorece la formación de carbonatos y de zeolitas. En cuanto a la consolidación de los materiales, se propone aplicar presión después de colocar la pasta en el molde, para compactarla.

5.4. PRUEBAS ADICIONALES

Los materiales compuestos GP/agregados, deben someterse a pruebas adicionales a las realizadas en esta investigación, para determinar sus propiedades, y su cumplimiento con los valores mínimos establecidos por la norma ASTM 1325 para unidades de base de cemento reforzado de malla de fibra sin asbesto (ASTM, 2018a), **Tabla 10**.

Tabla 10. Métodos de prueba y valores mínimos establecidos por la norma ASTM C1325

Propiedad	Método de prueba	Valor mínimo
Resistencia a la flexión	ASTM C947	52.7 kg/cm ² (750 psi)
Absorción de agua en 24 h	ASTM C473	15 % de su peso
Resistencia a la extracción de clavos	ASTM C473	79 kg (125 lbf)
Incombustibilidad	ASTM E136	Aprobado
Propagación de flama	ASTM E84	Índice de propagación de flama <10
Generación de humo	ASTM E84	Índice de generación de humo <5
Congelamiento (procedimiento B)	ASTM C666	50 ciclos sin deterioro
Resistencia a la indentación	ASTM D2394	87.88 kg/cm ² (1250 psi)
Resistencia al corte por adhesión	ANSI A118.4	3.52 kg/cm ² (50 psi)
Resistencia al moho	ASTM G21	0

Figura 18. Dimensiones del panel de material compuesto GP/agregado

5.5. DISEÑO DEL PANEL Y PROPUESTA DE APLICACIÓN

Las medidas del panel de largo 2438 mm (96 in), ancho 1219 mm (48 in) y espesor de 12.7 mm ($\frac{1}{2}$ in), **Figura 18**, se diseñaron de acuerdo con la norma ASTM C1325 (ASTM, 2018a).

En el mercado existen paneles de este tipo, los cuales se fabrican con matriz de cemento Portland, uno de ellos es el tablero de cemento USG Durock. Las propiedades físicas de los paneles de GP/perlita, se compararon con las del USG Durock, **Tabla 11**. La composición química del material compuesto GP/perlita se muestra en la **Tabla 12** y la del panel de cemento USG Durock en la **Tabla 13**.

El panel arquitectónico prefabricado para muros de GP/agregados, se propone para instalarse como elementos exteriores e interiores no estructurales, en un sistema de postes metálicos, unidos entre sí por medio de tornillos, **Figura 19**. En comparación con otros sistemas constructivos de paneles, los cuales se fabrican de materiales compuestos con matriz de CP, el panel de GP/agregados tiene la ventaja de que su matriz es un GP, el cual requiere una temperatura de conformación mínima en comparación con los 1450 °C requeridos durante la fabricación del CP.

Tabla 11. Propiedades físicas de los paneles GP/perlita y Durock USG

Propiedades físicas	Panel GP/perlita	Panel USG Durock*
Altura (m)	1.22	1.22
Ancho (m)	2.44	2.44
Espesor (mm)	12.7	12.7
Peso por m ² (kg/m ²)	15.24	11.59
Densidad (kg/m ³)	1200	921.66

*(USG, 2005)

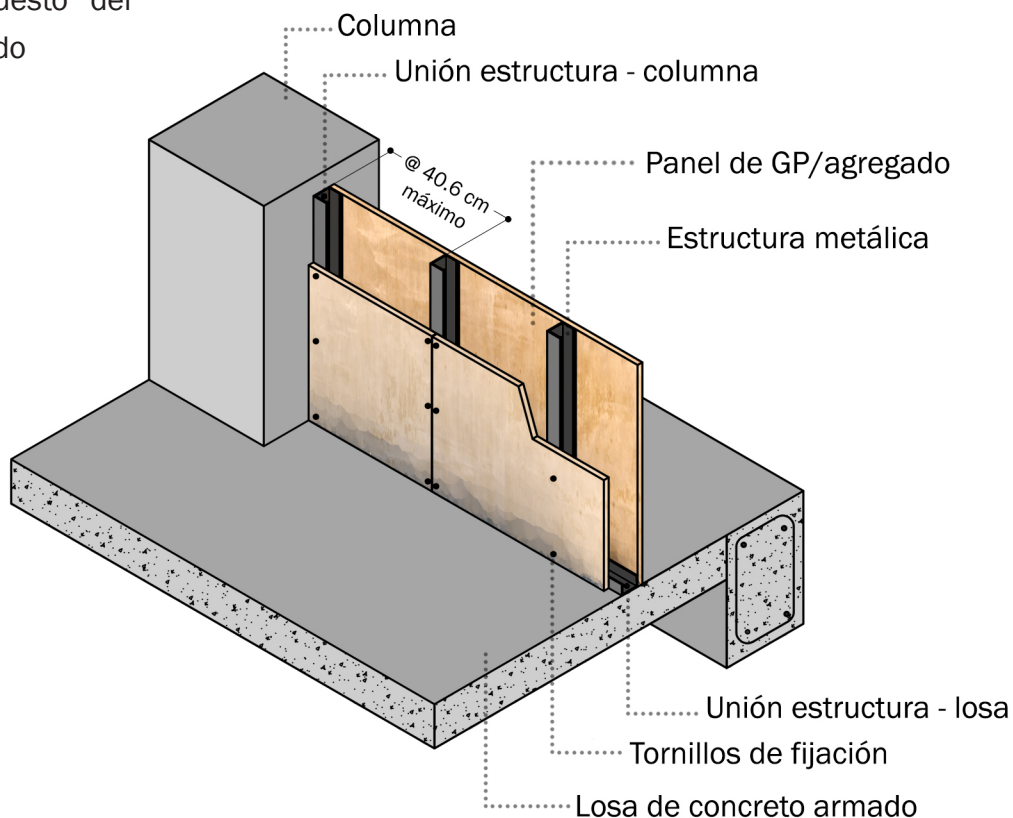
Tabla 12. Composición del panel compuesto prefabricado constituido de GP/perlita. Porcentaje de concentración por unidad de medida (m³)

Material	Concentración (%)
Metacaolín	73.06
NaOH	25.05
Perlita	1.82
Agua destilada	0.05

Tabla 13. Composición del panel prefabricado de cemento USG Durock (USG México y Latin America, 2015). Porcentaje de concentración por unidad de medida (m³)

Material	Concentración (%)
Cemento Portland	55
Dióxido de silicón	25
Óxido de aluminio	10
Perlita	10
Sulfato de calcio dihidratado	5
Sílice cristalina (cuarzo)	1.5

Figura 19. Sistema de instalación propuesto del panel GP/agregado



5.6. COMENTARIOS FINALES SOBRE LA PROPUESTA DEL ELEMENTO CONSTRUCTIVO

Se busca aplicar al material compuesto de GP y agregados minerales como paneles arquitectónicos prefabricados para muros. Para lograrlo, este trabajo de investigación debe continuar, con el objetivo de afinar las condiciones químicas y físicas de las muestras estudiadas, así como realizar pruebas adicionales para conocer las propiedades del material y su cumplimiento con las normas establecidas para este tipo de elementos de construcción.

Capítulo 6

CONCLUSIONES DEL PROYECTO

La industria de la construcción genera cantidades considerables de gases efecto invernadero, y dentro de ella, la industria del cemento sobresale, por los impactos ambientales asociados a su producción y su demanda cada vez mayor. Por ello, este trabajo de investigación ofrece a los responsables en la toma de las decisiones sobre el diseño y la construcción de las edificaciones, una alternativa a los paneles arquitectónicos prefabricados para muros de cemento Portland, mediante un aglutinante sintetizado y consolidado a una temperatura mínima, en comparación la de la producción del cemento Portland, lo cual va de acuerdo con los objetivos del desarrollo sostenible para combatir los efectos negativos del cambio climático.

Se sintetizaron materiales compuestos con matriz de geopolímero y agregados minerales a temperatura ambiente, y se consolidaron entre 50 °C a 70 °C y 85 %HR a 95 %HR. En comparación, la fabricación de cemento Portland requiere una temperatura de 1450 °C para los hornos rotatorios, los cuales se alimentan de combustibles fósiles, generando emisiones de gases efecto invernadero. Por su parte, los geopolímeros se sintetizan a temperatura ambiente y se consolidan a menos de 100 °C, por lo que la cantidad de combustible necesaria se reduce. En la fabricación de cemento Portland, las emisiones de CO₂ más significativas se deben a que la reacción química con la que el material adquiere su resistencia emite CO₂. Al emplear la reacción de geopolimerización para generar materiales cementantes, no se genera CO₂ como residuo.

En este trabajo de investigación se propuso aplicar a los materiales compuestos GP/agregados como paneles arquitectónicos prefabricados para muros; sin embargo, el material compuesto podría aplicarse como otros elementos constructivos prefabricados como plafones, recubrimiento, entre otros.

Los GP son materiales sustitutos del cemento, por lo que sus posibles aplicaciones son muy amplias. Las líneas de investigación propuestas para continuar el estudio de los GP y su aplicación como elementos constructivos son la utilización de residuos como precursores y el GP hecho en obra.

En este trabajo de investigación se utilizó como material precursor al MK, aunque es posible activar otros materiales que cumplan con la condición de ser aluminosilicatos. Resultan de interés materiales como la ceniza volante (residuo de las centrales termoeléctricas), la escoria de alto horno (residuo de la industria siderúrgica) y el cascajo de construcción. El uso de materiales de residuo como precursores en la síntesis de GPs tiene un doble beneficio, porque se utilizan temperaturas bajas para la fabricación de materiales cementantes y se aprovechan materiales de residuo de procesos industriales, los cuales se reutilizan en una cantidad mínima.

El GP hecho en obra, conocido como GP en un paso, consiste en mezclar en seco los precursores y el activador, y la reacción química para endurecer se realiza con la adición de agua, al igual que con el cemento. A diferencia del método utilizado en este trabajo de investigación, donde el activador se utilizó en solución, presenta la ventaja de disminuir el riesgo de trabajar con un líquido de alcalinidad alta, lo cual es peligroso si no se maneja adecuadamente.

Los paneles arquitectónicos prefabricados para muros de GP/agregados se encuentran en etapa de desarrollo. Para aplicarse como elementos constructivos en edificaciones deben pasar por un proceso de experimentación en el laboratorio para mejorar sus propiedades químicas y físicas, caracterizar sus propiedades para asegurar su cumplimiento con las normas aplicables, adaptar el proceso de fabricación de los paneles a las dimensiones reales y a escala industrial, y desarrollar el sistema para la instalación de los paneles.

Adicionalmente, se debe realizar un estudio análisis de ciclo de vida detallado para identificar los impactos ambientales y energéticos asociados a la producción de este elemento constructivo y compararlo con los de los paneles de cemento Portland. Una vez realizados dichos pasos, se deberá probar el sistema en un entorno real, para conocer su comportamiento en condiciones de uso normal para este tipo de elementos constructivos. Proceso que deberá realizarse en otra etapa bajo la planeación del método TRL para obtener un componente de calidad plenamente probado, eficiente y operacional.



NORMAS APLICADAS

En el desarrollo de materiales, las normas determinan las propiedades y los valores mínimos a cumplir para aplicarse como elementos constructivos. Al no existir normalización para geopolímeros (GP), se aplicaron las del material del cual son sustitutos: el cemento. La **Tabla 14** presenta las normas consideradas en esta investigación, y describe la pertinencia de su aplicación al material compuesto de geopolímero y agregados minerales (GP/agregados).

El material compuesto de GP/agregados debe pasar por pruebas adicionales a las realizadas en este trabajo de investigación, para verificar su cumplimiento con los valores mínimos de las propiedades establecidas por la norma ASTM C1325, para su aplicación como paneles arquitectónicos prefabricados para muros, **Tabla 15**.

Tabla 14. Normas aplicadas a los materiales compuestos de GP/agregados

Norma	Justificación
ASTM C39	La norma describe el método para llevar a cabo un ensayo de resistencia a la compresión en muestras de concreto con forma cilíndrica. Se estableció a la resistencia a la compresión como el factor de respuesta en el diseño de experimento factorial 2^{k+1} , por lo que fue necesario seguir un método normalizado para determinar esta propiedad. La resistencia a la compresión del material compuesto es un indicativo de la calidad de la reacción de geopolimerización, y una medida de comparación con el cemento Portland.
ASTM G154	La norma describe los ciclos de exposición a intemperismo acelerado para materiales no metálicos en aparatos de lámparas fluorescentes de luz ultravioleta (UV). La prueba se realizó para conocer el comportamiento del material compuesto de GP/agregados ante la luz UV y la humedad, simulando un ambiente exterior.
ASTM C1325	Esta norma establece las propiedades y los valores mínimos requeridos para paneles de base de cemento reforzados con mallas. Se empleó para identificar las pruebas adicionales a realizar al material compuesto para verificar su cumplimiento con los valores requeridos para aplicarse como paneles arquitectónicos prefabricados para muros.

Tabla 15. Normas aplicables para el desarrollo del panel arquitectónico prefabricado para muros de GP/agregados

Norma	Justificación
ASTM C947	Método estándar para el ensayo de resistencia a la flexión de elementos de concreto reforzado con fibras de sección delgada. En los paneles arquitectónicos prefabricados, dicha propiedad es relevante porque, una vez instalados, la carga crítica que deben soportar son esfuerzos de flexión.
ASTM C473	Métodos de pruebas físicas estándar para paneles de yeso. Para los paneles de GP/agregados, aplican la resistencia a la extracción de clavos y al agua. La primera, porque las uniones entre los elementos del sistema son a través de tornillos, y conocer la resistencia a su extracción da información sobre las propiedades mecánicas del material y de su funcionamiento como sistema constructivo. La segunda se realiza para conocer cuánta agua absorbe el material y determinar si es adecuado para su uso en ambientes húmedos como baños, cocinas o exteriores
ASTM E136	Método de prueba estándar para la evaluación de la combustibilidad de los materiales. Si el material aprueba el ensayo, se le considera no combustible, lo cual es deseable para los elementos de construcción, porque en caso de incendio, no ayudan a la combustión ni añaden calor.
ASTM E84	Método estándar para conocer las características de combustión superficial de los materiales de construcción. Su objetivo es determinar el comportamiento del material ante el fuego, mediante la observación de la propagación de la flama y la generación de humo.
ASTM C666	La norma establece el método estándar para determinar la resistencia del concreto ante la congelación y descongelación rápida. Se aplica para conocer el comportamiento del material ante las heladas.
ASTM D2394	Procedimiento estándar para realizar una prueba de resistencia a la indentación. Esta, proporciona información sobre la dureza y el comportamiento ante las cargas puntuales del material.
ANSI A118.4	Resistencia al corte por adhesión, en mezclas formuladas a partir del cemento, para la fijación o instalación de recubrimientos cerámicos y de piedras naturales. Esta propiedad es relevante, porque el muro de panel GP/agregados debe ser adecuado para recibir recubrimientos.
ASTM G21	Ensayo normalizado para determinar la resistencia al moho. Esta prueba, valida si el material es adecuado para instalarse en ambientes húmedos con la posibilidad de formación de hongos, como baños y cocinas.

GLOSARIO

Aluminosilicato. Mineral o sustancia que contiene óxidos de aluminio y silicio.

Cambio climático. Modificación acelerada del sistema climático del planeta, provocada por las actividades humanas. Los efectos del cambio climático incluyen el aumento de la temperatura de la superficie terrestre, el calentamiento y acidificación de los océanos, el aumento de las precipitaciones, la pérdida de masa de los mantos de hielo y la elevación del nivel medio del mar, afectando a los ecosistemas y al desarrollo de la vida humana.

Caracterización. Determinar las propiedades o características de un elemento.

Ciclo de vida. Proceso que atraviesa un producto o servicio, desde su planeación hasta su fin de vida útil. Se compone de cinco etapas: extracción de materias primas, manufactura, distribución, uso y fin de vida. Su análisis permite identificar los impactos ambientales asociados al producto o servicio analizado y a cada una de sus etapas.

Curado de geopolímeros. Proceso durante el cual el material se endurece y adquiere su resistencia. Es realizado a una temperatura superior a la ambiente y menor de 100 °C, con una humedad relativa determinada.

Desarrollo sostenible. Constituye un equilibrio entre el crecimiento económico, el cuidado del medio ambiente y el bienestar social.

Elemento constructivo. Componente material que integra una obra de construcción.

Geopolímero. Material aglutinante, sustituto del cemento, el cual se sintetiza a partir de un precursor mineral aluminosilicato, activado con una solución alcalina.

Impacto ambiental. Modificación de los ecosistemas naturales, provocada, generalmente, por las actividades humanas. Los impactos se pueden clasificar según su amplitud en regionales, locales y puntuales; y según su

temporalidad en permanentes o temporales.

Impacto energético. Impacto ambiental asociado con la producción y el consumo de la energía.

Material cerámico. Sólido inorgánico no metálico.

Material compuesto. Materiales que se forman por la unión de dos o más materiales, sin que se produzca una reacción química entre ellos, para conseguir la combinación de propiedades que no es posible obtener de los materiales originales.

Mineral. Material sólido e inorgánico con composición química definida, formado como resultado de procesos geológicos.

Panel arquitectónico. Elemento constructivo que funciona como muro y no forma parte del sistema estructural de la edificación

Precurado de geopolímeros. Proceso posterior a la síntesis del material, donde se deja reposar a temperatura ambiente por un tiempo determinado, y posteriormente inicia el curado.

Resistencia a la compresión. Esfuerzo máximo que soporta un material bajo una carga de aplastamiento.

Síntesis química. Proceso por el cual dos o más sustancias simples se combinan para producir compuestos más complejos.

Solución alcalina. Se forma cuando se disuelve un álcali en agua.

Transdisciplina. Esquema de investigación que incluye disciplinas múltiples que no se organizan jerárquicamente, y que se enfocan en problemas que cruzan los límites de dos o más de ellas.

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

ACV	Análisis de ciclo de vida
Al₂O₃	Óxido de aluminio
ANOVA	Análisis de la varianza
ASTM	Sociedad americana para pruebas y materiales (por sus siglas en inglés: American Society for Testing and Materials)
ATR	Técnica de espectroscopía de absorción infrarroja: reflectancia total atenuada (por sus siglas en inglés: Attenuated Total Reflection)
CaCO₃	Carbonato de calcio
CaO	Óxido de calcio
C-A-S-H	Gel producto principal de la activación alcalina de aluminosilicatos con contenido alto de calcio (C: CaO, A: Al ₂ O ₃ , S: SiO ₂ , H: H ₂ O)
CFC	Clorofluorocarbonos
CH₄	Metano
CMMAD	Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo
CMNUCC	Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
CO	Monóxido de carbono
CO₂	Dióxido de carbono
CP	Cemento Portland
DDE	Diseño de experimentos
DRX	Difracción de rayos X en polvos
FRX	Fluorescencia de rayos X
FTIR	Espectroscopía de absorción infrarroja por transformada de Fourier (por sus siglas en inglés: Fourier Transform Infrared Spectroscopy)
GEI	Gases de efecto invernadero
GP	Geopolímero(s)
GP/agregado	Material compuesto con matriz de geopolímero y agregado mineral
GP/mica	Material compuesto con matriz de geopolímero y agregado de mica
GP/perlita	Material compuesto con matriz de geopolímero y agregado de perlita

GWP	Potencial de cambio climático (por sus siglas en inglés: Global Warming Potential)
h	Horas
H₂CO₃	Ácido carbónico
H₂O	Agua
HFC	Hidrofluorocarburos
%HR	Porcentaje de humedad relativa
I&D+D	Investigación y desarrollo + diseño
ICDD	Base de datos de difracción de rayos X en polvos (por sus siglas en inglés: International Center for Diffraction Data)
IPCC	Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (por sus siglas en inglés: Intergovernmental Panel on Climate Change)
Kcal	Kilocalorías
kN	Kilonewton
KOH	Hidróxido de potasio
M	Concentración molar
MK	Metacaolín
mm	Milímetro
MPa	Megapascal
N₂O	Óxido de nitrógeno
Na₂O	Óxido de sodio
NaOH	Hidróxido de sodio
N-A-S-H	Gel producto principal de la activación alcalina de aluminosilicatos con contenido bajo de calcio (N: Na ₂ O, A: Al ₂ O ₃ , S: SiO ₂ , H: H ₂ O)
NO_x	Óxido de nitrógeno
O₃	Oxígeno
ONU	Organización de las Naciones Unidas
PDF4	Base de datos de difracción de rayos X en polvos de sustancias inorgánicas (por sus siglas en inglés: Powder Diffraction File)
PFC	Perfluorocarbonos

pH	Potencial de hidrógeno. Medida que indica la acidez o basicidad de una sustancia
PNUMA	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
PS	Partículas suspendidas
PVA	Alcohol polivinílico
PVC	Policloruro de vinilo
RC	Resistencia a la compresión
SF₆	Hexafluoruro de azufre
Si/Al	Relación de silicio entre aluminio
Si/Na	Relación de silicio entre sodio
SiO₂	Óxido de silicio
SO₂	Dióxido de azufre
TRL	Niveles de madurez de la tecnología (por sus siglas en inglés: Technology Readiness Level)
UV	Ultravioleta
VOC	Compuestos orgánicos volátiles
WSBCSD	Consejo empresarial mundial para el desarrollo sostenible (por sus siglas en inglés: World Business Council for Sustainable Development)
µm	Micrómetro

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de economía circular	11
Figura 2. Etapas del desarrollo experimental	41
Figura 3. Diagrama de los procesos de síntesis, precurado, curado y caracterización de material compuesto GP/agregado	46
Figura 4. Difractograma de RX comparativo del caolín y el MK	54
Figura 5. Espectro de IR comparativo del caolín y el MK	55
Figura 6. Imágenes de probetas sometidas al ensayo de resistencia a la compresión	57
Figura 7. Microscopía estereoscópica a 1x antes y después de exposición a intemperismo acelerado	58
Figura 8. Fotografías antes y después de exposición a intemperismo acelerado	59
Figura 9. Propagación de grietas a través de burbujas de aire en el ensayo de intemperismo acelerado	59
Figura 10. Gráfico de Pareto estandarizado del diseño experimental	62
Figura 11. Gráfica de efectos principales para resistencia a la compresión	63
Figura 12. Superficie de respuesta estimada	64
Figura 13. Contorno de la superficie de respuesta estimada	64
Figura 14. Difractograma de RX comparativo del MK, mica y GP/mica	65
Figura 15. Espectro de IR comparativo del MK, mica y GP/mica	66
Figura 16. Difractograma de RX comparativo del MK, perlita y GP/perlita	67
Figura 17. Espectro de IR comparativo del MK, perlita y GP/perlita	68
Figura 18. Dimensiones del panel de material compuesto GP/agregado	81
Figura 19. Sistema de instalación propuesto del panel GP/agregado	83
Figura 20. Experimento 1. Imágenes de GPs-MK con NaOH	106
Figura 21. Experimento 2. Imágenes de GPs-MK con NaOH	107

Figura 22. Experimento 3. Imágenes de GPs-MK con NaOH	108
Figura 23. Experimento 4. Imágenes de GPs-MK con NaOH	109
Figura 24. Experimento 5. Imágenes de GPs-MK con NaOH	110
Figura 25. Experimento 6. Imágenes de GPs-MK/agregado	111
Figura 26. Experimento 7. Imágenes de GPs-MK/agregado	112

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resultados de ACV para materiales cerámicos de construcción	18
Tabla 2. Impactos ambientales durante el ciclo de vida del cemento Portland y los GPs	38
Tabla 3. Factores y niveles del experimento	47
Tabla 4. Diseño de experimento factorial 2k+1 en dos bloques	47
Tabla 5. Composición química del metacaolín utilizado para la producción de GPs, obtenida por FRX	53
Tabla 6. Factores fijos en la síntesis de GPs-MK/agregado con NaOH	56
Tabla 7. Resultados de las corridas del diseño de experimento factorial en dos bloques con un punto central	60
Tabla 8. Tabla ANOVA del diseño experimental	61
Tabla 9. Niveles TRL del material compuesto GP/agregados y del panel GP/agregados	77
Tabla 10. Métodos de prueba y valores mínimos establecidos por la norma ASTM C1325	81
Tabla 11. Propiedades físicas de los paneles GP/perlita y Durock USG	82
Tabla 12. Composición del panel prefabricado de GP/perlita	83
Tabla 13. Composición del panel prefabricado de cemento USG Durock	83
Tabla 14. Normas aplicadas a los materiales compuestos de GP/agregados	91
Tabla 15. Normas aplicables para el desarrollo del panel arquitectónico prefabricado para muros de GP/agregados	92
Tabla 16. Experimento 1. Condiciones de síntesis y consolidación de los GPs-MK con NaOH	105
Tabla 17. Experimento 2. Condiciones de síntesis y consolidación de los GPs-MK con NaOH	106
Tabla 18. Experimento 3. Condiciones de síntesis y consolidación de los GPs-MK con NaOH	108

Tabla 19. Experimento 4. Condiciones de síntesis y consolidación de los GPs-MK con NaOH	109
Tabla 20. Experimento 5. Condiciones de síntesis y consolidación de los GPs-MK con NaOH	110
Tabla 21. Experimento 6. Condiciones de síntesis y consolidación de los GPs-MK/agregado	112
Tabla 22. Experimento 7. Condiciones de síntesis y consolidación de los GPs-MK/agregado	112
Tabla 23. Experimento 7. Resultados de ensayo de resistencia a la compresión	113

Anexo 1

EXPERIMENTOS PRELIMINARES

PRIMER EXPERIMENTO

En el primer experimento se sintetizaron seis muestras de geopolímeros (GPs), a partir del precursor metacaolín (MK) activado con hidróxido de sodio (NaOH), concentración 12 M; con variación de los parámetros siguientes: la relación NaOH/MK, los tiempos de reacción y de vibrado, así como, para el precurado a temperatura ambiente, los moldes cerrados o abiertos. La **Tabla 16** presenta las condiciones de cada una de las muestras. Derivado de ello, se encontró la importancia de mantener un ambiente húmedo durante el proceso de precurado, ya que, de no tenerlo, el agua contenida se expulsa en un tiempo corto, generando agrietamiento. Las muestras presentaron grietas y poros, debido a las burbujas de aire, y puntos de color blanco, identificados como carbonatación. Dichas irregularidades, provocaron que al ser desmoldadas se rompieran. La muestra identificada con la letra “a” presentó la superficie más lisa, en comparación con las otras; mientras que la “d” no se rompió durante el desmolde, **Figura 20**.

Tabla 16. Experimento 1. Condiciones de síntesis y consolidación de los GPs-MK con NaOH

	Muestra / Clave	Relación NaOH/MK	Tiempo reacción	Tiempo de vibrado	Molde cerrado
a	01-7051	0.70	5 min	10 min	Sí
b	01-5055	0.50	5 min	5 min	Sí
c	01-6051	0.60	5 min	10 min	Sí
d	01-6015	0.60	10 min	5 min	Sí
e	01-5011	0.50	10 min	10 min	Sí
f	01-7015	0.70	10 min	5 min	No

SEGUNDO EXPERIMENTO

El segundo experimento tuvo como objetivo buscar las condiciones para obtener muestras con superficie libre de grietas y burbujas de aire; así como determinar una relación NaOH/MK menor, para obtener una pasta trabajable, es decir, que sea fluida, manejable, sin hidratación excesiva, y que no presente grietas, poros ni carbonatación identificables por

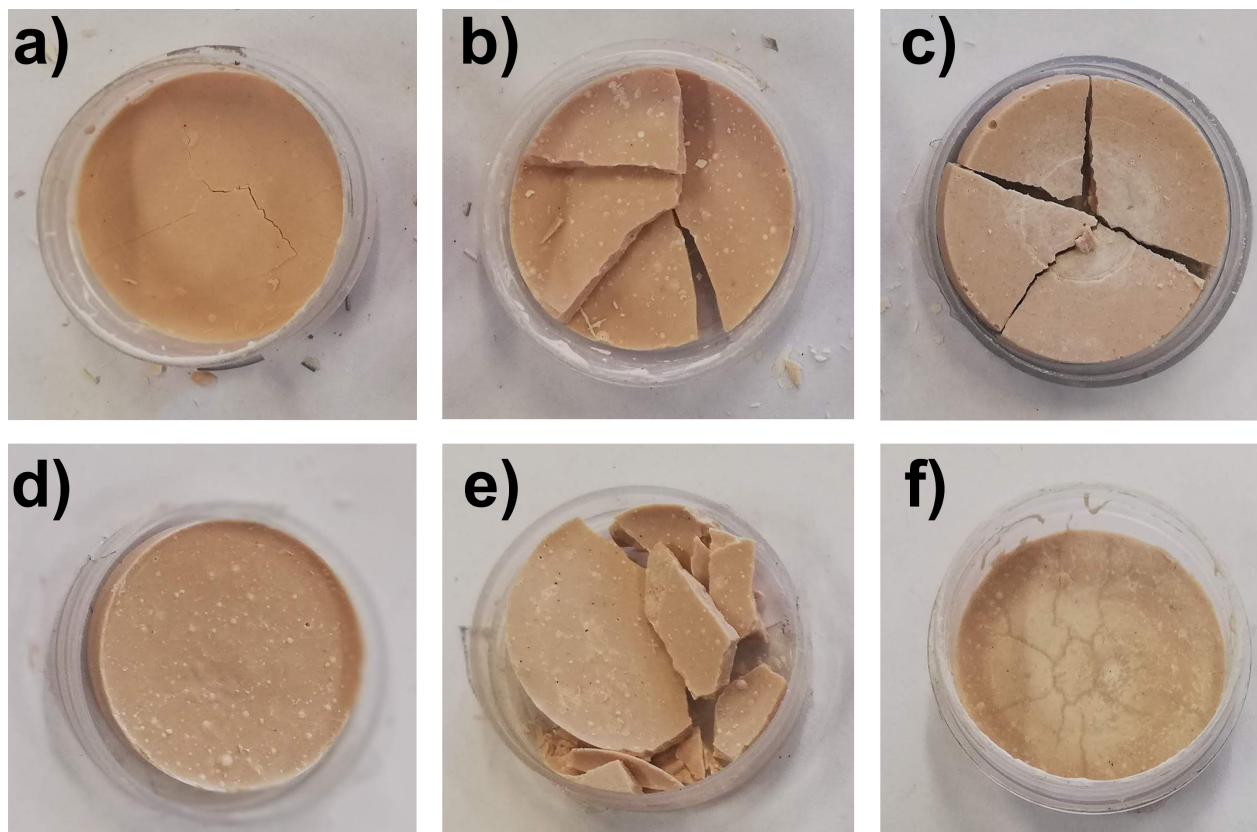


Figura 20. Experimento 1. Imágenes de GPs-MK con NaOH

análisis visual, para favorecer el desarrollo de la resistencia a la compresión (Barabanshchikov & Gutskalov, 2016). Se probaron cuatro muestras, con tiempos de precurado de 24 y 48 h a temperatura ambiente. En comparación con el primer experimento, en este se incorporó el proceso de curado a 60 °C con humedad, en donde las muestras se probaron en molde cerrado, abierto o desmoldadas. La **Tabla 17** muestra las condiciones de síntesis y consolidación de los GPs.

Los resultados obtenidos ayudaron a establecer una relación NaOH/MK de 0.45, para un manejo adecuado de la pasta. De las cuatro muestras, la denominada con la letra “b”,

Tabla 17. Experimento 2. Condiciones de síntesis y consolidación de los GPs-MK con NaOH

	Muestra / Clave	Precurado	Curado en molde	Curado desmoldado
a	02-6045-1	48 h	-	48 h
	02-6045-2	48 h	-	-
	02-6045-3	24 h	24 h (abierto)	-
b	02-6045-4	24 h	24 h (cerrado)	48 h

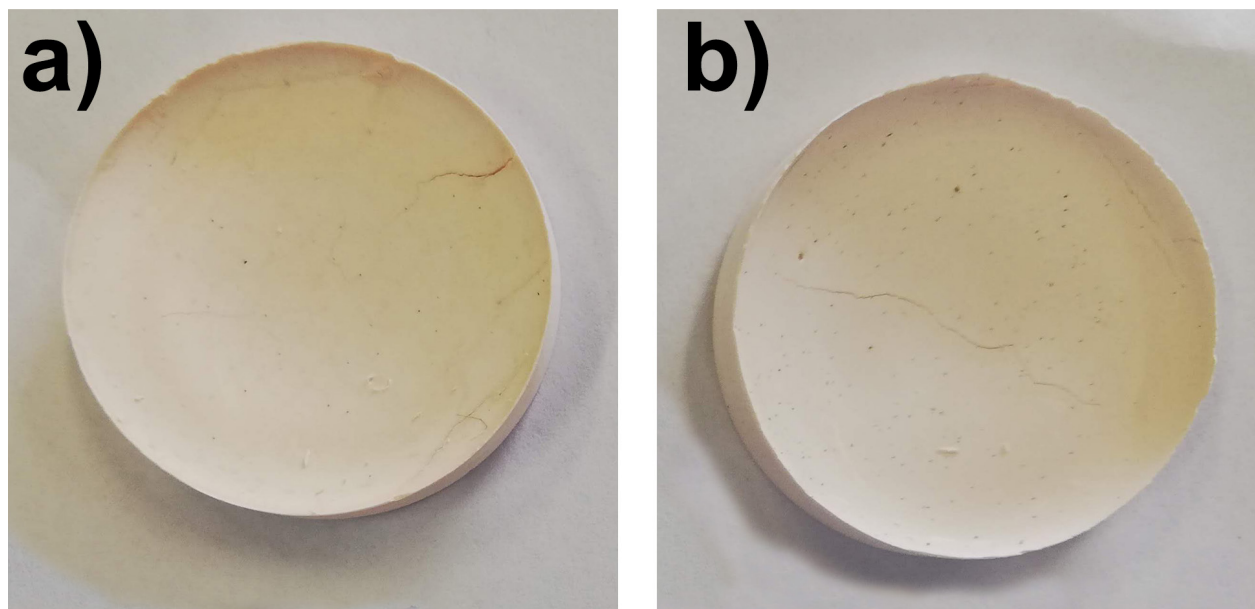


Figura 21. Experimento 2. Imágenes de GPs-MK con NaOH

presentó un mejor aspecto superficial; ya que no presentó burbujas de aire, y aunque sí tuvo una grieta superficial, se mantuvo en una pieza, **Figura 21**. Con la incorporación del proceso de curado a 60 °C y humedad, se obtuvieron muestras que no se rompieron al ser desmoldadas y con aspecto superficial superior, en comparación con las del primer experimento; sin embargo, persistió la presencia de grietas en la superficie de los GPs.

TERCER EXPERIMENTO

El tercer experimento consistió en seis muestras, para las cuales se reprodujeron las condiciones del segundo experimento, clave 02-6045-4 (**Tabla 17**); se varió la cantidad de MK en 2 y 4 g (**Tabla 18**), vertiendo ambas cantidades de pasta en el mismo tipo de molde. Las muestras permanecieron en moldes cerrados durante las primeras 24h de curado a 60 °C sin humedad. Los resultados mostraron la necesidad de mantener un ambiente húmedo durante el curado para evitar la formación de grietas. Las muestras de 2 g de MK se quebraron después de 24 h de curado, antes de ser desmoldadas; mientras que las de 4g, se consolidaron con grietas superficiales, debido a su espesor, **Figura 22**.

Tabla 18. Experimento 3. Condiciones de síntesis y consolidación de los GPs-MK con NaOH

	Muestra / Clave	MK
a	03-2-1	2 g
b	03-2-2	2 g
c	03-2-3	2 g
d	03-2-4	2 g
e	03-4-1	4 g
f	03-4-2	4 g

CUARTO EXPERIMENTO

El cuarto experimento se compuso de dos muestras de 2 g de MK y dos de 4 g, **Tabla 19**. Al igual que en el tercer experimento, con las condiciones del segundo experimento, clave 02-6045-4 (**Tabla 17**); la diferencia fue que el curado se realizó con humedad, lo cual, al final del proceso, generó muestras con una superficie lisa sin grietas. La muestra denominada con la letra “b”, se rompió al ser desmoldada (**Figura 23-b**).

Figura 22. Experimento 3. Imágenes de GPs-MK con NaOH

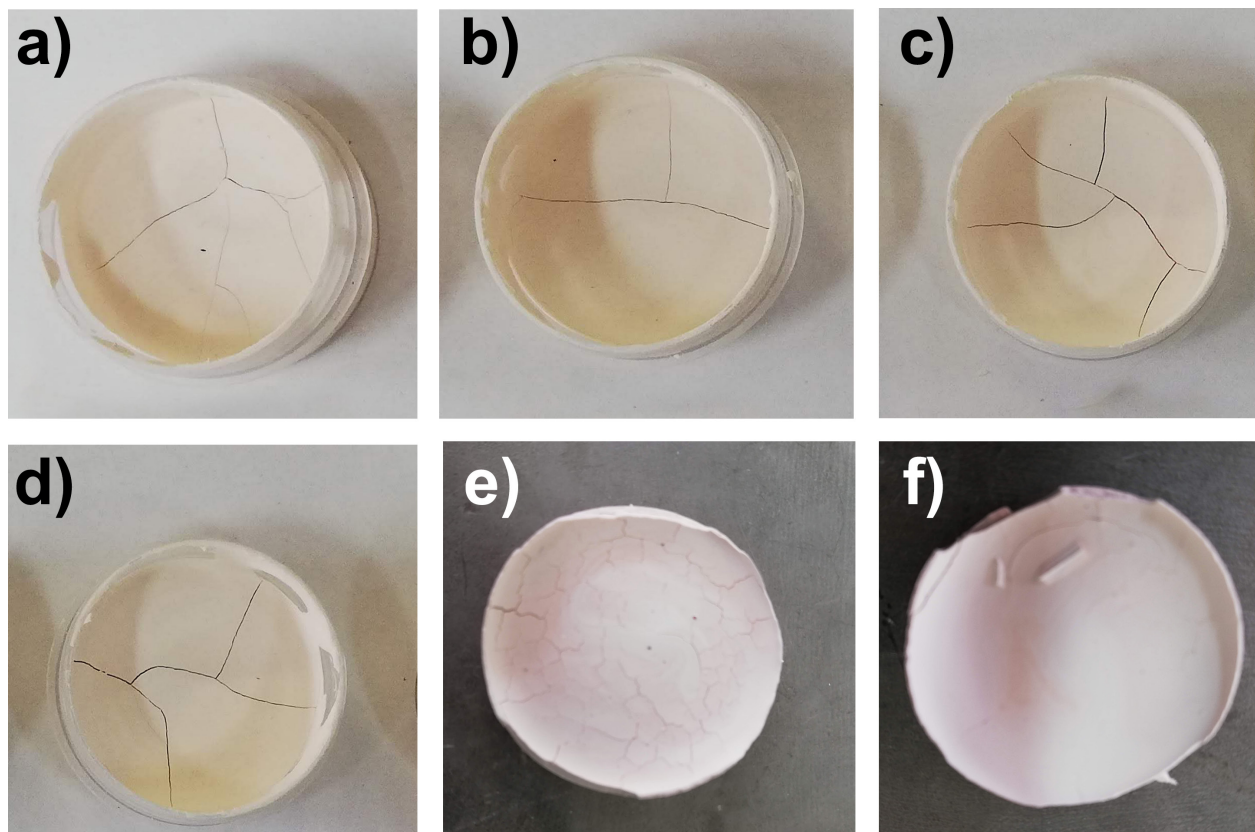


Tabla 19. Experimento 4. Condiciones de síntesis y consolidación de los GPs-MK con NaOH

	Muestra / Clave	MK
a	04-2-1	2 g
b	04-2-2	2 g
c	04-4-1	4 g
d	04-4-2	4 g

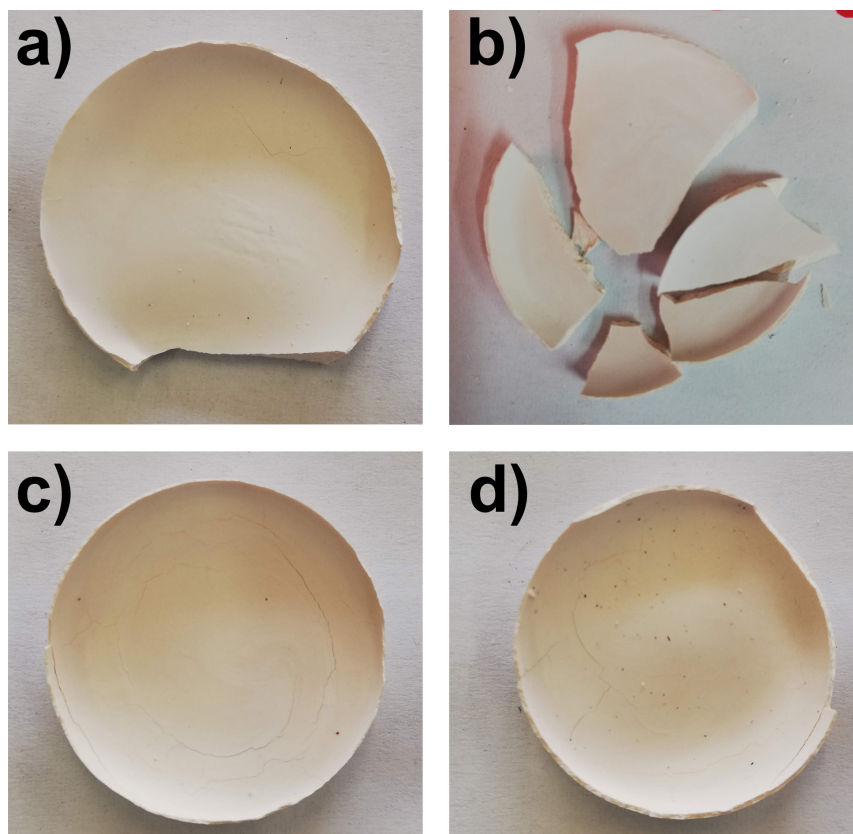


Figura 23. Experimento 4.
Imágenes de GPs-MK con
NaOH

QUINTO EXPERIMENTO

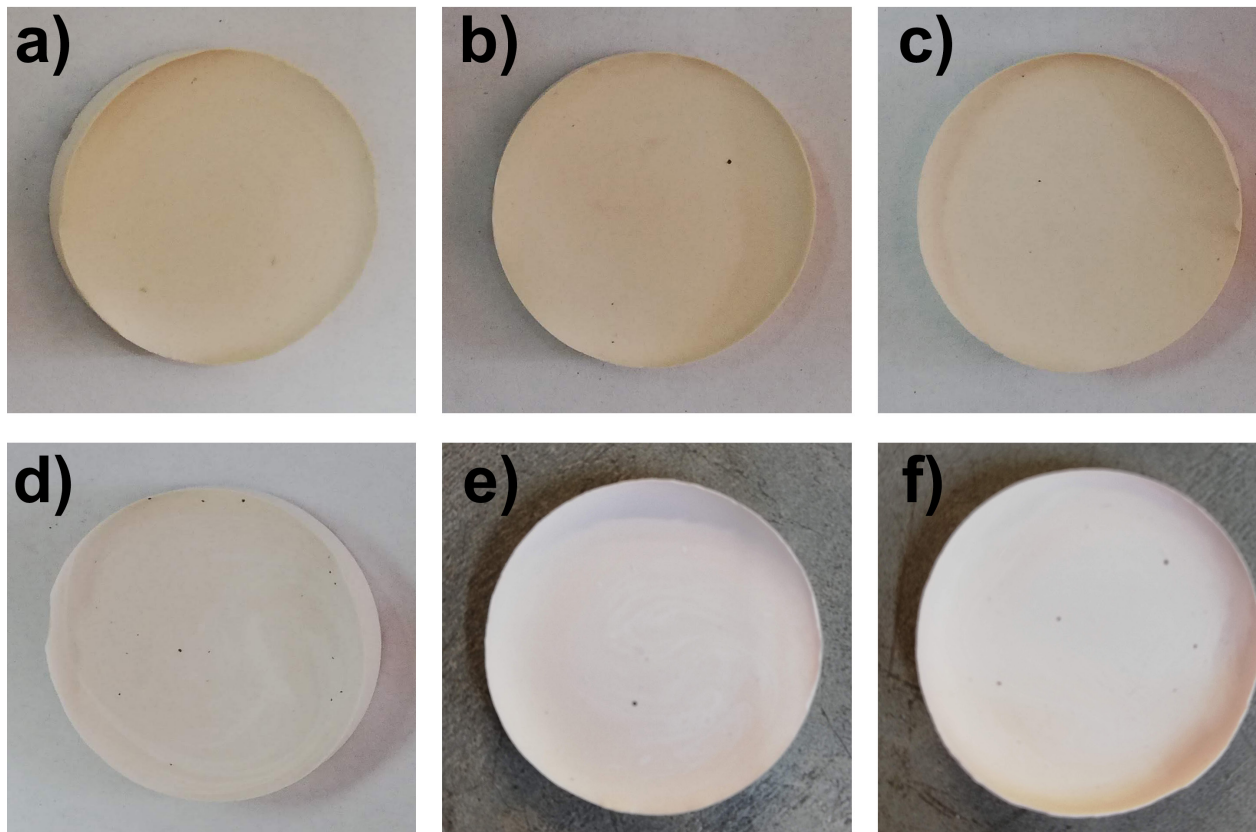
En el quinto experimento se sintetizaron seis muestras bajo las condiciones de síntesis y consolidación de la **Tabla 20**. Su objetivo fue determinar la influencia de la variación del tiempo de precurado a temperatura ambiente, entre 48 h y 120 h, y la de la temperatura de curado a 40 °C, menor, en comparación a los experimentos anteriores. Se determinó que 48 h de precurado a temperatura ambiente son suficientes para que las muestras adquieran una

Tabla 20. Experimento 5. Condiciones de síntesis y consolidación de los GPs-MK con NaOH

	Muestra / Clave	Tiempo de precurado (Temperatura ambiente)	Tiempo de curado (40 °C con humedad)
a	05-4812	48 h	120 h
b	05-7296-1	72 h	96 h
c	05-7296-2	72 h	96 h
d	05-2414	24 h	144 h
e	05-1248-1	120 h	48 h
f	05-1224-2	120 h	24 h

Figura 24. Experimento 5. Imágenes de GPs-MK con NaOH

consistencia adecuada para el desmolde. Los GPs mostraron que el curado a 40 °C favoreció la pérdida lenta de humedad, por lo que las muestras presentaron una superficie lisa, sin grietas, poros, ni burbujas de aire, **Figura 24.**



SEXTO EXPERIMENTO

El sexto experimento se realizó para la consolidación de 6 muestras del material compuesto, matriz-agregado, en donde el GP funcionó como matriz de dos tipos de agregados, la mica y la perlita. El GP se sintetizó con las condiciones del experimento 5, clave 05-4812, **Tabla 20**. La mica se incorporó con dos tamaños de lámina de 4 y 10mm, siendo adecuada la de 4 mm, mientras que la perlita se adicionó en polvo; se probaron dos porcentajes de agregado (2.5 y 5 %) y dos relaciones NaOH/MK (0.45 y 0.50), **Tabla 21**. Las condiciones de curado fueron de 50 °C y 85 % de humedad relativa (HR), con aumento de la relación de NaOH/MK de 0.45 a 0.50, para mejorar la trabajabilidad de la pasta con el agregado. Las muestras de GP/agregados presentaron superficies lisas y una incorporación uniforme de los agregados a la matriz, con excepción de la muestra identificada con la letra “a”, debido al tamaño de la lámina de mica adicionada (**Figura 25**).

Figura 25. Experimento 6. Imágenes de GPs-MK con NaOH

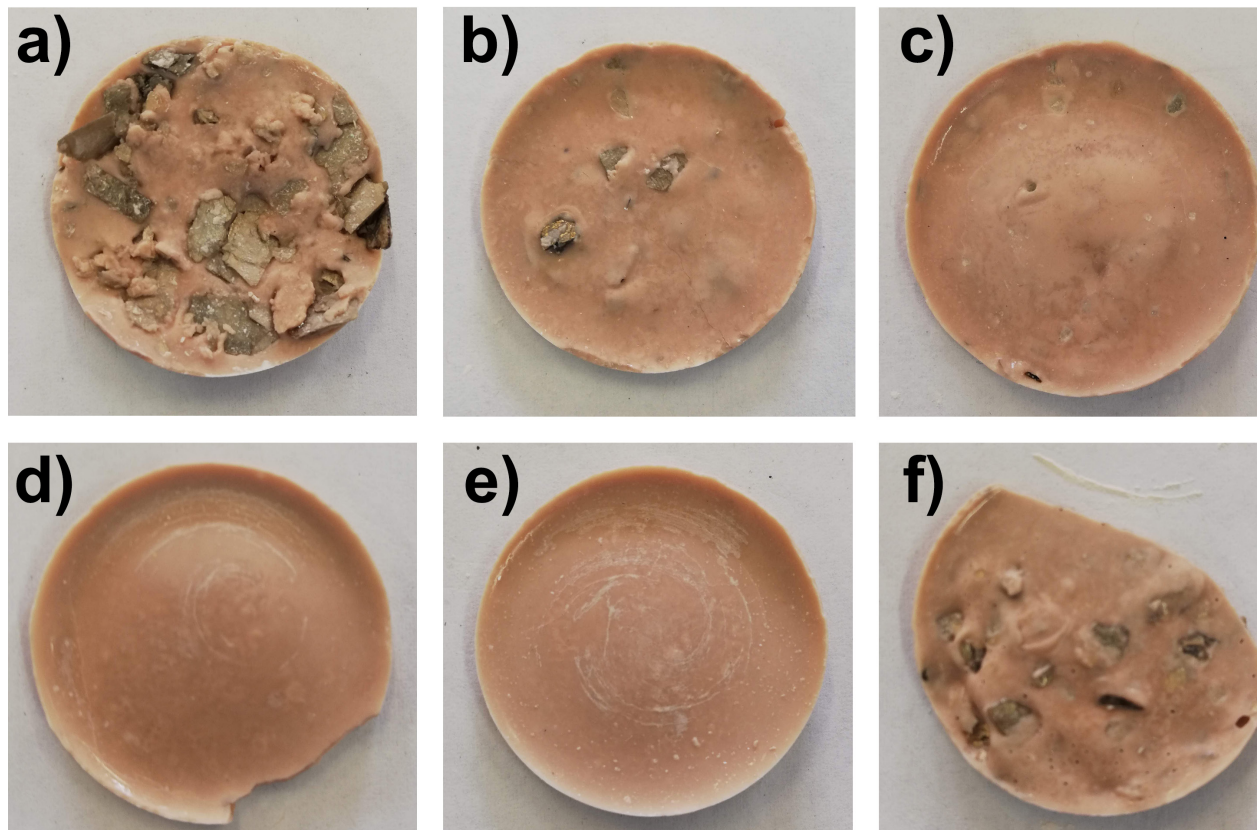


Tabla 21. Experimento 6. Condiciones de síntesis y consolidación de los GPs-MK/agregado

	Muestra / Clave	Tipo de agregado	Tamaño lámina	Porcentaje agregado	Relación NaOH/MK
a	06-MG545	Mica	~10 mm	5 %	0.45
b	06-MC250-1	Mica	~4 mm	2.5 %	0.50
c	06-MC250-2	Mica	~4 mm	2.5 %	0.50
d	06-P250-1	Perlita	-	2.5 %	0.50
e	06-P250-2	Perlita	-	2.5 %	0.50
f	06-MC550	Mica	~4 mm	5 %	0.50

SÉPTIMO EXPERIMENTO

En el séptimo experimento los materiales compuestos GP/mica y GP/perlita se sintetizaron en probetas cilíndricas de 13 x 26 mm. Ambos agregados se adicionaron a la matriz de GP en una proporción de 2.5 % en peso, la relación de NaOH/MK fue de 0.50, con las condiciones de curado de 50 °C y 85 %HR. Entre las seis muestras consolidadas, se varió el tipo de agregado y el tiempo de precurado a temperatura ambiente en 48 h y 72 h, **Tabla 22**. Las muestras con las claves 07-M-2 (**Figura 26-b**) y 07-P-1 (**Figura 26-e**), mejor acabadas, sin grietas, poros ni porosidades, se sometieron al ensayo de resistencia a la compresión, con base en la norma ASTM C39 (ASTM, 2018c). Los resultados se muestran en la **Tabla 23**.

Tabla 22. Experimento 7. Condiciones de síntesis y consolidación de los GPs-MK/agregado

	Muestra / Clave	Tipo de agregado	Tiempo de precurado (Tamb)
a	07-M-1	Mica	48 h
b	07-M-2	Mica	48 h
c	07-M-3	Mica	72 h
d	07-M-4	Mica	72 h
e	07-P-1	Perlita	48 h
f	07-P-2	Perlita	48 h

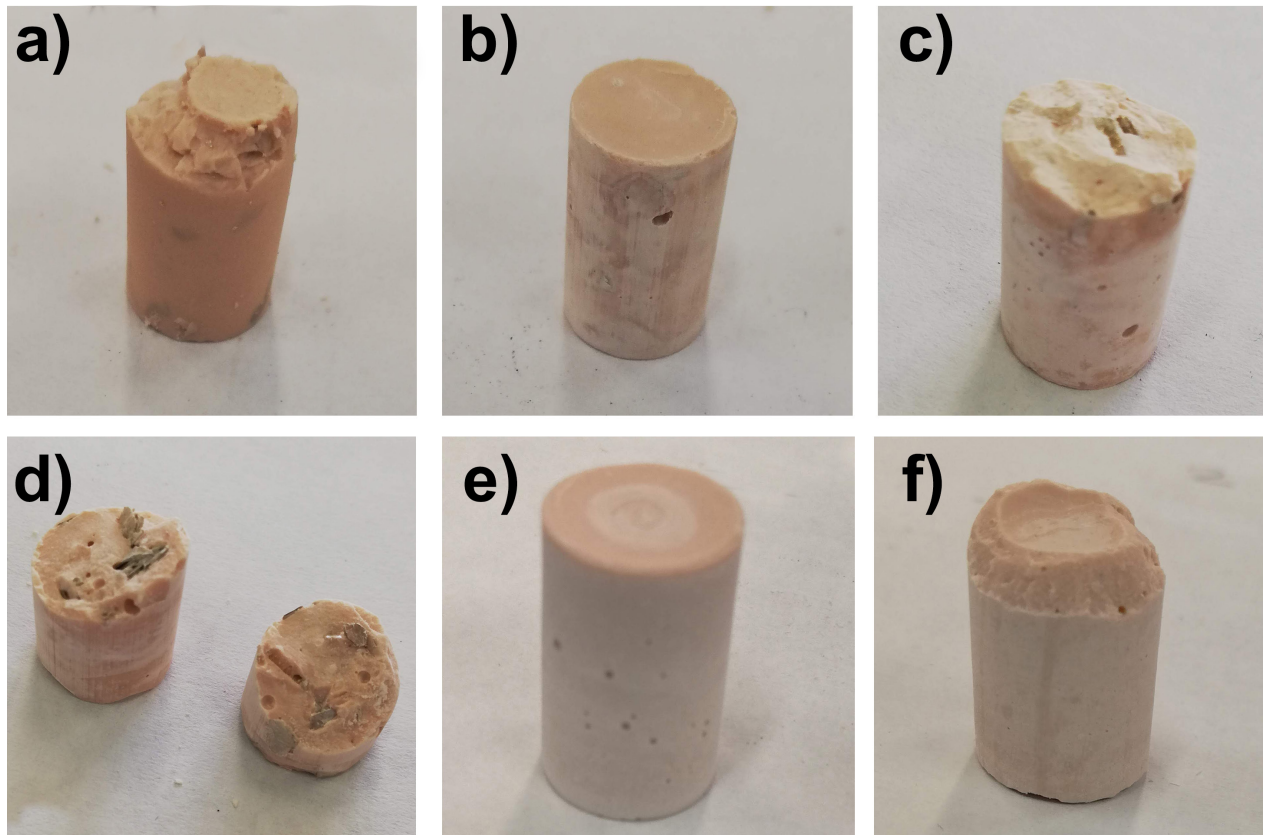


Figura 26. Experimento 7. Imágenes de GPs-MK con NaOH

Tabla 23. Experimento 7. Resultados de ensayo de resistencia a la compresión

Muestra	Agregado	Tiempo de curado	Resistencia a la compresión
07-M-2	Mica	5 días	2.1 MPa
07-P-1	Perlita	7 días	3.8 MPa

REFERENCIAS

- Akalin, H. A., Hıçsönmez, Ü., & Yilmaz, H.** (2018). Removal of Cesium from Aqueous Solution by Adsorption onto Sivas- Yildizeli (Türkiye) Vermiculite: Equilibrium , Kinetic and Thermodynamic Studies. *Journal of the Turkish Chemical Society, Section A: Chemistry*, 5(1), 85–116. <https://doi.org/10.18596/jotcsa.317771>
- Al-mashhadani, M. M., Canpolat, O., Aygörmez, Y., Uysal, M., & Erdem, S.** (2018). Mechanical and microstructural characterization of fiber reinforced fly ash based geopolymer composites. *Construction and Building Materials*, 167, 505–513. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.061>
- Almer, C., & Winkler, R.** (2017). Analyzing the effectiveness of international environmental policies: The case of the Kyoto Protocol. *Journal of Environmental Economics and Management*, 82, 125–151. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2016.11.003>
- Anderson, M. J., & Whitcomb, P. J.** (2015). *DOE simplified: practical tools for effective experimentation* (3rd ed.). New York, EUA: CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b18479>
- Anderson, T. R., Hawkins, E., & Jones, P. D.** (2016). CO₂, the greenhouse effect and global warming: from the pioneering work of Arrhenius and Callendar to today's Earth System Models. *Endeavour*, 40(3), 178–187. <https://doi.org/10.1016/j.endeavour.2016.07.002>
- Arch Daily.** (2013). Instituto del Cambio Global de la Universidad de Queensland / HASSELL. Retrieved October 10, 2019, from <https://www.archdaily.mx/mx/02-320849/instituto-del-cambio-global-de-la-universidad-de-queensland-hassell>
- Aredes, F. G. M., Campos, T. M. B., Machado, J. P. B., Sakane, K. K., Thim, G. P., & Brunelli, D. D.** (2015). Effect of cure temperature on the formation of metakaolinite-based geopolymer. *Ceramics International*, 41(6), 7302–7311. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.02.022>
- ASTM.** (2016). *ASTM G154-16, Standard Practice for Operating Fluorescent Ultraviolet (UV) Lamp Apparatus for Exposure of Nonmetallic Materials*. West Conshohocken, PA. <https://doi.org/10.1520/G0154-16>
- ASTM.** (2018a). *ASTM C1325-18, Standard Specification for Fiber-Mat Reinforced Cementitious Backer Units*. West Conshohocken, PA. <https://doi.org/10.1520/C1325-18>
- ASTM.** (2018b). *ASTM C150 / C150M-18, Standard Specification for Portland Cement*. West Conshohocken, PA. https://doi.org/10.1520/C0150_C0150M-18

- ASTM.** (2018c). *ASTM C39/C39M-18, Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. West Conshohocken, PA. https://doi.org/10.1520/C0039_C0039M-18
- Barabanshchikov, Y., & Gutskalov, I.** (2016). Strength and deformability of fiber reinforced cement paste on the basis of basalt fiber. *Advances in Civil Engineering*, 2016, 1–5. <https://doi.org/10.1155/2016/6562526>
- Bich, C., Ambroise, J., & Péra, J.** (2009). Influence of degree of dehydroxylation on the pozzolanic activity of metakaolin. *Applied Clay Science*, 44(3–4), 194–200. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2009.01.014>
- Bonciu, F.** (2014). The European Economy: From a linear to a circular economy. *Romanian Journal of European Affairs*, 14(4), 78–91.
- CANACEM.** (2016). Producción y consumo. Retrieved March 15, 2019, from <http://canacem.org.mx/cemento/produccion-y-consumo/>
- Carter, C. B., & Norton, M. G.** (2013). *Ceramic Materials: Science and Engineering*. (Springer, Ed.) (2nd ed.). New York, EUA. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-3523-5>
- Chen, L., Wang, Z., Wang, Y., & Feng, J.** (2016). Preparation and properties of alkali activated metakaolin-based geopolymer. *Materials*, 9, 1–12. <https://doi.org/10.3390/ma9090767>
- Criado, M., Palomo, A., & Fernandez-Jimenez, A.** (2005). Alkali activation of fly ashes. Part 1: Effect of curing conditions on the carbonation of the reaction products. *Fuel*, 84(16), 2048–2054. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2005.03.030>
- da Silva Alves, L. C., dos Reis Ferreira, R. A., Bellini Machado, L., & de Castro Motta, L. A.** (2019). Optimization of metakaolin-based geopolymer reinforced with sisal fibers using response surface methodology. *Industrial Crops and Products*, 139, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111551>
- Davidovits, J.** (2015). *Geopolymer Chemistry and Applications*. (Geopolymer Institute, Ed.) (4th ed.). Saint-Quentin, France.
- Duxson, P., Mallicoat, S. W., Lukey, G. C., Kriven, W. M., & van Deventer, J. S. J.** (2007). The effect of alkali and Si/Al ratio on the development of mechanical properties of metakaolin-based geopolymers. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 292(1), 8–20. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2006.05.044>

- García-Besné, A., Luna, D., Cobos, A., Lameiras, D., Ortiz-Moreno, H., & Güereca, L. P.** (2018). A methodological framework of eco-efficiency based on fuzzy logic and Life Cycle Assessment applied to a Mexican SME. *Environmental Impact Assessment Review*, *68*, 38–48. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2017.10.008>
- García-Mejía, T. A., & Chávez-García, M. de L.** (2016). Compressive Strength of Metakaolin-Based Geopolymers: Influence of KOH Concentration, Temperature, Time and Relative Humidity. *Materials Sciences and Applications*, *7*(11), 772–791. <https://doi.org/10.4236/msa.2016.711060>
- Geopolymer Institute.** (2019). Short and incomplete list of companies that are manufacturing and selling geopolymers. Retrieved October 10, 2019, from <https://www.geopolymer.org/about/business-fellows/>
- Ghanbari, M., Hadian, A. M., & Nourbakhsh, A. A.** (2015). Effect of Processing Parameters on Compressive Strength of Metakaolinite Based Geopolymers: Using DOE Approach. *Procedia Materials Science*, *11*, 711–716. <https://doi.org/10.1016/j.mspro.2015.11.047>
- Ghanbari, M., Hadian, A. M., Nourbakhsh, A. A., & MacKenzie, K. J. D.** (2017). Modeling and optimization of compressive strength and bulk density of metakaolin-based geopolymer using central composite design: A numerical and experimental study. *Ceramics International*, *43*(1), 324–335. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.09.159>
- Gharzouni, A., Vidal, L., Essaidi, N., Joussein, E., & Rossignol, S.** (2016). Recycling of geopolymer waste: Influence on geopolymer formation and mechanical properties. *Materials and Design*, *94*, 221–229. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.01.043>
- Glasby, T., Day, J., Genrich, R., & Aldred, J.** (2015). EFC Geopolymer Concrete Aircraft Pavements at Brisbane West Wellcamp Airport. In *Concrete 2015* (pp. 1051–1059). Melbourne, Australia: Concrete Institute of Australia.
- Güereca, L. P., Torres, N., & Juárez-López, C. R.** (2015). The co-processing of municipal waste in a cement kiln in Mexico. A life-cycle assessment approach. *Journal of Cleaner Production*, *107*, 741–748. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.085>
- Gursel, A. P., Masanet, E., Horvath, A., & Stadel, A.** (2014). Life-cycle inventory analysis of concrete production: A critical review. *Cement and Concrete Composites*, *51*, 38–48. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.03.005>

- Gusmão-Caiado, R. G., de Freitas-Dias, R., Veiga-Mattos, L., Gonçalves-Quelhas, O. L., & Leal-Filho, W.** (2017). Towards sustainable development through the perspective of eco-efficiency - A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*, 165, 890–904. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.166>
- Habert, G., & Ouellet-Plamondon, C.** (2016). Recent update on the environmental impact of geopolymers. *RILEM Technical Letters*, 1, 17–23. <https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2016.6>
- He, P., Jia, L., Ma, G., Wang, R., Yuan, J., Duan, X., ... Jia, D.** (2018). Effects of fiber contents on the mechanical and microwave absorbent properties of carbon fiber felt reinforced geopolymer composites. *Ceramics International*, 44(9), 10726–10734. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.03.107>
- He, P., Wang, M., Fu, S., Jia, D., Yan, S., Yuan, J., ... Zhou, Y.** (2016). Effects of Si / Al ratio on the structure and properties of metakaolin based geopolymer. *Ceramics International*, 42(13), 14416–14422. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.06.033>
- Huntzinger, D. N., & Eatmon, T. D.** (2009). A life-cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies. *Journal of Cleaner Production*, 17(7), 668–675. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2008.04.007>
- IEA, & CSI.** (2017). *Technology Roadmap: Low-Carbon Transition in the Cement Industry*. Retrieved from <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/TechnologyRoadmapLowCarbonTransitionintheCementIndustry.pdf>
- Ilić, B. R., Mitrović, A. A., & Miličić, L. R.** (2010). Thermal treatment of kaolin clay to obtain metakaolin. *Hemijaska Industrija*, 64(4), 351–356. <https://doi.org/10.2298/HEMIND100322014I>
- IPCC.** (2018). *Summary for Policymakers. Global Warming of 1.5 °C*. Geneva, Switzerland.
- ISO.** (2006). *ISO 14040:2006, Gestión ambiental - Análisis de ciclo de vida - Principios y marco de referencia*.
- Kabongo, J. D., & Boiral, O.** (2017). Doing More with Less: Building Dynamic Capabilities for Eco-Efficiency. *Business Strategy and the Environment*, 26(7), 956–971. <https://doi.org/10.1002/bse.1958>

- Konan, K. L., Peyratout, C., Smith, A., Bonnet, J. P., Rossignol, S., & Oyetola, S.** (2009). Comparison of surface properties between kaolin and metakaolin in concentrated lime solutions. *Journal of Colloid and Interface Science*, 339(1), 103–109. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2009.07.019>
- Kumar, G. S., & Reddy, A. N.** (2016). Application of remote sensing to assess environmental impact of limestone mining in the Ariyalur district of Tamilnadu , India. *Journal of Geomatics*, 10(2), 158–163.
- Medri, V., Papa, E., Mazzocchi, M., Laghi, L., Morganti, M., Francisconi, J., & Landi, E.** (2015). Production and characterization of lightweight vermiculite/geopolymer-based panels. *Materials and Design*, 85, 266–274. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.06.145>
- Mohiuddin, E., Makarfi Isa, Y., Mdleleni, M. M., & Key, D.** (2018). Synthesis and Application of Porous Kaolin-Based ZSM-5 in the Petrochemical Industry. In *Nanoporous Materials* (p. 25). IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.81375>
- ONU.** (2019a). Agenda 2030. Retrieved September 12, 2019, from <http://www.onu.org.mx/agenda-2030/>
- ONU.** (2019b). Documentación de la ONU: Medio ambiente. Retrieved September 12, 2019, from <https://research.un.org/es/docs/environment/conferences>
- Ozer, I., & Soyer-Uzun, S.** (2015). Relations between the structural characteristics and compressive strength in metakaolin based geopolymers with different molar Si/Al ratios. *Ceramics International*, 41(8), 10192–10198. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.04.125>
- Pacheco-Torgal, F., Labrincha, J. A., Leonelli, C., Palomo, A., & Chindaprasirt, P.** (2015). *Handbook of alkali-activated cements, mortars and concretes*. (Woodhead Publishing, Ed.). Cambridge, UK.
- Phair, J. W., & Van Deventer, J. S. J.** (2002). Effect of silicate activator pH on the microstructural characteristics of waste-based geopolymers. *International Journal of Mineral Processing*, 66(1–4), 121–143.
- Rieder, M., Cavazzini, G., D'Yakonov, Y. S., Frank-Kamenetskii, V. A., Gottardi, G., Guggenheim, S., ... Wones, D. R.** (1998). Nomenclature of the micas. *The Canadian Mineralogist*, 36(3), 905–912.

- Romero-Guerrero, L. M., Moreno-Tovar, R., Arenas-Flores, A., Marmolejo-Santillán, Y., & Pérez-Moreno, F.** (2018). Chemical, Mineralogical, and Refractory Characterization of Kaolin in the Regions of Huayacocotla-Alumbres, Mexico. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018, 1–11. <https://doi.org/10.1155/2018/8156812>
- Rovnaník, P.** (2010). Effect of curing temperature on the development of hard structure of metakaolin-based geopolymer. *Construction and Building Materials*, 24(7), 1176–1183. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.12.023>
- Sá Ribeiro, R. A., Sá Ribeiro, M. G., Sankar, K., & Kriven, W. M.** (2016). Geopolymer-bamboo composite – A novel sustainable construction material. *Construction and Building Materials*, 123, 501–507. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.037>
- Sakulich, A. R., Anderson, E., Schauer, C., & Barsoum, M. W.** (2009). Mechanical and microstructural characterization of an alkali-activated slag/limestone fine aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 23(8), 2951–2957. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.02.022>
- Shishlov, I., Morel, R., & Bellassen, V.** (2016). Compliance of the Parties to the Kyoto Protocol in the first commitment period. *Climate Policy*, 16(6), 768–782. <https://doi.org/10.1080/14693062.2016.1164658>
- Stahel, W. R.** (2016). The circular economy. *Nature*, 531(7595), 435–438. <https://doi.org/10.1038/531435a>
- USG.** (2005). *Tablero de cemento USG DUROCK®*. México, D.F.
- USG México y Latin America.** (2015). *Hoja de datos de seguridad. Tablamiento marca DUROCK® NEXT GEN® multiusos*. México, D.F.
- USGS.** (2019). *Mineral commodity summaries 2019*. U.S. Geological Survey. Reston, Virginia, EUA. <https://doi.org/10.3133/70202434>.
- Varga, G.** (2007). The structure of kaolinite and metakaolinite. *Epitoanyag - Journal of Silicate Based and Composite Materials*, 59(1), 6–9. <https://doi.org/10.14382/epitoanyag-jsbcm.2007.2>
- WMO.** (2018). *Executive Summary: Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2018*. Global Ozone Research and Monitoring Project - Report No. 58. Geneva, Switzerland.

- Yu, P., Low, M. Y., & Zhou, W. (2018). Design of experiments and regression modelling in food flavour and sensory analysis: A review. *Trends in Food Science and Technology*, 71, 202–215. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.11.013>
- Yu, Q. L., Spiesz, P., & Brouwers, H. J. H. (2015). Ultra-lightweight concrete: Conceptual design and performance evaluation. *Cement and Concrete Composites*, 61, 18–28. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.04.012>
- Yuan, J., He, P., Jia, D., Yang, C., Yan, S., Yang, Z., ... Zhou, Y. (2016). Effect of curing temperature and SiO₂/K₂O molar ratio on the performance of metakaolin-based geopolymers. *Ceramics International*, 42(14), 16184–16190. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.07.139>
- Zabalza-Bribián, I., Valero-Capilla, A., & Aranda-Usón, A. (2011). Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential. *Building and Environment*, 46(5), 1133–1140. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.12.002>
- Zhang, B., MacKenzie, K. J. D., & Brown, I. W. M. (2009). Crystalline phase formation in metakaolinite geopolymers activated with NaOH and sodium silicate. *Journal of Materials Science*, 44(17), 4668–4676. <https://doi.org/10.1007/s10853-009-3715-1>
- Zhang, F., Zhang, L., Liu, M., Mu, C., Liang, Y. N., & Hu, X. (2017). Role of alkali cation in compressive strength of metakaolin based geopolymers. *Ceramics International*, 43(4), 3811–3817. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.12.034>
- Zujovic, Z., Wheelwright, W. V. K., Kilmartin, P. A., Hanna, J. V., & Cooney, R. P. (2018). Structural investigations of perlite and expanded perlite using ¹H, ²⁷Al and ²⁹Si solid-state NMR. *Ceramics International*, 44(3), 2952–2958. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.11.047>