



UNIVERSIDAD  
DE PIURA

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Estado del arte en la formulación, propiedades y  
microestructura del mortero de geopolímeros**

Tesis para optar el Título de  
Ingeniero Civil

**Rosamelia Lyzeth Carhuamaca Borda**

**Asesor(es):  
Mgtr. Ing. Gaby Ruíz Petrozzi**

**Piura, octubre de 2022**

PAPER NAME

**Tesis turnitin**

AUTHOR

-

WORD COUNT

**18932 Words**

CHARACTER COUNT

**99097 Characters**

PAGE COUNT

**71 Pages**

FILE SIZE

**118.0KB**

SUBMISSION DATE

**Oct 9, 2022 11:42 AM GMT-5**

REPORT DATE

**Oct 9, 2022 11:47 AM GMT-5****● 10% Overall Similarity**

The combined total of all matches, including overlapping sources, for each database.

- 8% Internet database
- 5% Submitted Works database
- 1% Publications database

### **Dedicatoria**

Este logro lleva consigo un gran significado por ser el producto de varios de años de preparación. Por ello, va dedicado a las personas que confiaron en mis capacidades para alcanzar esta meta, especialmente a mis padres. A mi padre, César Carhuamaca, por su constante esfuerzo, enseñanzas y ejemplo de superación profesional. A mi madre, Amalia Borda, por su paciencia y comprensión brindada durante todo este periodo.





## Resumen

La presente investigación es una recopilación de información sobre los geopolímeros, material relativamente nuevo y con menos impacto contaminante comparado con el cemento portland. Además de emitir menos gases de efecto invernadero al medio ambiente en comparación con la producción de cemento Portland, su producción aprovecha residuos industriales, llamados precursores sólidos, ricos en sílice y alúmina, combinados con una solución activadora altamente alcalina, con aplicación de curado a temperaturas por debajo de los 100°C. Por la amplitud de sus aplicaciones, este trabajo se centra en los morteros desarrollados con este material. Las propiedades del mortero geopolimérico depende principalmente del activador alcalino, las condiciones de curado y el tipo de precursor sólido usado. El precursor sólido más utilizado por los autores de la literatura es la ceniza volante y en menor escala el metacaolín, la escoria granulada de alto horno y ceniza de combustible de aceite de palma, mientras que la ceniza de cascara de arroz y la ceniza de caña de azúcar se utilizaron en combinación con otros precursores. La molaridad entre 10M y 12M del activador alcalino permite alcanzar hasta 61 MPa a los 7 días de edad. La temperatura de curado no debería ser superior a los 85°C ni por más de 2 días, aunque también se encuentran buenos resultados de las muestras curadas a temperatura ambiente (23°C – 30°C). En general, el mortero geopolimérico se considera un material con ventajas sobre el mortero de cemento portland, con muchas variables por determinar debido a la novedad del material y a la falta de experiencia en la región. Incluso se considera que tiene un buen desempeño para adherirse a otros materiales. Sin embargo, no se ha encontrado más información sobre la capacidad del mortero geopolimérico para intervenir en la microestructura de otros materiales.



## Tabla de contenido

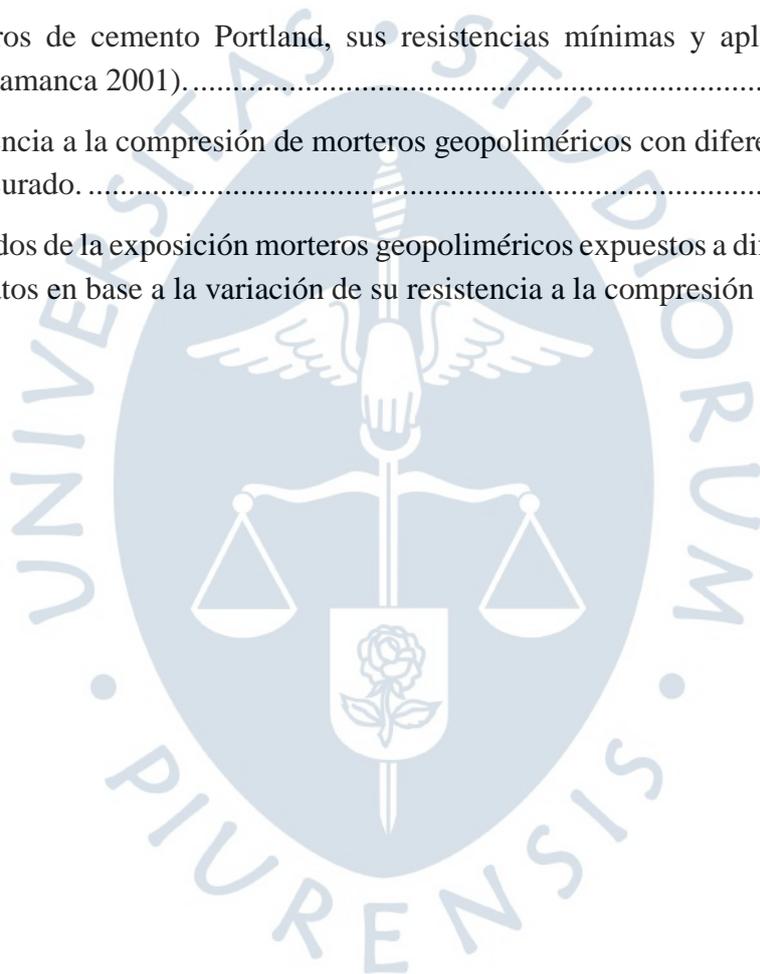
<b>Introducción</b> .....	13
<b>Capítulo 1 Marco teórico de los geopolímeros</b> .....	17
<b>1.1 Definición</b> .....	17
<b>1.2 Mecanismo de geopolimerización</b> .....	19
<b>1.3 Factores que influyen en las propiedades del geopolímero</b> .....	21
<b>1.3.1 Calidad del precursor sólido</b> .....	22
<b>1.3.2 De la solución alcalina</b> .....	25
<b>1.3.3 De las condiciones de curado</b> .....	28
<b>Capítulo 2 Estructura interna del mortero geopolimérico y las técnicas usadas para su análisis</b> .....	31
<b>2.1 Microestructura de geopolímeros</b> .....	31
<b>2.2 Composición química/cristalinidad de geopolímeros</b> .....	35
<b>2.3 Tipos de enlaces en los geopolímeros</b> .....	37
<b>Capítulo 3 Propiedades físicas</b> .....	41
<b>3.1 Porosidad</b> .....	41
<b>3.2 Absorción</b> .....	45
<b>3.3 Trabajabilidad</b> .....	47
<b>Capítulo 4 Propiedades mecánicas</b> .....	51
<b>4.1 Resistencia a la compresión</b> .....	51
<b>4.2 Resistencia a la flexión</b> .....	55
<b>Capítulo 5 Propiedades de durabilidad</b> .....	59
<b>5.1 Resistencia a elevadas temperaturas</b> .....	59
<b>5.2 Resistencia a ataques ácidos y sulfatos</b> .....	62
<b>Capítulo 6 Adherencia con otros materiales</b> .....	69

<b>Conclusiones</b> .....	73
<b>Recomendaciones</b> .....	75
<b>Referencias bibliográficas</b> .....	77



### Lista de tablas

Tabla 1. Influencia del material precursor en la porosidad final del mortero geopolimérico. .	45
Tabla 2. Morteros de cemento Portland, sus resistencias mínimas y aplicaciones (Fuente: Adaptado de Salamanca 2001).	51
Tabla 3. Resistencia a la compresión de morteros geopoliméricos con diferentes precursores y condiciones de curado.	55
Tabla 4. Resultados de la exposición morteros geopoliméricos expuestos a diferentes soluciones de ácidos y sulfatos en base a la variación de su resistencia a la compresión y masa.	64





## Lista de figuras

Figura 1. Disposición final de la basura en el Perú (Fuente: INEI - Instituto Nacional de Estadística e Informática 2015).....	14
Figura 2. Proceso de producción de geopolímeros (Fuente: Adaptación de Klaartje De Weerdt 2011).....	18
Figura 3. Tres etapas del proceso de geopolimerización.....	20
Figura 4. Variación de la resistencia a la compresión de diferentes morteros geopoliméricos según su tamaño de partícula.....	25
Figura 5. Resistencia a la compresión de morteros geopoliméricos en diferentes condiciones de curado.....	30
Figura 6. Imagen SEM de geopolímero de caolinita, albita y FA (Fuente: Xu y Van Deventer 2002).....	32
Figura 7. Análisis SEM-EDX de un geopolímero de FA (Fuente: Chindaprasirt et al. 2009). 32	
Figura 8. Imagen SEM de pastas geopoliméricas de BA con (A) y sin (B) promotores de calcio (Fuente: Hanjitsuwan et al. 2017). ....	33
Figura 9. Imagen SEM de mortero geopolimérico de FA (A) y FA con MK (B) (Fuente: Kaur et al. 2018).....	34
Figura 10. Imágenes SEM de la microestructura de geopolímeros a base de MK en medio alcalino (A) y medio ácido (B) (Fuente: Ng et al. 2018). ....	34
Figura 11. Patrones XRD del precursor BA (A) y de los geopolímeros BA (B y C) con promotores de calcio a los 28 días (Fuente: Hanjitsuwan et al. 2017). ....	36
Figura 12. Análisis XRD de FA y escoria como precursores sólidos (Fuente: Ismail y El-Hassan 2018).....	37
Figura 13. Espectros FTIR de pastas geopoliméricas de FA con diferente concentración molar (M) de NaOH (Fuente: Chindaprasirt et al. 2009). ....	38
Figura 14. Espectros FTIR de (a)POFA, (b)POFA con aditivo y (c)Mortero geopolimérico de POFA (Fuente: Mijarsh et al. 2014).....	39

Figura 15. Relación entre la porosidad y la resistencia a la compresión de los morteros geopolimérico fabricados con diferentes activadores alcalinos y mortero tradicional de cemento portland PC (Fuente: Shi 1996).....	42
Figura 16. Variación de la porosidad con la molaridad de NaOH en diferentes tiempos de curado de morteros geopoliméricos de FA (Fuente: Adaptación de Görhan y Kürklü 2014). .....	44
Figura 17. Capacidad de absorción de morteros geopoliméricos a base de diferentes precursores sólidos en diferentes condiciones de curado. ....	46
Figura 18. Comportamiento de las muestras de morteros con diferentes proporciones de componente líquido y diferente composición del precursor sólido sobre la mesa de fluidez (Fuente: Novais et al. 2019). .....	50
Figura 19. Efecto de la temperatura de curado sobre la resistencia a la compresión de morteros de geopolímero a base de FA en edades tempranas (Fuente: Shukor Lim et al. 2018). .....	52
Figura 20. Efecto de la duración del curado por calor (90 °C) sobre la resistencia a la compresión de los morteros geopoliméricos a edades tempranas (Fuente: Shukor Lim et al. 2018).....	53
Figura 21. Evolución de la resistencia a la compresión relativa de diferentes morteros geopoliméricos reportados en la literatura. ....	54
Figura 22. Resistencia a la flexión de morteros geopoliméricos y su variación de acuerdo con las diferentes concentraciones Molar de NaOH en la fabricación de las muestras.....	56
Figura 23. Resistencia a la flexión de morteros geopoliméricos y su variación según la edad de prueba del espécimen para muestras de metacaolín (MK), cenizas volantes (FA) y su comparación con cemento Portland convencional (PC).....	57
Figura 24. Resistencia a la compresión relativa después de la exposición a varias temperaturas elevadas de los morteros geopoliméricos.....	61
Figura 25. Morteros geopolimérico de FA, después de las exposiciones a temperaturas de 25°C, 300°C, 600°C y 900°C (Fuente: Wongsa et al. 2020).....	62
Figura 26. Efecto de la temperatura de curado sobre la resistencia a la compresión residual de morteros geopoliméricos después de 48 semanas de inmersión en sulfatos reportados en la literatura. ....	65
Figura 27. Aspecto visual de morteros geopoliméricos de FA después de un año de exposición en solución de ácido sulfúrico (Fuente: Wallah y Rangan 2006).....	67
Figura 28. Aspecto visual de mortero geopolimérico de FA y el mortero PC después de un año de exposición en solución de ácido sulfúrico (2%) (Fuente: Bhutta et al. 2013).....	67
Figura 29. Imagen SEM de la interfaz madera-mortero geopolimérico observada en geopolímeros de MK (Fuente: Gouny et al. 2012).....	70

## Introducción

En los últimos años, la preocupación por el cambio climático y el control del efecto invernadero en el planeta Tierra ha hecho que las diversas industrias reevalúen su aporte a tales problemas. La industria de la construcción no es ajena a esta situación, y en la actualidad muchos trabajos de investigación se están llevando a cabo en todo el mundo para buscar soluciones alternativas (Ng et al. 2018) que intentan minimizar el daño ecológico que provoca la producción de los cementos convencionales.

La producción del cemento es responsable del 4% del calentamiento global provocado por el hombre (Venugopal y Radhakrishna 2016b). Se estima que la producción de una tonelada de cemento libera aproximadamente 1 tonelada de dióxido de carbono a la atmósfera (Gholampour et al. 2019). Considerando los elevados niveles de producción de cemento en el mundo, la producción anual de CO<sub>2</sub> debido a esta actividad representa entre el 5 y el 7% de las emisiones a nivel mundial (Gholampour et al. 2019; Castaldelli et al. 2016). Además, como el concreto es el material de construcción más utilizado, la explotación de los recursos naturales como la arena y el agregado grueso es también creciente ya que los agregados representan el 75% del material de concreto.

Por otro lado, la producción de subproductos industriales y desechos está aumentando rápidamente debido a la industrialización y la urbanización sin restricciones y de rápido crecimiento. Millones de toneladas de desechos industriales se generan cada año, causando problemas ambientales debido a la escasez de instalaciones de almacenamiento y eliminación segura (Bashar et al. 2016).

Un estudio privado encargado por Befesa, empresa que opera el único depósito de seguridad en el Perú destinado al tratamiento y disposición final de residuos industriales peligrosos, señala que en el Perú se generan más de 500,000 toneladas de residuos industriales peligrosos, de los cuales poco más del 5% es llevado a una planta especializada para su tratamiento y disposición final. El 95% restante va a parar a los rellenos sanitarios, botaderos, quebradas, desiertos, a orillas de los ríos, lagos y mar, donde se mezclan con los desechos orgánicos convirtiéndose en un grave foco de contaminación ambiental (Noticias RSE 2013).

Los diferentes lugares usados como destino final para la basura conducen a la contaminación de la tierra y el agua en las cercanías de las fábricas e incluso del aire. Según el INEI (2015), aproximadamente el 70 % de los residuos son tratados en botaderos a cielo abierto y apenas un 25% se recicla (Figura 1). A esto se suman los restos de demolición de estructuras de concreto o ladrillo que ya han cumplido su vida útil y que requieren un espacio para su

gestión final. Los proyectos de demolición a menudo producen de 20 a 30 veces más material de desecho por metro cuadrado que los proyectos de construcción nuevos (Jeffrey 2011).

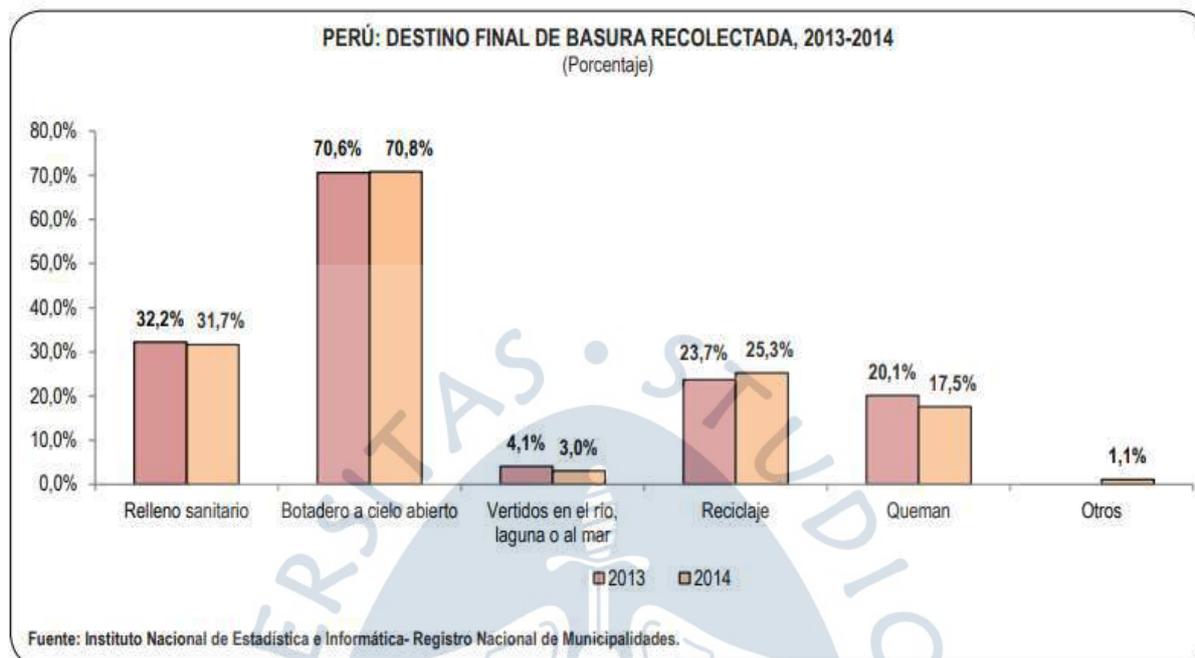


Figura 1. Disposición final de la basura en el Perú (Fuente: INEI - Instituto Nacional de Estadística e Informática 2015).

Además de los esfuerzos por reducir la producción de desechos se exploran nuevas formas para convertirlos en materias primas potenciales para nuevos productos de construcción (Ng et al. 2018). En esta línea se ubican los geopolímeros como materiales alternativos al mortero o concreto de cemento Portland que, además, aprovecha residuos industriales de determinadas características. De hecho, el diseño óptimo del geopolímero requiere menos energía y podría producir un 80% menos de emisiones de CO<sub>2</sub> que el cemento Portland (Tchadjie y Ekolu 2018).

El geopolímero es un material que se obtiene combinando materiales sólidos ricos en sílice y alúmina con una solución de silicato de sodio o de potasio de elevada concentración alcalina que se cura en presencia de humedad (no bajo agua) y a temperaturas por debajo de los 100°C. Algunos geopolímeros que logran la resistencia deseada en condiciones de curado a temperatura ambiente, sin calentamiento externo, emiten en su producción un 44-64% menos cantidad de gases de efecto invernadero al medio ambiente en comparación con la producción de cemento Portland (Ng et al. 2018).

Las propiedades físicas y mecánicas son similares a las de los cementos convencionales usados en construcción, pero con mayor resistividad a los ácidos y menores problemas de contracción (Ng et al. 2018). Además, muestran algunas propiedades atractivas para aplicaciones específicas, tales como endurecimiento rápido, alta resistencia temprana, estabilidad bajo ataque químico, resistencia a altas temperaturas como cualquier otro cerámico y baja permeabilidad (Tchadjie y Ekolu 2018).

A pesar de la amplia variedad de propiedades y características, incluyendo alta resistencia a la compresión, fraguado rápido o lento, resistencia al fuego y baja conductividad térmica, atributos comúnmente presumidos, estas propiedades no son necesariamente inherentes a todas las formulaciones geopoliméricas (Duxson et al. 2007). Los geopolímeros no deben considerarse una panacea universal para todos los problemas de selección de materiales, sino más bien una solución que puede adaptarse para optimizar las propiedades y/o reducir el costo de una aplicación determinada (Duxson et al. 2007).

Otra ventaja adicional de los geopolímeros frente a los cementos convencionales en la industria de la construcción es que el material sílico-aluminato requerido para su síntesis puede ser cualquiera, incluso residuos industriales, lo cual implica una gran ventaja por el impacto que tiene en la contaminación ambiental y la sostenibilidad. Además, se pueden utilizar compuestos naturales no costosos (arcilla, lodos de papel reciclado, lodo rojo, caliza, etc.) como materiales correctivos de los materiales originales de Al-Si para mejorar su reactividad en el proceso de geopolimerización y, en consecuencia, la resistencia mecánica de los productos finales (Valera et al. 2013).

Las aplicaciones de los geopolímeros han empezado a trascender el ámbito de laboratorio. En 2013, se construyó en Australia el primer edificio público del mundo con concreto geopolimérico estructural. En noviembre de 2014, se inauguró el Aeropuerto Brisbane West Wellcamp (BWWA) en Australia, marcando un hito muy importante en ingeniería por ser el proyecto de concreto geopolímero moderno más grande del mundo. La empresa Wagners Group suministró un concreto geopolimérico comercial bajo la marca "Earth Friendly Concrete" (EFC) para la construcción de pavimentos para aeronaves de servicio pesado, que cubrían unos 50,500 m<sup>2</sup> de área con un espesor de 435 mm. Además de los pavimentos, se utilizaron otros 15,000 m<sup>3</sup> de concreto geopolimérico en una variedad de aplicaciones (Glasby et al. 2015).

Estos ejemplos de construcciones reales hechos con materiales geopoliméricos muestra el interés y la viabilidad de este aglutinante como reemplazo del cemento Portland. Un aspecto que está en discusión aún es el costo del geopolímero en comparación con el del cemento Portland, pues no siempre es beneficioso. McLellan et al. (2011) evaluaron los costos en el contexto de Australia y encontraron que existe una amplia variación en el costo financiero que puede ser beneficioso o perjudicial, dependiendo de la ubicación de la fuente, la fuente de energía y el modo de transporte de los insumos para su producción.

En la Región Piura se ha identificado el catalizador gastado de la refinación del petróleo provenientes de la refinería de Talara como un material con adecuado contenido de aluminosilicatos y descargado en volúmenes que alcanzan las 1,400 toneladas anuales y que ha probado ser adecuado para la síntesis de geopolímeros (Ruiz et al. 2019b). También hay en la Región Piura otros materiales con contenido de sílice elevado que podrían ser evaluados como posibles complementos para formar los geopolímeros como la ceniza de la cáscara de arroz (Mahboob 2014) y cenizas de caña de azúcar (Moraes et al. 2016). Tan sólo en el 2017, el Perú

produjo 9,399.6 miles de ton de caña de azúcar y 3,038.5 miles de ton de cáscara de arroz (Ministerio de Agricultura y Riego, INEI).

Siendo un material relativamente nuevo, hay escasa información y la mayoría se encuentra en otros idiomas. Una revisión sistemática de la información referente a la producción de los geopolímeros y su detalle en español será un buen punto de inicio para su desarrollo en la Región Piura, considerando el potencial que hay de diversas fuentes de materiales sílico-aluminatos.



## **Capítulo 1**

### **Marco teórico de los geopolímeros**

#### **1.1 Definición**

El término "geopolímero" se usa genéricamente para describir un aluminosilicato alcalino amorfo que corresponde a la familia de los polímeros inorgánicos que consisten esencialmente en una estructura tridimensional cuya unidad repetitiva es el monómero silicato ( $-\text{Si} - \text{O} - \text{Al} - \text{O}-$ ) (Singh et al. 2015).

Dada la novedad del material, los geopolímeros han adoptado diversos nombres: cementos activados con álcali, geocementos, álcalis, hidrocerámica, cemento para suelos, vidrio de aluminosilicato a baja temperatura, cemento activado con álcali, cerámica unida con álcali, hormigón polimérico inorgánico, etc. Sin embargo, todos estos términos describen materiales sintetizados utilizando la misma química y ahora el geopolímero se ha convertido en un término técnico aceptado (Klaartje De Weerd 2011).

El geopolímero se sintetiza mezclando a temperatura ambiente, un polvo de aluminosilicato reactivo (p. ej. cenizas volantes, metacaolín, arcilla calcinada) con un activador altamente alcalino que contiene hidróxido de sodio o potasio o una combinación con silicatos (ver Figura 2). A este polvo sólido rico en aluminosilicatos se le llama de diversas formas como precursor sólido, materia prima, aglutinante, fuentes de aluminosilicato, etc. De ahora en adelante, en el presente trabajo, se le denominará precursor sólido. El producto de la reacción es principalmente una fase aluminosilicato amorfo constituido por tetraedros de sílice y alúmina que comparten enlaces de óxido  $\text{SiO}_4$  y  $\text{AlO}_4$  interconectados formando una estructura tridimensional.

Es importante señalar que un verdadero geopolímero debe ser bajo en calcio para evitar la formación de compuestos discretos de calcio (Klaartje De Weerd 2011). Este detalle es de vital importancia, pues todas las propiedades de durabilidad y resistencia a los ácidos que poseen los geopolímeros son consecuencia del bajo o nulo contenido de calcio. Son estas propiedades lo que le da la ventaja competitiva frente al cemento Portland convencional (PC).

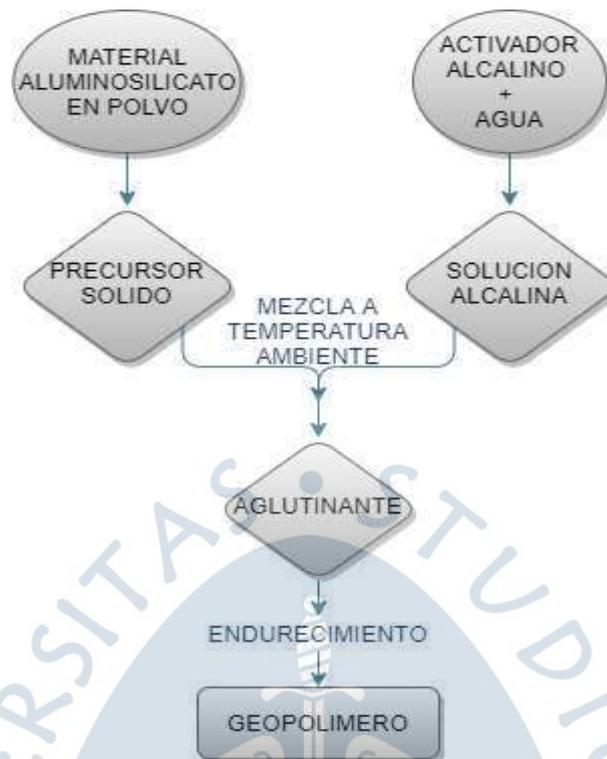


Figura 2. Proceso de producción de geopolímeros (Fuente: Adaptación de Klaartje De Weerd 2011).

Así como se muestra en la Figura 2, la fabricación de un geopolímero empieza desde la caracterización del precursor sólido y la determinación de la molaridad de la solución alcalina óptima para su activación. Para ello es necesario realizar el diseño en el laboratorio usando el método de prueba y error. Este diseño implica determinar 2 parámetros fundamentales: la concentración molar de la solución alcalina y la cantidad de solución alcalina para lograr la activación del precursor sólido como geopolímero.

La producción del geopolímero se inicia mezclando los materiales sólidos por un tiempo de entre 3 a 10 minutos en seco, luego del cual se añade la solución activadora previamente determinada. Esta mezcla puede durar varios minutos, luego de los cuales se añade los agregados: si es mortero, se añade la arena seleccionada y si es concreto, arena y grava. La mezcla se combina hasta lograr suficiente homogeneidad.

Los agregados pueden añadirse en condición seca o condición superficie seca saturada (SSD), dependiendo de las condiciones del geopolímero original y las propiedades finales que se deseen lograr en el material final. Todo este proceso de mezclado de los elementos se realiza a temperatura ambiente ( $25^{\circ}\text{C} - 30^{\circ}\text{C}$ ).

Una vez que la mezcla está lista, se procede al vaciado en molde y el proceso de curado que puede realizarse a temperatura ambiente o a temperatura elevada (por encima de los  $30^{\circ}\text{C}$ , pero por debajo de los  $100^{\circ}\text{C}$ ), pero siempre a en un ambiente con una humedad del 100%.

Todas las condiciones para la producción de los geopolímeros (molaridad y cantidad de la solución activadora, tiempo de mezcla, condición de humedad del agregado y temperatura

de curado) deben ser determinadas en laboratorio y cambian significativamente cuando se modifica el tipo de precursor sólido y su composición química. Aunque esto puede ser una dificultad, constituye también una oportunidad por las mayores posibilidades de mejorar las propiedades finales del material geopolimérico final.

## 1.2 Mecanismo de geopolimerización

La geopolimerización puede transformar desechos de alúmino-silicato a gran escala en productos geopoliméricos de valor agregado con buena resistencia mecánica y alta resistencia a ácidos, fuego y bacterias (Xu y Van Deventer 2002).

Se puede utilizar un medio alcalino (Na +, K +, Li +, Ca +, etc.) o medio ácido como ácido fosfórico o ácido húmico para sintetizar el geopolímero (Ng et al. 2018). Por lo general, el medio alcalino más usado es el de potasio y sodio.

En condiciones altamente alcalinas, el proceso de geopolimerización tiene lugar cuando los óxidos de aluminosilicatos reaccionan con la solución alcalina, es decir, los aluminosilicatos reactivos se disuelven rápidamente y se liberan unidades tetraédricas  $[\text{SiO}_4]$  y  $[\text{AlO}_4]$ . Estas unidades tetraédricas se reordenan y se ubican alternativamente al precursor polimérico al compartir el átomo de oxígeno, formando así enlaces poliméricos Si-O-Al-O (Ng et al. 2018; Singh et al. 2015).

El mecanismo exacto de fraguado y endurecimiento del material de geopolímero no está claro aún. Sin embargo, el mecanismo hasta ahora aceptado consiste en una reacción química de 3 etapas, que son disolución, formación de unidades poliméricas y solidificación o policondensación (Ruiz 2019; Tchadjie y Ekelu 2018; Mahboob 2014; Abdullah et al. 2011).

**(1) Disolución.** Consiste en la disolución de los enlaces moleculares del precursor sólido (óxidos de  $\text{SiO}_2$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) en átomos de Si y Al a través de la acción de iones hidróxido alcalinos, aumentando el pH de la solución, para luego convertirse en gel con la presencia del agua.

**(2) Formación de las unidades poliméricas.** Consiste en la reorganización de las especies del precursor sólido (los átomos que se mueven libremente dentro del gel) para formar cadenas y enlaces crecientes utilizando el agua como medio capilar. Esto da como resultado una solución saturada de aluminosilicatos y, por lo tanto, comienzan a formar monómeros.

**(3) Solidificación o policondensación.** La policondensación ocurre cuando los monómeros comienzan a formar polímeros, seguido de oligómeros, eventualmente redes de cadenas tridimensionales y el proceso continúa ocurriendo, dando como resultado una estructura tridimensional cada vez más sólida.

Finalmente, las estructuras poliméricas que se forman en el proceso de policondensación son de tipo Poli - sialato (-Si-O-Al-O-), Poli - sialato-siloxo (-Si-O-Al-O-Si-O-) y Poli - sialato-disiloxo (-Si-O-Al-O-Si-O-Si-O-). En la Figura 3 se ha esquematizado las reacciones que ocurren durante las 3 etapas del proceso de geopolimerización, con el detalle de los óxidos, los monómeros y las estructuras poliméricas finales en la etapa de solidificación al final del proceso de geopolimerización (Ng et al. 2018).

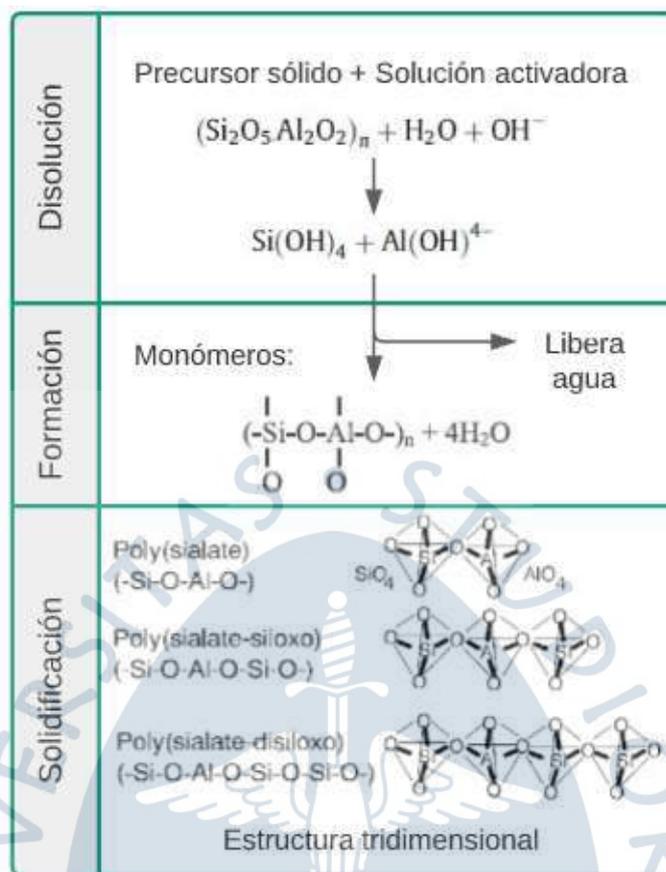


Figura 3. Tres etapas del proceso de geopolimerización.

Sialato es una abreviatura utilizada para representar el silicio-oxo-aluminato alcalino. En una red de sialato compuesta de silicato ( $\text{SiO}_4$ ) y aluminato ( $\text{AlO}_4$ ) que se conecta tetraédricamente al compartir el átomo de oxígeno se requieren iones positivos en las cavidades de la estructura para igualar la carga negativa de iones de aluminio (Ng et al. 2018; Abdullah et al. 2011).

La fórmula empírica de poli-sialato es la siguiente:



Dónde:

M es un catión alcalino ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}_2^+$ )

n es el grado de policondensación<sup>1</sup>

z es 1, 2, 3 o mayor.

<sup>1</sup> La policondensación consiste en la formación de cadenas poliméricas mediante una reacción química, la cual se produce con el desprendimiento de algún tipo de molécula básica como  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{HCl}$ , etc. El grado de policondensación es una medida de la extensión de las reacciones de polimerización, es decir, es una estimación de la longitud que han alcanzado las cadenas durante el proceso de polimerización. Se define como el número de monómeros promedio que se repiten en la cadena polimérica. (Balarta, 2007).

A diferencia de la reacción química del agua en la mezcla de cemento Portland (PC) durante el proceso de hidratación, en la geopolimerización se produce una expulsión del agua o deshidroxilación para formar el enlace (Singh et al. 2015; Mahboob 2014). Como se ha mostrado en las reacciones químicas, el agua se requiere para el proceso de disolución, en el cual es consumida según la cantidad de silicatos y aluminatos presentes en el precursor sólido.

A medida que se va formando el poli-sialato, se va liberando el agua en el proceso denominado deshidroxilación, mencionado anteriormente. Esta agua libre proporciona parte de la trabajabilidad de la mezcla durante la manipulación. En la medida que la solidificación se va dando, esta agua libre es expulsada al exterior, manifestándose como una película húmeda en la superficie del geopolímero. Por ello, la matriz de gel del geopolímero es normalmente más densa que la del PC, evitando la interconectividad de los microporos (Ng et al. 2018).

### **1.3 Factores que influyen en las propiedades del geopolímero**

El criterio principal para desarrollar geopolímeros estables es que los precursores sólidos deben ser altamente amorfos y poseer suficiente contenido vítreo reactivo, baja retención de agua y poder liberar aluminio fácilmente (Singh et al. 2015).

Además, se ha demostrado que el tipo y concentración del activador usado así como la variabilidad en el origen de las materias primas son variables que afectan sustancialmente al desarrollo microestructural de los geopolímeros sintetizados, especialmente desde el punto morfológico (Palomo et al. 2004), y aunque muchas características macroscópicas de los geopolímeros preparados a partir de diferentes precursores sólidos pueden parecer similares, su microestructura y propiedades físicas, mecánicas, químicas y térmicas varían en gran medida dependiendo predominantemente de la materia prima de la que se derivan (Duxson et al. 2007).

De igual manera varían con las condiciones ambientales, especialmente la humedad y la temperatura deben tenerse en cuenta en la aplicación futura de este nuevo material (Zuhua et al. 2009). Asimismo, las propiedades de los geopolímeros se pueden optimizar mediante la selección adecuada de las materias primas, con la mezcla correcta y el diseño de su procesamiento para adaptarse a una aplicación particular (Tchadjie y Ekolu 2018; Singh et al. 2015; Duxson et al. 2007).

En general, se podrían establecer como tres los factores principales que afectan las propiedades del geopolímero: 1) la calidad del precursor sólido, 2) la molaridad de la solución activadora junto con la relación líquido-precursor y 3) la temperatura de curado y la duración de su aplicación (Ng et al. 2018; Celikten y Sandemir 2018; Zuhua et al. 2009). Estos factores están interrelacionados y cada uno juega un papel importante, pero puede no ser suficiente para un buen desarrollo de la resistencia. Por ello, se recomienda que los efectos de estos factores no debieran considerarse individualmente cuando se estudia una materia prima específica (Tchadjie y Ekolu 2018).

### 1.3.1 Calidad del precursor sólido

La reactividad de estas fuentes de aluminosilicato depende de su composición química, composición mineralógica, morfología, finura y contenido en fase amorfa (Tchadjie y Ekolu 2018; Ndjock et al. 2017; Singh et al. 2015; Klaartje De Weerd 2011).

**1.3.1.1 Composición química.** Existe una amplia gama de precursores sólidos disponibles que se pueden usar para la producción de geopolímeros. Se pueden dividir en tres clases principales: subproductos de otra industria, polvos de aluminosilicato reactivo natural y aluminosilicatos activados. Todos ellos tienen en común que contienen sílice reactiva y alúmina.

De los óxidos comunes en la química de geopolímeros, es decir,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  y  $\text{CaO}$ , la alúmina y la sílice son los dos óxidos principales que controlan la formación de la red geopolimérica y el desarrollo de la resistencia. Por lo tanto, las propiedades de los geopolímeros pueden verse significativamente afectadas por cambios menores en la cantidad de Si y Al disponibles para la reacción (Tchadjie y Ekolu 2018; Zuhua et al. 2009; Barbosa et al. 2000).

La reactividad de los precursores sólidos para la geopolimerización se puede definir por su capacidad para liberar adecuadamente especies de alúmina y sílice en medio alcalino, lo cual garantiza el desarrollo de la red rígida de geopolímero (Tchadjie y Ekolu 2018).

La presencia de aluminio es esencial para la solidificación del geopolímero. Las soluciones altamente concentradas de silicato alcalino son generalmente metaestables y la sílice soluble en sí misma no es suficiente para producir un material químicamente endurecido. Los compuestos formados por silicatos se disuelven cuando entran en contacto con el agua. En ese sentido, la presencia de aluminio proporciona el desencadenante químico del endurecimiento químico irreversible (Klaartje De Weerd 2011; Duxson et al. 2007).

De esta manera, la geosíntesis depende de la capacidad del ion aluminio para inducir cambios cristalográficos y químicos en una columna vertebral de sílice (Abdullah et al. 2011). Dicho de otro modo, el Al es indispensable para lograr la formación de un geopolímero.

Los aluminosilicatos alcalinos tienen una solubilidad muy baja. La distribución de tetraedros de silicato y tetraedros de aluminato da como resultado enlaces Si-O-Si y Si-O-Al, mientras que los enlaces Al-O-Al no se forman ya que no se favorecen energéticamente. Sin embargo, tiene que estar presente suficiente aluminio para tener una red estable de aluminosilicato (Klaartje De Weerd 2011).

Por otro lado, Majidi (2009) encontró que la cinética de la geopolimerización y la velocidad de fraguado del gel geopolimérico están controladas principalmente por el  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , mientras que el contenido de Si es responsable del desarrollo posterior de la resistencia del producto. Por esa razón, los autores que se enfocan en la resistencia a la compresión de los geopolímeros se basan en la influencia de la relación Si/Al sobre el comportamiento final del geopolímero.

Davidovits (2015) define este rango entre 3.50 y 4.50 en base a sus investigaciones sobre geopolímeros de metacaolín (MK, por sus siglas en inglés). Otro estudio encontró que la proporción adecuada de  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  es variable según el precursor sólido, pues en el caso de cenizas volantes (FA, por sus siglas en inglés) con alto contenido de calcio este parámetro está entre 3.20 y 3.70, mientras que para el MK está entre 3.00 y 3.80 (Hanjitsuwan et al. 2017).

Se puede decir, entonces, que la relación Si/Al no es directa ni inversamente proporcional a su comportamiento mecánico, sino óptima, y que una relación muy alta o muy baja desfavorece la resistencia mecánica de los geopolímeros en general. Se cree que, a medida que hay más sílice soluble en la mezcla, la cinética de la reacción de geopolimerización y la velocidad de cristalización se modifican. Sin embargo, un exceso de sílice puede reducir la eficiencia de la reacción.

Si bien aumentar la sílice soluble generalmente mejora la geopolimerización, cantidades excesivas pueden reducir el grado de reactividad, disminuyendo la resistencia mecánica (Ismail y El-Hassan 2018). Esto queda demostrado en los resultados de Islam et al. (2014) que evaluó morteros geopoliméricos a base de cenizas de combustible de aceite de palma (POFA), FA y escoria granulada de alto horno (BFS granulada). Al combinar estos precursores sólidos para variar la relación Si/Al se encontró que con un valor de 3.71 se obtenía una resistencia a la compresión de 66 MPa, contra resistencias de 18 MPa y 9 MPa obtenidas con relaciones Si/Al de 11.43 y 2.01, respectivamente.

De igual manera otros factores parecen jugar también un papel importante en la resistencia a la compresión resultante. La presencia de CaO altera significativamente el comportamiento de un geopolímero. Díaz et al. (2010) encontró que en geopolímeros basados en FA, los contenidos de CaO mayores al 15% incrementan la resistencia a la compresión del geopolímero, pero también incrementan el tiempo de fraguado. Además, se conoce que cualquier exceso en el contenido de cal hace que el material sea defectuoso y causa expansión y desintegración (Islam et al. 2014).

**1.3.1.2 Composición mineralógica.** Está ampliamente aceptado que las fases amorfas son los componentes reactivos en la reacción de geopolimerización. Por lo general, la mayoría de las fases cristalinas apenas se disuelven durante las reacciones de geopolimerización (Tchadjie y Ekolu 2018). Por ello, la composición y cantidad de la fase amorfa influye en la resistencia a la compresión del geopolímero.

La presencia de fases amorfas se corresponde generalmente con la coexistencia entre silicato cálcico hidratado (C-S-H) y aluminosilicato sódico hidratado (N-AS-H). Además, el C-S-H adicional es esencial para aumentar el desarrollo de la resistencia de la matriz de geopolímero (Hanjitsuwan et al. 2017; Mijarsh et al. 2014). Ndjock et al. (2017) encontraron que las mejores resistencias a la compresión se obtuvieron cuando había una gran cantidad de fase amorfa a pesar de tener una relación molar baja de  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ . De igual manera, Williams y Van Riessen (2010) informaron que usar la composición amorfa en el cálculo del diseño de mezclas de los geopolímeros permitió obtener productos con mejor resistencia a la compresión que los formulados usando la composición química a granel. Sin embargo, lograr esta

determinación de la fase amorfa en el material puede ser complejo y no se garantiza con los métodos de determinación actuales.

**1.3.1.3 Finura.** El tamaño de partícula, la distribución del tamaño de las partículas o la finura del precursor sólido controlan su reactividad al facilitar el proceso de disolución (Ruiz 2019; Tchadjie y Ekolu 2018; Pereira et al. 2015; Klaartje De Weerd 2011). Debido a que una parte significativa de la reacción ocurre en la interfaz partícula-líquido, cuanto más finas son las partículas, mayor es el área de superficie y más reactivo es el precursor (Díaz et al. 2010).

Las partículas finas también son capaces de llenar los vacíos y producir especímenes más densificados que los hacen más fuertes a las cargas aplicadas (Ruiz 2019). En general, la mejora de la reactividad geopolimérica se observa con la reducción del tamaño de partícula del precursor sólido. Por eso algunos autores afirman que aplicaron tratamientos a sus precursores sólidos para obtener un diámetro medio de partícula menor a 35  $\mu\text{m}$  (Pereira et al. 2015). Asimismo, las investigaciones de Islam et al. (2014) sobre los efectos del tamaño de las partículas del precursor en las propiedades del geopolímero demostraron que cuanto más fino es el tamaño de las partículas, mejores son las propiedades.

Por ejemplo, Temuujin et al. (2009) observaron que una reducción del tamaño medio ( $d_{50}$ ) de 14.4  $\mu\text{m}$  para FA en bruto a 6.8  $\mu\text{m}$  para FA molidas, condujo a un aumento del 80% en la resistencia a la compresión de la pasta de geopolímero resultante. Hanjitsuwan et al. (2017) trabajó en la fabricación de morteros geopolímeros de precursores combinados, utilizando las cenizas de fondo<sup>2</sup> (BA) con la inclusión del PC y los residuos de carburo de calcio (CCR), para mejorar su resistencia a la compresión con la aportación de sus partículas más finas. Se demostró que con la inclusión de PC ( $d_{50} = 14.6 \mu\text{m}$ ) en el mortero geopolimérico de BA ( $d_{50} = 32.3 \mu\text{m}$ ) mejoró su resistencia a la compresión pasando de 5.8 MPa a 13.8 MPa, lo cual fue mayor en comparación con la inclusión de CCR ( $d_{50} = 21.2 \mu\text{m}$ ) que registro 11.4 MPa.

Asimismo, se sabe que las partículas de POFA son más gruesas que las de BFS granulada (a partir de ahora llamado GGBS), por lo tanto, las muestras de morteros de precursores combinados con mayor cantidad de GGBS resultaron con mayor resistencia a la compresión que las muestras con mayor POFA (Islam et al. 2014). Por lo tanto, las partículas más finas son responsables de la reacción inicial más rápida mientras que las partículas más gruesas aportan a la reacción más lentamente con un propósito secundario como micro agregado (Mahboob 2014).

En la Figura 4 se han graficado algunos resultados de resistencia a la compresión versus el  $d_{50}$  de las partículas del precursor sólido usado reportados en algunas investigaciones, para diversos precursores sólidos como BA, POFA, BFS y FA curados a diferentes rangos de temperatura. Se puede observar que la resistencia a la compresión es mayor cuando más finas

---

<sup>2</sup> Cenizas de fondo (*bottom ash*, en inglés,) son un subproducto de la combustión del carbón acumulado en la parte inferior de la caldera y presentan un tamaño más grueso que las cenizas volantes (*fly ash*, en inglés). Sin embargo, la composición química de ambos tipos de cenizas es semejantes. La proporción en la producción de ambos tipos de cenizas suele ser del 80% para las volantes frente al 20% para las de fondo (Rey Bouzón 2017).

son las partículas, aunque se aprecia también un mayor rango de variación en los resultados para esta condición. Se puede verificar también que una mayor finura del precursor sólido es favorable pero no determinante para una mayor resistencia del producto, pues existen otros factores como el tipo de precursor y la temperatura de curado. Finalmente, se puede notar que el diámetro de partícula debería limitarse a 25  $\mu\text{m}$  aproximadamente.

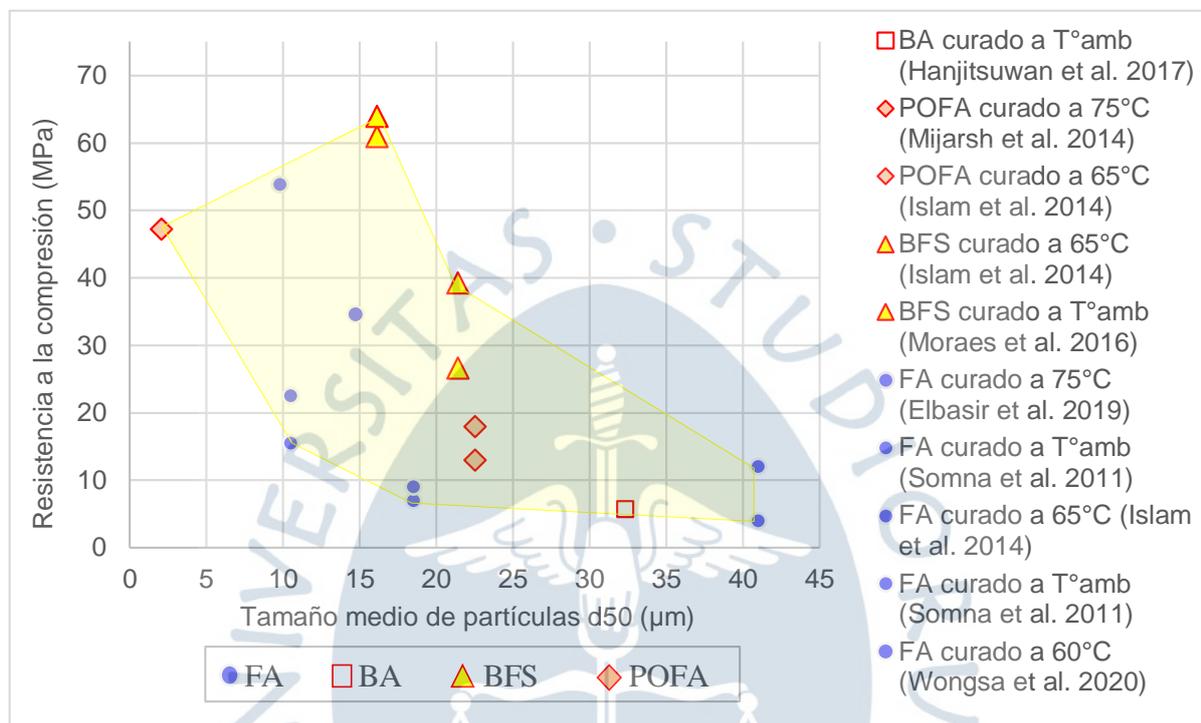


Figura 4. Variación de la resistencia a la compresión de diferentes morteros geopoliméricos según su tamaño de partícula.

### 1.3.2 De la solución alcalina

La solución alcalina es una solución con elevado pH que se utiliza para activar el material precursor. Por activación se entiende la posibilidad de disolver los componentes del precursor alcalino para liberar los átomos de Si y Al.

La solución alcalina aporta tres componentes necesarios para la geopolimerización: i) El Na o el K necesarios para la separación de los monómeros de sílice y alúmina, ii) el silicio adicional a la sílice aportada por el precursor sólido que complementa la formación de los compuestos geopoliméricos (por eso siempre se usan silicatos de potasio o de sodio) y iii) los O que terminan completando las redes tridimensionales del compuesto final.

Los activadores alcalinos más usados suelen ser una combinación de un hidróxido con un silicato, es decir: el hidróxido de sodio (NaOH) o hidróxido de potasio (KOH) y silicato de sodio ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) o silicato de potasio ( $\text{K}_2\text{SiO}_3$ ) (Görhan y Kürklü 2014). Aunque en comparación con el NaOH, el KOH tiene un mayor nivel de alcalinidad, se ha descubierto que el NaOH posee una mayor capacidad para liberar monómeros de silicato y aluminato (Singh et al. 2015; Duxson et al. 2007). También se ha verificado que la solubilidad del NaOH es mayor que el del KOH (Görhan y Kürklü 2014) siendo un activador más energético o más rápido que

el potasio (Palomo et al. 2004). Por lo tanto, el uso de NaOH es preferido para la producción de geopolímeros porque tiene un efecto importante en la estructura y la resistencia a la compresión de los geopolímeros.

Por otro lado, cuando se cambia el empleo de KOH en lugar de NaOH la microestructura del material resultante también se modifica radicalmente (Palomo et al. 2004). Duxson et al. (2007) encontró que la adición de silicio soluble en forma de silicato de sodio a las soluciones de activación utilizadas en la síntesis de geopolímeros reduce sustancialmente el nivel de ordenamiento estructural de largo alcance al aumentar la concentración de silicio, pero no parece cambiar fundamentalmente el mecanismo de reacción. En otras palabras, una mayor proporción de silicio soluble en la solución activadora produce geopolímeros más amorfos o menos cristalinos, con las consecuentes propiedades físicas y mecánicas que se derivan de ello.

Además, se ha identificado que la solución altamente alcalina complica la manipulación de los geopolímeros por ser altamente corrosiva (se requiere protección tanto de los equipos, instrumentos y del personal involucrado) y también puede conducir a una extensa eflorescencia en la superficie del material una vez solidificado, lo que genera una apariencia menos estética (Klaartje De Weerd 2011). Además, el silicato en solución tiene una elevada viscosidad, lo cual impacta también en la trabajabilidad de la mezcla y en las propiedades físicas resultantes de su acomodo y la retención de burbujas de aire dentro de la mezcla.

También se ha observado que hay un proceso de carbonatación severa que ocurre para las soluciones de activación altamente alcalinas y que dificulta la reacción de polimerización (Ruiz 2019; Görhan y Kürklü 2014; Tashima et al. 2013; Zuhua et al. 2009; Barbosa et al. 2000). En los geopolímeros, la carbonatación se da por reacción del Na acumulado en la superficie del elemento (Barbosa et al. 2000).

Pero, de todas estas consideraciones, parece que el parámetro más influyente en la resistencia a la compresión es la alcalinidad de la solución activadora. Ya que, independientemente de los tipos de activador alcalino utilizados, la resistencia a la compresión generalmente aumenta con el aumento de la concentración del activador (Part et al. 2017). Una falta de alcalinidad en la solución activadora reduce el proceso de disolución del material precursor y, en consecuencia, la formación de aglutinante (Tashima et al. 2013), disminuyendo la resistencia a la compresión final del material.

La alcalinidad de la solución activadora se controla con un parámetro denominado Módulo de silicio ( $M_s$ ) que indica la relación Na/Si en la solución. El  $M_s$  está relacionado con la relación molar  $Na_2O/SiO_2$  en la solución activadora que tiene un efecto significativo sobre la resistencia de los geopolímeros (Ruiz et al. 2019b). Este parámetro determina la cantidad de silicatos solubles presentes y es crucial para controlar la velocidad de disolución y el proceso de gelificación durante la geopolimerización (Part et al. 2017). También es llamado módulo alcalino que no tiene en cuenta el contenido de  $SiO_2$  del precursor sólido (Mahboob 2014).

Este parámetro se suele relacionar con la resistencia mecánica de los geopolímeros. Por ejemplo, Celikten y Sandemir (2018) encontraron que la resistencia a la flexión de los morteros

geopoliméricos a base de FA aumentó con el contenido de Na y el Ms. De igual manera sucede con la resistencia a la compresión que aumentó con el aumento del módulo Ms. La variación de la relación de silicato de sodio a hidróxido de sodio de 1.5 a 2.5 disminuyó la relación molar de  $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$  y condujo a una ligera caída en la resistencia con la edad. Además, la trabajabilidad podría incrementarse aumentando el Ms (Ismail y El-Hassan 2018).

También, es de aceptación general que existe una concentración ideal de la solución alcalina para una activación adecuada del precursor que garantiza la mayor resistencia mecánica del geopolímero y que una concentración mayor a la mencionada puede ser nocivo (Ruiz et al. 2019b; Part et al. 2017), es decir, el incremento de la resistencia se limita a una concentración óptima para cada combinación precursor-activador. Otros autores también confirman que la determinación de la cantidad de activador alcalino es importante para lograr una reacción eficaz con el precursor sólido (Elyamany et al. 2018).

En base a lo mencionado, Ismail y El-Hassan (2018) encontraron que en geopolímeros a base de FA, un aumento adicional de Ms por encima de 1.1 pareció tener un efecto poco significativo. Somna et al. (2011) también encontraron que la concentración de NaOH igual a 16.5 M causaba la disminución de la resistencia del mortero geopolimérico de FA debido a que la alta concentración de  $\text{OH}^-$  aceleraba la disolución de las partículas del precursor, pero impedía la policondensación. Es decir, un exceso en la concentración de iones de hidróxido provoca la precipitación del gel de aluminosilicato en las primeras etapas, lo que resulta en geopolímeros de menor resistencia. Además, los iones  $\text{OH}^-$  libres en la matriz activada por álcalis pueden cambiar la estructura del geopolímero del material (Görhan y Kürklü 2014).

Aunque la disolución de las especies Al-Si aumenta al aumentar la concentración de la solución alcalina, las cantidades excesivas de NaOH o KOH en la fase acuosa disminuyen la relación  $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$  e inhiben la policondensación, es decir, disuelven las estructuras tridimensionales que se van formando al final del proceso de geopolimerización. Por lo tanto, existe un límite para la concentración de hidróxido alcalino en la solución activadora para obtener una fase de gel de alta resistencia (Majidi 2009; Hanjitsuwan et al. 2017).

Otro parámetro importante es la relación solución activadora/sólido precursor. Esto está relacionado en primer lugar con la trabajabilidad de la mezcla que se ve influida también por la viscosidad de la solución. Se sabe que el silicato de sodio tiene una elevada viscosidad y a medida que se incrementa la cantidad de NaOH, no sólo se cambia la alcalinidad sino también la viscosidad de la solución.

Ruiz et al. (2019b) encontró que en el geopolímero de FCC<sup>3</sup> hay una cantidad líquido-sólido óptimo que garantiza la máxima resistencia a la compresión y que no depende de la alcalinidad de la solución. Para ese material, la relación es de aproximadamente 1.10 en peso. Un exceso de solución produce la segregación del precursor sólido. Por el contrario, una falta de solución produciría una mezcla excesivamente seca con elevada porosidad y cavidades por la dificultad de compactación, dejando también muchas partículas del precursor sin reaccionar.

---

<sup>3</sup> Catalizador de craqueo catalítico de fluidos gastados

Este parámetro, al igual que los anteriores, debe determinarse experimentalmente y dependen de las características del precursor sólido usado.

### **1.3.3 De las condiciones de curado**

Las condiciones de curado se refieren a la temperatura usada para propiciar la geopolimerización, tanto en la etapa de disolución como de solidificación. Pero la geopolimerización requiere un ambiente de humedad cercana al 100%, de modo que la aplicación de temperatura debería garantizar este ambiente saturado.

Los métodos de curado convencional para la aplicación de temperatura son la presión con vapor de agua caliente o en horno, donde eventualmente la aplicación de temperatura puede afectar el contenido de humedad del ambiente. En este último caso se suelen usar sistemas adicionales para proteger la muestra de la pérdida de humedad, que pueden ser muy complejos como recipientes especiales o tan sencillos como una bolsa plástica sellada (Ruiz et al. 2019a).

Sobre la condición de humedad, algunos investigadores han determinado que un curado en un ambiente con 30% de Humedad Relativa era preferible que otro con un 70% de humedad (Perera et al. 2007). En otros casos, al aplicar una condición de curado por calor se observó que no hubo cambio significativo en la estructura cristalina del geopolímero pero sí una ligera disminución de la resistencia a la compresión, debido principalmente a la reducción en el contenido de agua no evaporable (Zuhua et al. 2009). En otros casos, cuando se ha explorado la posibilidad de un curado al aire sin conservación de la humedad, se ha observado una retracción problemática durante el secado de geopolímeros de FA (Klaartje De Weerd 2011). Es claro que la humedad en el ambiente favorece la policondensación, pero al mismo tiempo la retarda, permitiendo la formación de productos de reacción de diferente grado de cristalinidad.

Se han realizado varios intentos para estudiar el efecto de diferentes condiciones de curado en las propiedades de las pastas de geopolímero. Las temperaturas de curado requeridas para la geopolimerización suelen oscilar en el rango de 40°C y 85°C para reacciones de geopolimerización completas (Singh et al. 2015).

Shukor Lim et al. (2018) encontraron que el curado a altas temperatura (hasta 90°C) aumentó la reactividad en el proceso de geopolimerización. Pero Somna et al. (2011) encontró que cuando la temperatura de curado es superior a 90°C, la muestra experimentaba una pérdida de humedad y provocaba un deterioro de la resistencia. Palomo et al. (1999) y Görhan y Kürklü (2014) encontraron que la resistencia a la compresión de geopolímeros de FA era mayor cuando el curado se hizo a 85°C que cuando se realizó a 65°C. Es decir, que un aumento en la temperatura de curado aumentaba la resistencia a la compresión mientras que no tenía un efecto significativo sobre las propiedades físicas (Görhan y Kürklü 2014).

Una temperatura elevada propicia una mayor geopolimerización, pero su aplicación prolongada puede agrietar la muestra y producir pérdida de resistencia. Rovnaník (2010) reportó que el curado de geopolímeros de MK a temperaturas de entre 40°C y 80°C aceleraba la adquisición de resistencia, pero al cabo de los 28 días, las propiedades mecánicas disminuyen en comparación con los resultados obtenidos a temperatura ambiente o a menores temperaturas.

De igual manera, Puertas et al. (2000) también encontró una mayor resistencia en edades tempranas al curar a 65°C, pero que la resistencia a una edad más tardía fue mayor cuando las muestras se curaron a temperatura ambiente (25°C).

Aunque el curado del geopolímero a temperaturas elevadas proporciona una alta resistencia inicial, el curado por calor no suele estar disponible en la construcción colada in situ. No obstante, la misma mezcla se puede curar en condiciones ambientales para lograr una resistencia razonable gradualmente a lo largo del tiempo, como en el concreto de PC.

De esta manera, la aplicación de temperatura debe darse por un tiempo limitado. La aplicación de temperatura mejora la adquisición de resistencia, pero si se extiende por un período de tiempo muy largo más bien produce una disminución en la resistencia a la compresión (Heah et al. 2011) porque debilita la microestructura de los minerales en los morteros geopoliméricos. Por lo tanto, la duración del curado por calor no debe ser superior a 24 horas en las aplicaciones prácticas (Shukor Lim et al. 2018). Por otro lado, Görhan y Kürklü (2014) también encontraron que un aumento en los tiempos de curado condujo a reducciones en los valores de porosidad de los morteros geopoliméricos de FA, por lo que en algunos tipos de geopolímeros podría ser conveniente esta aplicación prolongada de curado.

Al mismo tiempo, un interesante hallazgo es la conveniencia de una etapa de curado a temperatura ambiente sin aplicación de temperatura elevada, denominada también pre-curado, en las primeras horas de fabricación del geopolímero y antes de la aplicación de la temperatura (Ruiz et al. 2019a; Singh et al. 2015). Este pre-curado propicia un mayor desarrollo de resistencia y una mejor microestructura del material. Además, dependiendo del precursor usado, la identificación de una temperatura óptima sólo es posible si se aplica esta condición de pre-curado (Ruiz et al. 2019a).

En general, se observa en la Figura 5 que la resistencia a la compresión aumenta junto con la temperatura de curado, pero después de las 24 horas de curado la ganancia de la resistencia no es significativa, incluso deja de ser favorable cuando supera las 48 horas de curado por encima de 90°C.

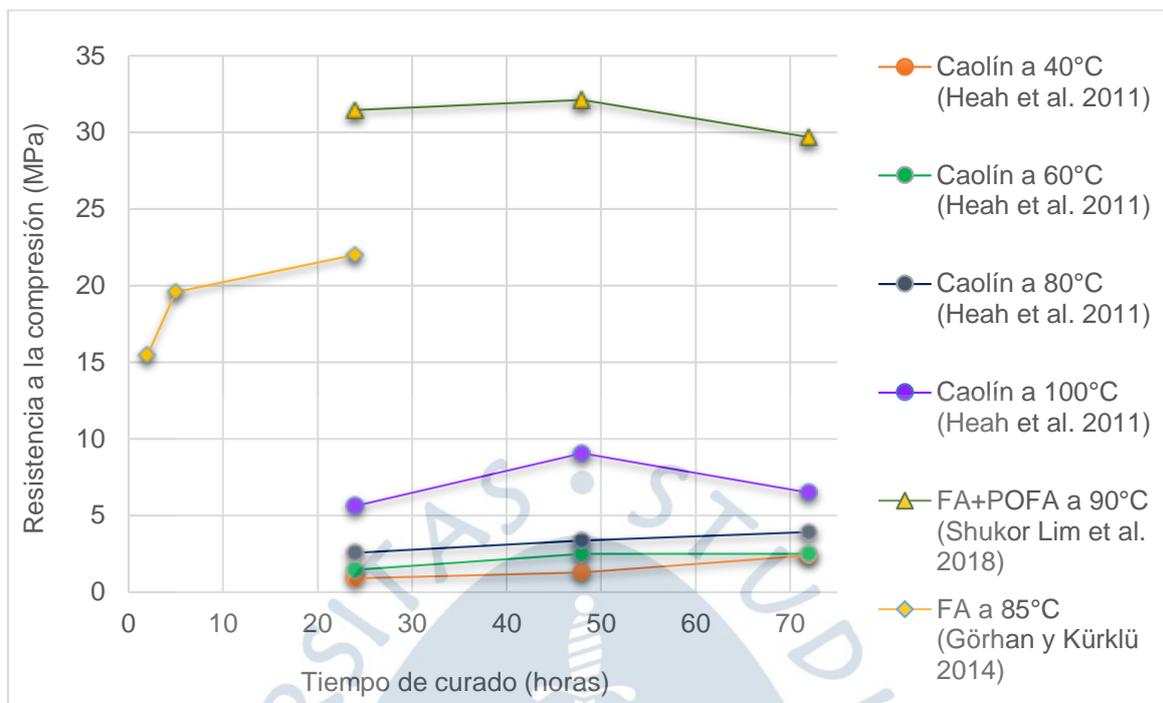


Figura 5. Resistencia a la compresión de morteros geopoliméricos en diferentes condiciones de curado.

## Capítulo 2

### Estructura interna del mortero geopolimérico y las técnicas usadas para su análisis

Se han utilizado diversas técnicas para estudiar los geopolímeros. Para seguir la cinética de la pasta del geopolímero que reacciona a una edad temprana, se pueden usar: calorimetría, reología, espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) y difracción de rayos X de energía dispersiva (EDXRD), mientras que técnicas como la resonancia magnética nuclear de giro de ángulo mágico (MAS MNR), difracción de rayos X (XRD), microscopía electrónica de barrido (SEM/EDS) y FTIR se utilizan en muestras endurecidas (Klaartje De Weerd 2011).

Para el análisis preliminar de la composición del precursor sólido y de los agregados se pueden usar también la espectroscopía por fluorescencia de rayos X (XRF), XRD y SEM/EDS (Gholampour et al. 2019; Ismail y El-Hassan 2018; Hanjitsuwan et al. 2017; Mijarsh et al. 2014; Ranjbar et al. 2014; Sukmak et al. 2013; Chindaprasirt et al. 2009; Xu y Van Deventer 2002).

También se conocen otras técnicas analíticas como la espectroscopía por fluorescencia de rayos X (XRF), microscopía electrónica de transmisión (TEM), espectroscopia de energía dispersa (EDS) y termogravimetría (TG) para aclarar las características microestructurales de los geopolímeros. Las pruebas de XRD y termogravimetría (TG) son muy útiles para detectar cambios estructurales durante la calcinación de materias primas (Majidi 2009).

#### 2.1 Microestructura de geopolímeros

La técnica utilizada para analizar la microestructura de los geopolímeros es la microscopía electrónica de barrido (SEM, del inglés Scanning Electron Microscopy). Esta técnica utiliza un haz de electrones en lugar de un haz de luz para formar una imagen ampliada de la superficie de un objeto, se caracteriza por arrojar imágenes en escala tridimensional y a su vez transmite Rayos X (EDS o EDX Energy Disperse Spectrometer) debido al rebote del haz de electrones que llegan a la muestra. El EDS proporciona información acerca de la composición química del material en cada punto.

A través de este método se evalúan las muestras de geopolímeros en micrografías. Aquí es posible observar si se trata de una matriz continua o porosa, si existen partículas sin reaccionar o parcialmente reaccionadas, incluso micro fisuras. En la Figura 6 se muestra la imagen SEM de una pasta de geopolímero a base de caolinita, albita y FA con una micro-fisura.

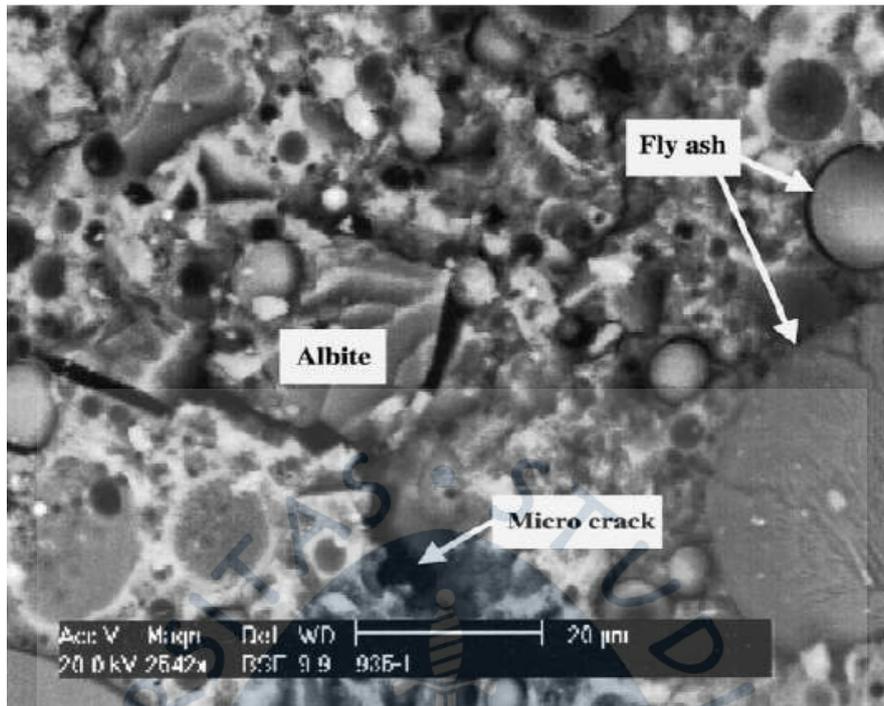


Figura 6. Imagen SEM de geopolímero de caolinita, albita y FA (Fuente: Xu y Van Deventer 2002).

En la Figura 7 se muestra una micrografía de una pasta de geopolímero de cenizas volantes que muestra las partículas de FA parcialmente reaccionadas, otras partículas irregulares de cenizas volantes claramente porosas y como complemento se muestra el análisis EDX de los elementos que se encuentran en la matriz, marcada en la imagen con la cruz amarilla (Chindapasirt et al. 2009).

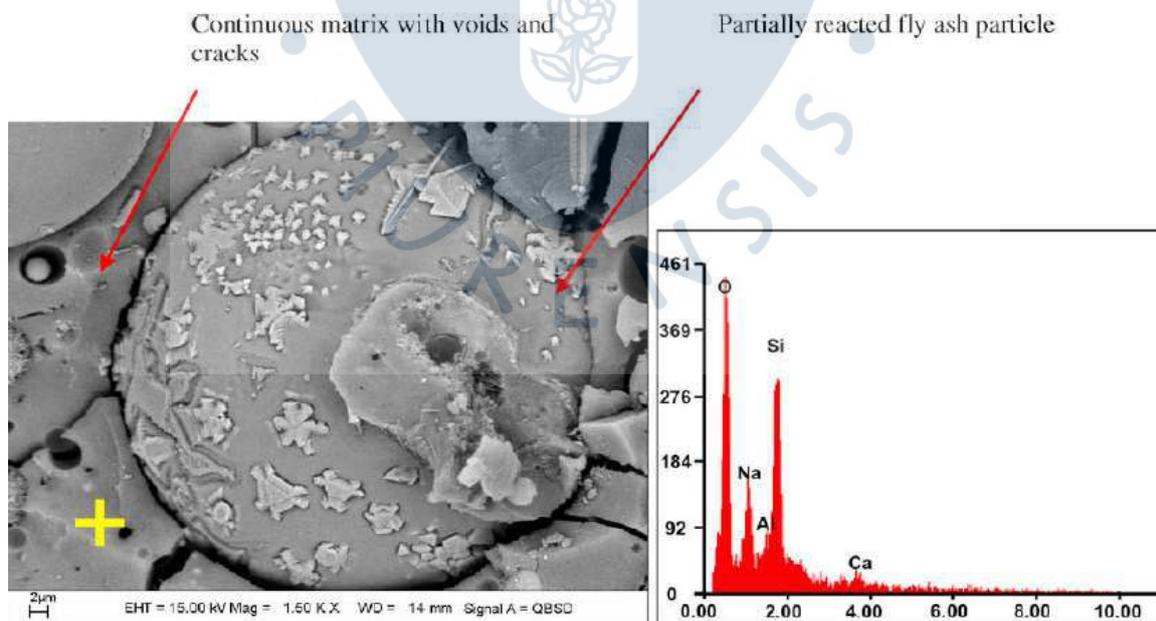


Figura 7. Análisis SEM-EDX de un geopolímero de FA (Fuente: Chindapasirt et al. 2009).

Asimismo, Hanjitsuwan et al. (2017) observó que la pasta de geopolímero de BA contiene varias partículas de cenizas de fondo sin reaccionar y/o parcialmente reaccionadas incrustadas en una matriz continua (Figura 8A), mientras que las mezclas con promotores de calcio muestran una matriz densa (Figura 8B), coherentes con sus ensayos de resistencia a la compresión. Entonces se puede afirmar que una matriz más densa se debe a que hay una reacción más completa y, por lo tanto, una mejora general en el desarrollo de la resistencia mecánica.

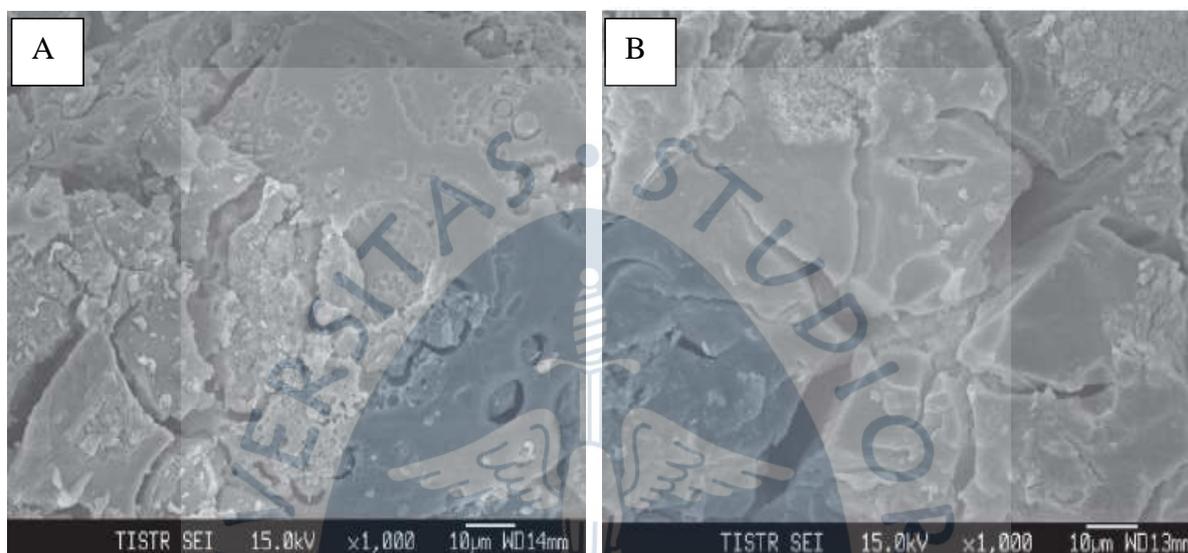


Figura 8. Imagen SEM de pastas geopoliméricas de BA con (A) y sin (B) promotores de calcio (Fuente: Hanjitsuwan et al. 2017).

De igual manera, en el caso de los morteros geopoliméricos, lo que se observa con el SEM es el grado de densidad y, además, permite ver en los geopolímeros, de manera muy frecuente, las partículas de precursor sólido sin reaccionar y/o parcialmente reaccionadas, incrustadas en una matriz continua, similar a lo que se observa en una pasta de geopolímero.

Kaur et al. (2018) observó la microestructura del mortero geopolimérico de FA (Figura 9A) e identificó que es menos densa en comparación con el mortero geopolimérico que contiene 4% de Nano MK (Figura 9B) debido a la presencia de un mayor número de partículas de FA sin reaccionar y parcialmente reaccionadas. En el espectro EDS se identificó la contribución de sílice y óxido de alúmina de Nano MK en la reacción de geopolimerización, lo que conlleva a la disminución de la relación Si/Al, lo cual explica los resultados de los ensayos mecánicos.

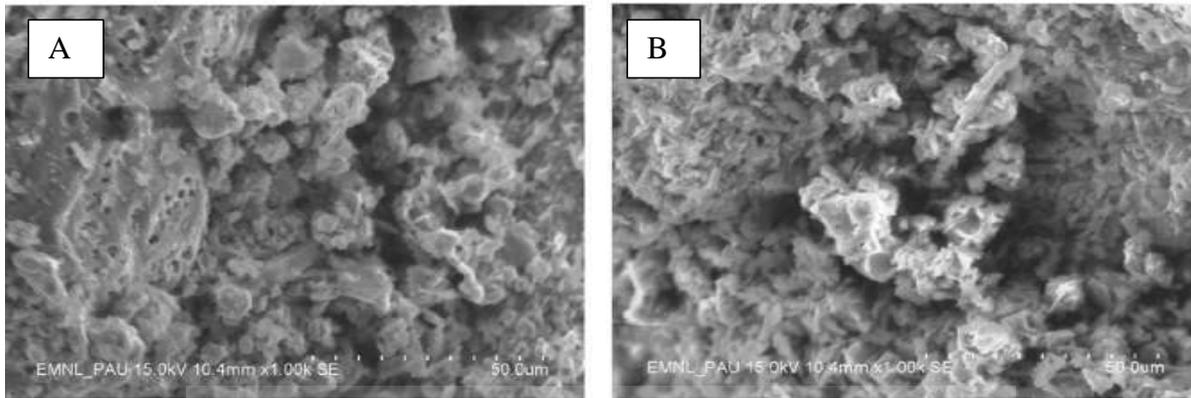


Figura 9. Imagen SEM de mortero geopolimérico de FA (A) y FA con MK (B) (Fuente: Kaur et al. 2018).

Por otro lado, la Figura 10B muestra el análisis de micrografías de las muestras geopolímero MK en medio ácido donde se detectaron muchas grietas atribuidas a fallas de las muestras durante la prueba de resistencia a la compresión (Ng et al. 2018). Las matrices densas y compactas insinuaban que tanto los cementos de geopolímeros a base de álcalis como los ácidos tenían una buena correlación en el proceso de geopolimerización.

De la misma forma Ranjbar et al. (2014) utiliza este método para comparar la microestructura de sus muestras de geopolímeros a base de FA y POFA, observando que FA contienen una proporción significativa de partículas con esferas huecas, estas partículas esféricas huecas se disuelven parcialmente y crean poros de pequeño tamaño muy dispersos en la matriz.

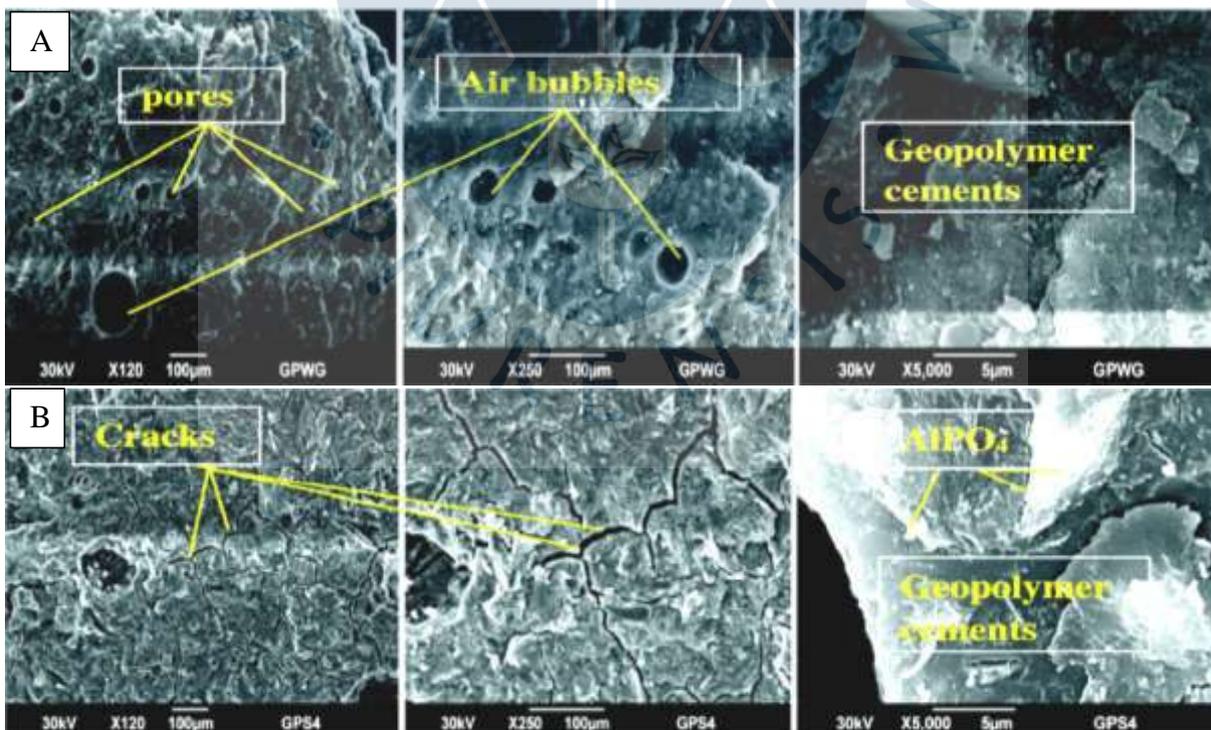


Figura 10. Imágenes SEM de la microestructura de geopolímeros a base de MK en medio alcalino (A) y medio ácido (B) (Fuente: Ng et al. 2018).

## 2.2 Composición química/cristalinidad de geopolímeros

El análisis de Difracción de rayos X (XRD o X-ray diffraction) es una de las técnicas de caracterización para detectar fases cristalinas en los productos de reacción dentro de la matriz de geopolímero (Novais et al. 2019; Mijarsh et al. 2014).

Aunque el principal producto de hidratación de los geopolímeros es el aluminosilicato amorfo, pueden estar presentes fases cristalinas que provienen de las fases cristalinas de la materia prima, por ejemplo, cuarzo o mullita en FA, o de los productos de reacción cristalinos tales como las fases zeolíticas (Klaartje De Weerd 2011).

En general, la XRD no puede proporcionar información útil para los cambios microestructurales en el paso de activación alcalina; por lo general no hay diferencias significativas entre los patrones de XRD de arcillas reaccionadas y no reaccionadas porque la mayoría de los cambios tienen lugar en las fases amorfas del material y no hay fase cristalina en los productos de reacción (Majidi 2009). Las principales fases de unión o fases amorfas se forman como principal producto de reacción de los materiales aluminosilicatos y consisten generalmente en la coexistencia entre silicato cálcico hidratado (C-S-H) y geles de aluminosilicato sódico hidratado (N-A-S-H) (Ismail y El-Hassan 2018; Hanjitsuwan et al. 2017; Mijarsh et al. 2014).

Ng et al. (2018) encontró que la estructura amorfa del aluminosilicato se identifica con una amplia joroba en los patrones del análisis XRD. De igual manera Hanjitsuwan et al. (2017) compara sus muestras de geopolímeros basado en esta interpretación de los patrones de XRD e informa que la pasta 70BA30PC ilustra una reducción en la fase cristalina en comparación con la pasta 70BA30CCR, tal como se muestra en la Figura 11.

De la Figura 11A se puede interpretar que el BA molido consiste en una fase amorfa en la joroba alrededor de 20-38  $2\theta$ . Cuando se mezcló BA molido con los promotores de calcio, la fase vítrea se disolvió para formar una nueva fase de gel de aluminosilicato alcalino. Esto se confirma por un desplazamiento del pico ancho de la joroba alrededor de 25-35  $2\theta$ . La pasta 70BA30PC (Figura 11B) ilustra una reducción en la fase cristalina en comparación con la pasta 70BA30CCR (Figura 11C). En la pasta 70BA30PC, se encuentra C-S-H y desaparece la anortita existente en BA, pero su patrón todavía tiene picos de cuarzo, carbonato de calcio y óxido férrico. Mientras, la anortita y el pico fuerte de carbonato de calcio todavía se encuentran en la pasta 70BA30CCR.

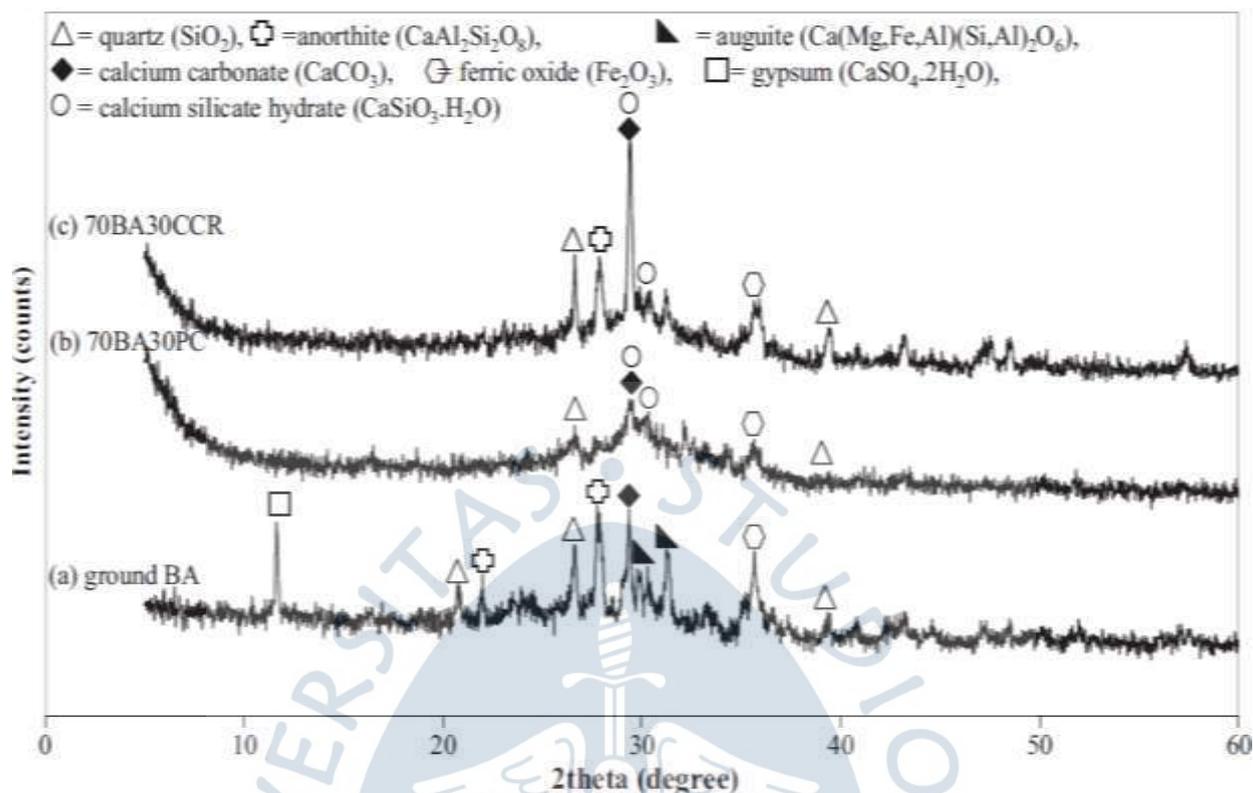


Figura 11. Patrones XRD del precursor BA (A) y de los geopolímeros BA (B y C) con promotores de calcio a los 28 días (Fuente: Hanjitsuwan et al. 2017).

Otros autores utilizan la Fluorescencia de rayos X (XRF o XRD) para determinar la composición química de los materiales a utilizar (Novais et al. 2019; Ng et al. 2018; Ismail y El-Hassan 2018; Bashar et al. 2016; Sukmak et al. 2013). Sin embargo, parece que el análisis XRF de un material y el conocimiento de los diferentes contenidos de óxido por sí solos no pueden usarse para predecir con precisión la respuesta del material en la activación alcalina. Se debe considerar y estudiar la relación entre el patrón de XRD (ver Figura 12) y el comportamiento de las fases de aluminosilicato presentes en arcillas y los productos durante la geopolimerización (Majidi 2009).

Cuando se aplica este método a muestras de materia prima puzolánico para determinar sus composiciones de óxido y su estructura cristalina o amorfa, se hacen reaccionar con una solución de activador alcalino predeterminada para ver qué tan bien responden a la activación alcalina y de esta forma reconocer si la muestra es apta para la geopolimerización (Mahboob 2014).

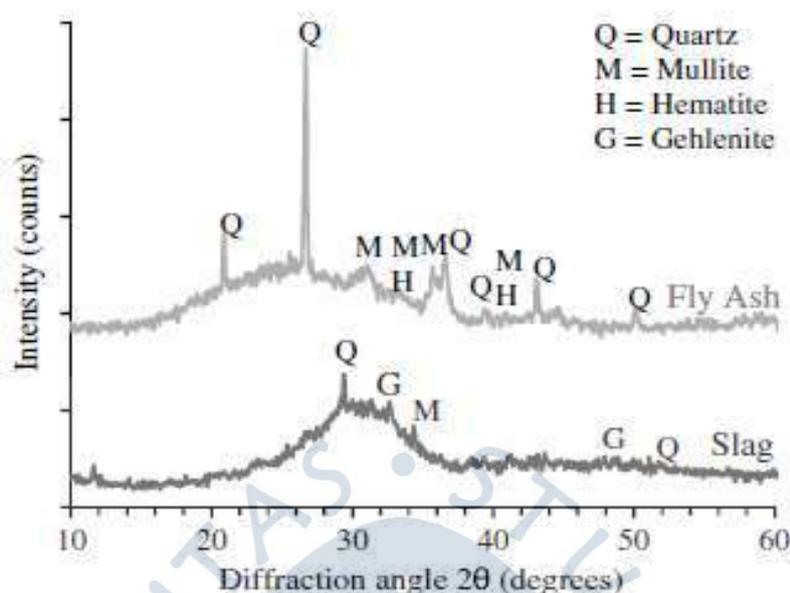


Figura 12. Análisis XRD de FA y escoria como precursores sólidos (Fuente: Ismail y El-Hassan 2018).

### 2.3 Tipos de enlaces en los geopolímeros

La técnica espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR del inglés Fourier Transformed Infrared Spectroscopy) proporciona información sobre diferentes tipos de enlaces químicos presentes en los materiales a nivel molecular, entre los cuales Si – O – Si y Si – O – Al son los enlaces de interés en el caso de los geopolímeros (Mijarsh et al. 2014; Klaartje De Weerd 2011; Majidi 2009). También pueden proporcionar datos muy útiles sobre los cambios moleculares durante la geopolimerización (Majidi 2009) y sirve para evaluar el grado de geopolimerización dentro de la matriz a través del número o longitud de onda e identificar los productos de reacción (Ismail y El-Hassan 2018; Hanjitsuwan et al. 2017).

Un cambio molecular significativo durante la activación alcalina de aluminosilicatos es el desplazamiento de la banda infrarroja para el estiramiento asimétrico de Si – O – Si y Al – O – Si a números de onda más bajos (Majidi 2009). El número de onda se atribuye a la vibración de estiramiento más prominente, por ejemplo, la vibración de estiramiento Si – O – Si es más prominente que el modo de flexión O – Si – O. Por lo tanto, es lógico utilizar la vibración Si-O-Si para indicar el grado de geopolimerización (Chindaprasirt et al. 2009).

De acuerdo con los materiales activados por álcalis que solo se basan en escoria o cenizas volantes, esta banda de vibración generalmente se identifica entre  $950$  y  $1100\text{ cm}^{-1}$ , así como se observa en la Figura 13. Aquí también se muestra que el estiramiento se hace más prominente con el aumento de la concentración molar, desde 5M hasta 15M, lo que indica un mayor grado de geopolimerización.

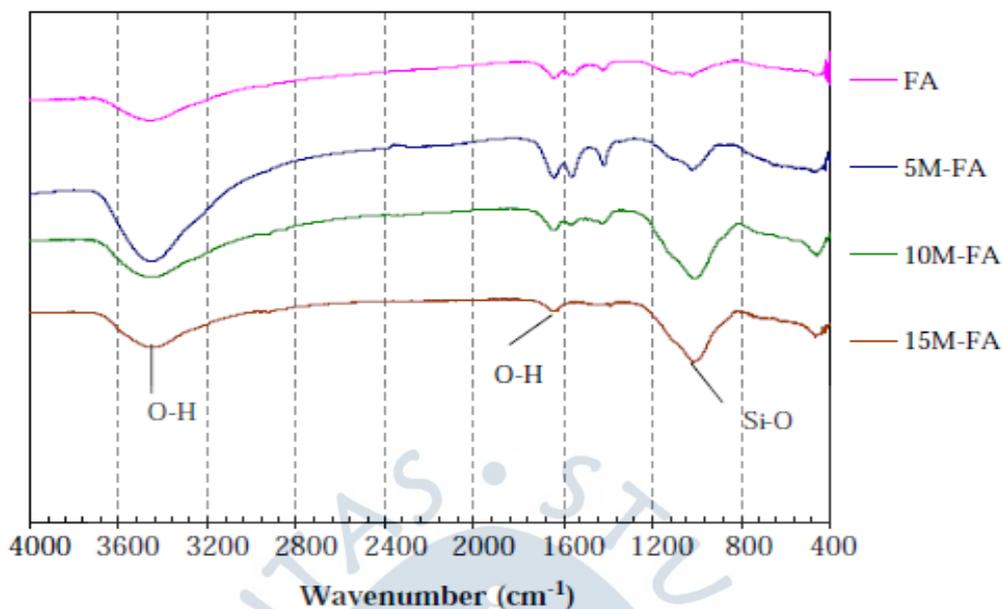


Figura 13. Espectros FTIR de pastas geopoliméricas de FA con diferente concentración molar (M) de NaOH (Fuente: Chindaprasirt et al. 2009).

La forma de aplicar el FTIR es observando la transformación que sufren los componentes después de la geopolimerización, al comparar los espectros en los materiales precursores y en las muestras de geopolímeros (Moraes et al. 2016; Mijarsh et al. 2014; Barbosa et al. 2000; Palomo et al. 1999). Por ejemplo, Mijarsh et al. (2014) concluye que las diferencias entre las frecuencias de absorción de FTIR para los materiales de origen POFA pulverizada (con y sin aditivo) y los productos geopolímeros podrían proporcionar evidencia de una geopolimerización más o menos efectiva.

En la Figura 14 se puede comparar los resultados del material precursor (Figura 14A y Figura 14B) con los resultados del mortero geopolimérico (Figura 14C). Se puede ver que las principales bandas características de los espectros de vibración señaladas en regiones de  $1103\text{ cm}^{-1}$  (Figura 14A) y  $1112\text{ cm}^{-1}$  (Figura 14B) cambiaron a frecuencias más bajas en la región del número de onda  $990\text{-}1015\text{ cm}^{-1}$  en la Figura 14C, lo que indica la vibración de estiramiento de las cadenas Si-O-Al o Si-O-Si. Esto se correlacionó con la disminución en el número de enlaces Si-O-Al y el aumento en el número de enlaces Si-O-Si, debido a geles aglutinantes más reticulados, lo que provocó un aumento de la resistencia a la compresión.

De esta forma es posible correlacionar que la adición de escoria en un geopolímero de FA disminuye el número de onda al aumentar el contenido de calcio y reducir el grado de reticulación de la fase amorfa de los materiales fuente (Ismail y El-Hassan 2018). Asimismo, Moraes et al. (2016) observa que un aumento en la cantidad de ceniza de caña de azúcar (SCA) en una pasta de geopolímero modifica la banda de vibración principal a valores de número de onda más altos porque su pico principal tiene una vibración de número de onda más alta que el valor de escoria de alto horno (BFS) usado como precursor del geopolímero original.

También es posible observar estos cambios como resultado de la edad de curado. En esta misma investigación, Moraes et al. (2016) observó que el pico de vibración principal se

desplazó a números de onda más bajos cuando aumentó la edad de curado, indicando que hay un mayor grado de geopolimerización.

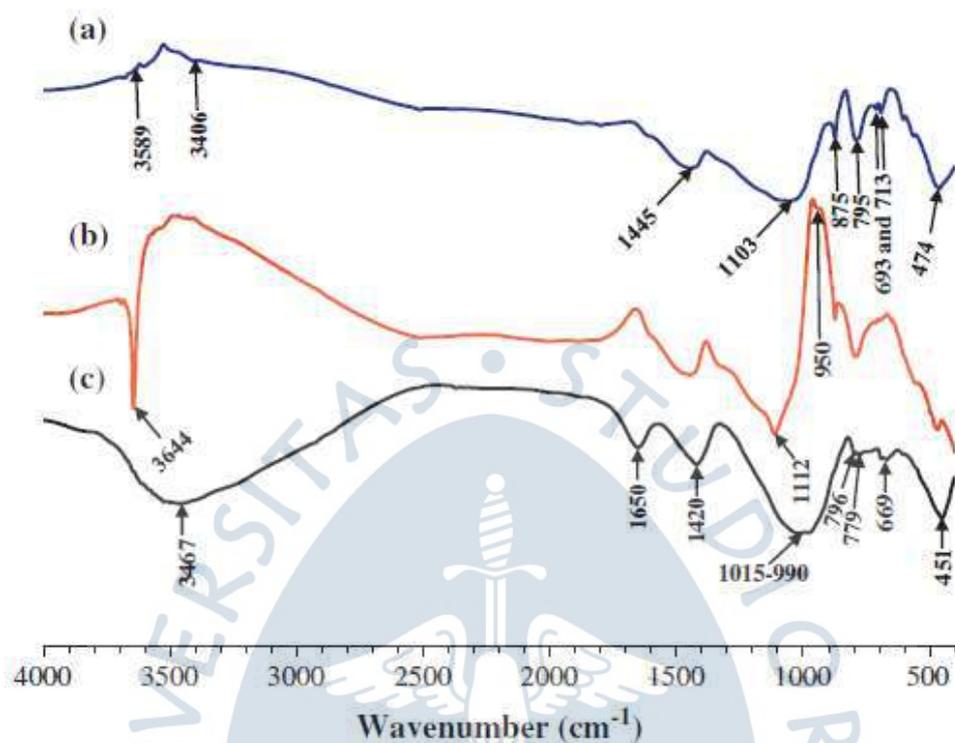


Figura 14. Espectros FTIR de (a)POFA, (b)POFA con aditivo y (c)Mortero geopolimérico de POFA (Fuente: Mijarsh et al. 2014).



## **Capítulo 3**

### **Propiedades físicas**

#### **3.1 Porosidad**

En general, se sabe que la geopolimerización conlleva procesos de reorganización estructural, en especial la etapa de endurecimiento, que determinan la microestructura y la distribución de poros del material geopolimérico, los que son fundamentales para determinar muchas propiedades físicas (Klaartje De Weerd 2011; Duxson et al. 2007).

Ranjbar et al. (2014) informa que el inicio de la formación de poros se debe a la expulsión del agua de hidratación en forma de burbujas. Así se ha demostrado que la concentración de silicio soluble o la relación Si/Al está íntimamente relacionada con el inicio y la distribución de la porosidad en los geopolímeros.

Las concentraciones bajas de relación Si/Al dan como resultado un gel denso, y su microestructura cambia de contener poros grandes a ser más homogénea con poros pequeños a medida que aumentaba esta relación Si/Al (Ranjbar et al. 2014; Duxson et al. 2007). Por ello, deducimos que todo factor que participe en el desarrollo de la microestructura del geopolímero va a repercutir en su etapa final como material sólido.

De ese modo, es posible resumir en 3 los factores que determinan el desarrollo de la estructura porosa en los geopolímeros: 1) el tipo de activador alcalino, 2) las condiciones de curado y 3) el tipo de precursor sólido.

Además, aunque la porosidad se evalúa mediante métodos convencionales descritos en la norma ASTM C642, algunos autores optan por una evaluación más detallada como la que se obtiene mediante el ensayo de porosimetría de intrusión de mercurio (MIP, del inglés Mercury Intrusion Porosimetry) que determina la distribución del tamaño de los poros de los morteros, mediante el llenado de los poros de la muestra seca con mercurio, a través de una presión aplicada.

Con el método antes mencionado se obtienen tanto la porosidad total conectada como la distribución del tamaño de los poros en el rango de diámetro de 0,0035 a 250  $\mu\text{m}$  (Navarro et al. 2018). La distribución del tamaño de los poros, la forma y la posición de los poros son importantes ya que, al igual que los cementos, la estructura de los poros juega un papel importante en la determinación de la resistencia en estado endurecido (Lozano 2018; Pereira et al. 2015; Perera et al. 2007; Shi 1996).

Muchos resultados experimentales han confirmado que se puede obtener una predicción aceptable de la resistencia utilizando la porosidad total (Shi, 1996) y menciona las relaciones más comunes entre porosidad y resistencia a la compresión de las pastas de cemento portland, a pesar de ser difícil y poco práctico incluir estos parámetros en las relaciones entre estas propiedades. En general, se estima que el volumen acumulado de poros en los geopolímeros es el doble del que presentan los materiales basados en PC o en escoria activada con álcalis (Rovnaník 2010).

Por otro lado, el tipo de activador determina los niveles de porosidad en los geopolímeros. Por ejemplo, Shi (1996) encontró que los morteros de escoria activados con álcalis tienen diferente porosidad según la naturaleza del activador usado.

En la Figura 15 se grafican las relaciones entre la resistencia a la compresión y la porosidad de morteros de escoria activados con álcalis y morteros de cemento portland que evaluó Shi (1996), donde se observa que los morteros de escoria activada con NaOH (NH) obtuvieron la porosidad más alta entre los cuatro morteros para una edad determinada, mostraron poros distribuidos uniformemente en el rango de tamaño de poro medido y la estructura de poros más gruesa, mientras que los morteros de escoria activada con  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  (NS) exhibieron la porosidad más baja, significativamente menor que los morteros PC y la estructura de poros más fina, además la porosidad de estos morteros a los 3 días fue incluso menor que la de los morteros PC de 90 días (Shi 1996).

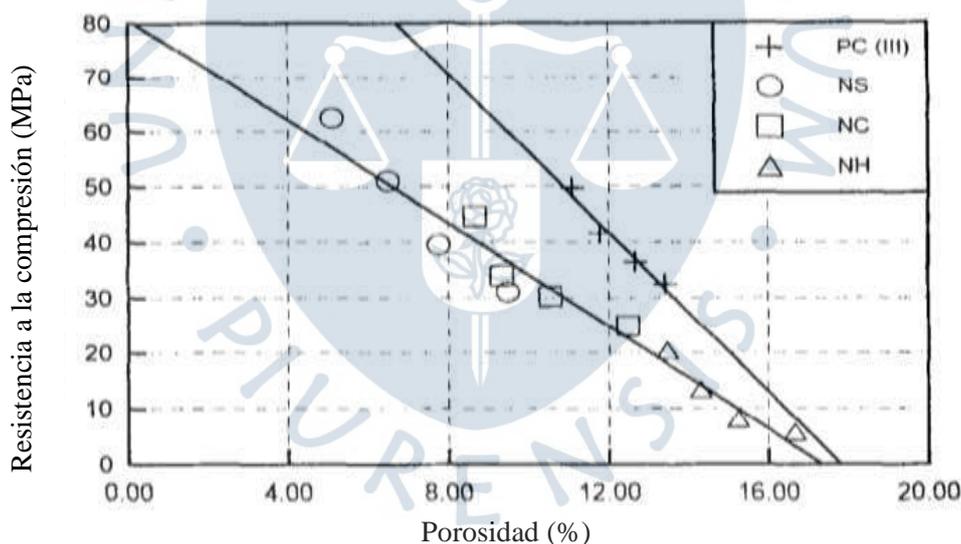


Figura 15. Relación entre la porosidad y la resistencia a la compresión de los morteros geopolimérico fabricados con diferentes activadores alcalinos y mortero tradicional de cemento portland PC (Fuente: Shi 1996).

También se puede verificar que, independientemente de la naturaleza del activador, todos los morteros siguen la misma tendencia, una disminución de la resistencia cuando aumenta la porosidad, confirmando que la estructura de poros tiene impacto en las resistencias mecánicas de los geopolímeros. Esto puede explicarse por la similitud en la naturaleza de su principal producto de hidratación (C-S-H) (Shi 1996).

De igual manera, Pereira et al. (2015) encontró diferencias en la porosidad a causa de la solución activadora utilizada experimentando con morteros geopoliméricos a base de BFS. La porosidad total encontrada para las muestras activadas por medio de una solución de NH fue cercana al 18%, mientras que la porosidad total para las muestras activadas mediante solución de NS + NH fue significativamente menor, cercana al 15%. Las muestras activadas con NH mostraron los valores más altos de porosidad entre 17-18%, en comparación con valores entre 11 y 15% de porosidad para las muestras activadas con NS+NH y KOH.

En general, se puede afirmar que las muestras activadas por NS+NH o por reactivos de KOH fueron mejores en términos de porosidad. En el caso de las muestras activadas con KOH, la porosidad total fue de hecho menor, en parte debido a la menor relación agua/aglutinante (Pereira et al. 2015).

Esto último concuerda con los hallazgos de otras investigaciones (Ranjbar et al. 2014; Perera et al. 2007) donde las porosidades en los geopolímeros dependen mucho de la cantidad de agua presente en los precursores originales.

Así también se encontró para muestras curadas a 65°C, los morteros alcalinos basados en FCC después de 3 días poseen valores de porosidad total en el rango de 14.5-20.5% en volumen, dependiendo de la relación H<sub>2</sub>O/FCC (Tashima et al. 2013). Esto es muy similar a lo que ocurre en el cemento Portland, donde la resistencia a la compresión también disminuye con la relación agua / cemento siempre que la trabajabilidad de la mezcla sea satisfactoria (Perera et al. 2007).

Se ha comentado también que el proceso de curado y las diferentes concentraciones de solución activadora utilizadas en la preparación de los morteros geopoliméricos influyen en los valores de porosidad (Görhan y Kürklü 2014).

En la Figura 16 de morteros geopoliméricos de FA se encontró que la porosidad se redujo en proporción inversa al aumento de la concentración de NH en las muestras curadas durante períodos de tiempo más cortos (2 horas). Sin embargo, esta relación se invirtió con un aumento del tiempo de curado (24 horas) y la porosidad aumentó en proporción directa a la concentración de NH (Görhan y Kürklü 2014). Igualmente se observa que con mayor tiempo de curado se reduce la porosidad, independientemente de la molaridad del activador.

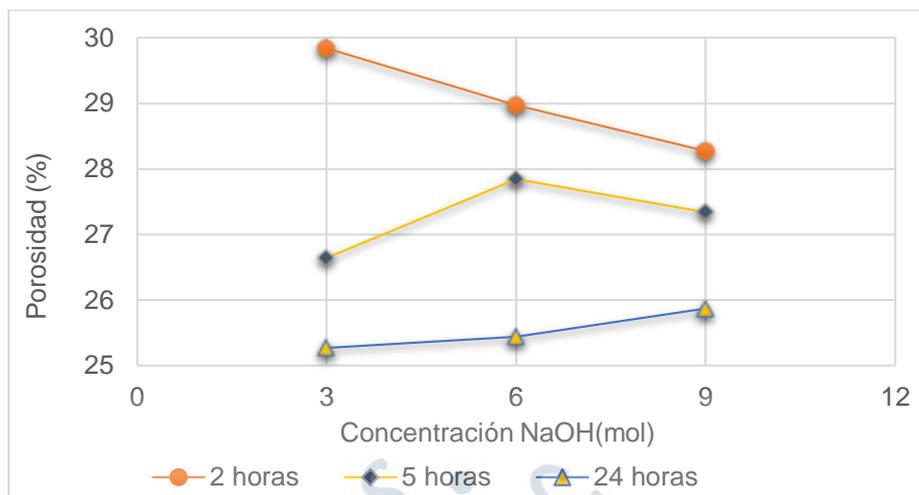


Figura 16. Variación de la porosidad con la molaridad de NaOH en diferentes tiempos de curado de morteros geopoliméricos de FA (Fuente: Adaptación de Görhan y Kürklü 2014).

En morteros geopoliméricos de MK se encontró que el tamaño medio de los poros disminuyó ligeramente con la edad de la muestra, y esto fue cierto para todas las muestras tratadas en diferentes condiciones de curado (Rovnaník 2010). Sin embargo, aparecieron principales diferencias en la distribución de poros entre muestras curadas a diferentes temperaturas. La temperatura elevada durante la etapa inicial del proceso de endurecimiento condujo a la formación de poros más grandes y al aumento del volumen de poros acumulativo.

En muestras de mortero de FA con SBA curadas a temperatura ambiente se presentaron valores de porosidad más bajos que las muestras curadas a 65 °C, lo que sugiere que la tortuosidad de los poros capilares fue mayor con un aumento en la temperatura de curado. Sin embargo, para los morteros curados después de 270 días a temperatura ambiente, los valores de porosidad total fueron similares a los encontrados en las muestras curadas a 65 °C después de 3 y 7 días (Castaldelli et al. 2016). De esta manera, también se concluye que el volumen de los poros aumenta ligeramente con el aumento de la temperatura de curado. Por lo tanto, el curado a temperaturas más altas da como resultado un mayor volumen y tamaño de los poros.

Finalmente, como se comentó, se ha encontrado que al modificar el material precursor se puede variar la porosidad en los geopolímeros. Por ejemplo, al cambiar el precursor sólido totalmente escoria BFS a una mezcla de 75% BFS + 25% SCA, se encontró que presentaba una menor porosidad total (14.66%) que el mortero preparado en su totalidad con BFS (15.66%). Por lo tanto, en este caso, el precursor SCA tiene propiedades que benefician la formación del geopolímero porque produce la menor porosidad de la muestra.

De igual manera, se encontró que las muestras de morteros de con mayor porcentaje de cenizas volantes (75%FA+25%SCA) presentaron un mejor comportamiento en términos de porosidad relativa, mostrando el menor porcentaje de porosidad total (16.98%). Asimismo, se ha encontrado que el volumen de poro relativo aumenta con el contenido de SCA (Castaldelli et al. 2016; Pereira et al. 2015). A la inversa, se encontró que en morteros preparados a base de

BFS + SCA, la adición de SBA conlleva a una disminución en la porosidad total del geopolímero (Pereira et al. 2015).

De acuerdo con lo mencionado, en la Tabla 1 se resumen los resultados de las investigaciones sobre la influencia de los precursores sólidos en la porosidad del mortero geopolimérico.

Tabla 1. Influencia del material precursor en la porosidad final del mortero geopolimérico.

Referencia	Precursor sólido	Relación con la porosidad
Tchadjie y Ekolu 2018	Metacaolín (MK)	El reemplazo parcial de puzolanas naturales por MK de hasta un 20% en peso promovió la formación de un gel geopolimérico más estable con menor porosidad. Esto se atribuyó a un aumento en la cantidad de SiO <sub>2</sub> y Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> amorfos.
Somna et al. 2011	Cenizas volantes (FA)	FA finas son más efectivas para disminuir los poros capilares que las FA más gruesas.
Ranjbar et al. 2014	Cenizas de combustible de aceite de palma (POFA)	La mayor área de superficie específica de las partículas de POFA provoca un mayor requerimiento de agua, además que atrapan el aire y producen una matriz porosa.
Detphan y Chindaprasirt 2009	Cenizas volantes + Cenizas de cascara de arroz (FA+RHA)	El RHA mantuvo su estructura celular. Por lo tanto, con el aumento de RHA en la mezcla, se requirió una mayor cantidad de agua para obtener la trabajabilidad deseada, lo que se reflejó en un incremento de la porosidad del mortero endurecido.

### 3.2 Absorción

La absorción, propiedad del estado endurecido, se relaciona con la accesibilidad que tienen las sustancias del medio externo para ingresar a la microestructura de la mezcla, por lo tanto, depende de su sistema de poros internos (Pereira et al. 2015). En base a esto, la capacidad de absorción resulta ser importante para cualquier aplicación que se le vaya a dar al mortero.

Esta propiedad mejora, es decir, disminuye con el aumento de la densidad de la mezcla, lo que conlleva a mejorar otras propiedades como la permeabilidad y la deformación por expansión. Estas mejoras en las propiedades a partir del aumento de densidad se relacionan con el aumento de la temperatura de curado y de la molaridad de la solución alcalina, ya que de esta manera se mejora el proceso de geopolimerización y se reduce el contenido de agua (Elyamany et al. 2018; Shukor Lim et al. 2018).

Sin embargo, como ya se ha mencionado en los apartados anteriores, una cantidad excesiva de álcalis (%Na<sub>2</sub>O) provoca que una parte del contenido alcalino no haga reacción con el material precursor, aumentando su capacidad de absorción de agua. De acuerdo con esto, Thokchom et al. (2009b) obtuvo 6.42% de absorción para morteros con 8% Na<sub>2</sub>O y 11.79% para morteros con 5% Na<sub>2</sub>O, en muestras de mortero de geopolímero a base de FA curados a 85°C (Thokchom et al. 2009b).

Pereira et al. (2015) encontraron que los morteros geopoliméricos presentaron entre 7.90% y 9.90% de absorción de agua, dependiendo del activador alcalino y el precursor sólido usado. La absorción también aumenta con la proporción de líquido/precursor (Elyamany et al. 2018; Görhan y Kürklü 2014)

Elyamany et al. (2018) evaluaron la influencia de la temperatura de curado y la concentración de NH en la absorción de agua en morteros geopoliméricos de FA, encontrando que mientras más alta es la temperatura de curado, más evidente es la disminución de la capacidad de absorción de las muestras de mortero, ver Figura 17.

Sin embargo, otras muestras curadas a temperatura ambiente obtienen una menor capacidad de absorción (Gholampour et al. 2019). Por ejemplo, se observa que la absorción de agua disminuye 10.50% para muestras de FA curadas a 60°C y 13.30% para 90°C en comparación con la mezcla de mortero geopolimérico curada a 30°C. En la misma investigación se verificó que sucede lo mismo con la molaridad de la solución alcalina, el mortero FA tuvo una reducción en la capacidad de absorción de entre 5.10% a 11.60% con molaridades mayores a 10M.

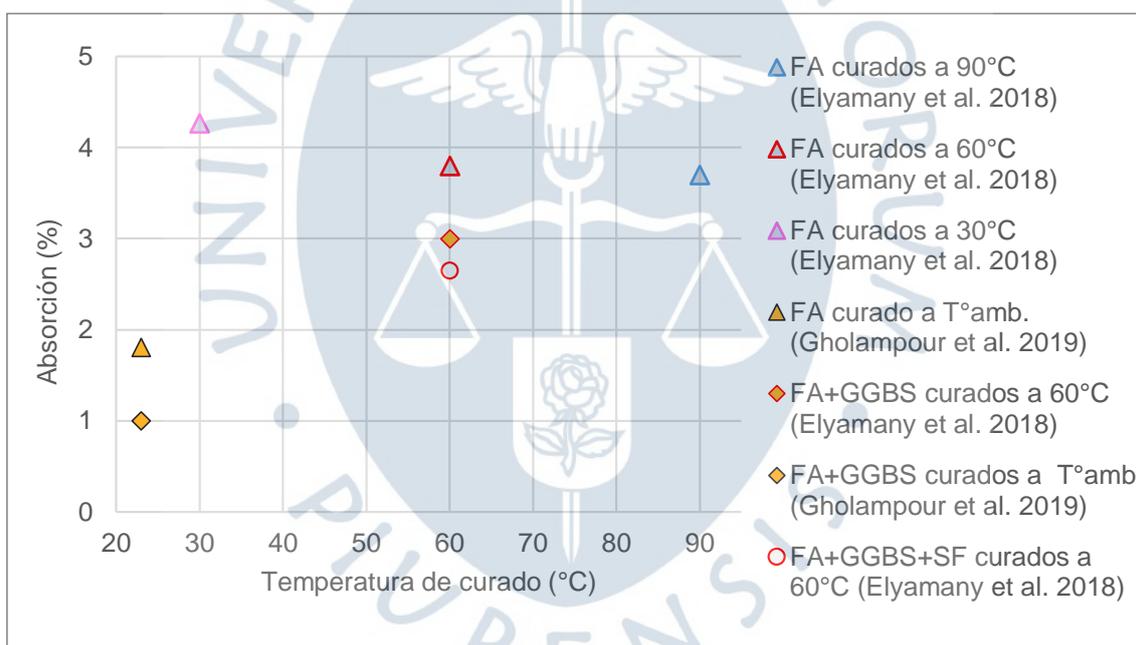


Figura 17. Capacidad de absorción de morteros geopoliméricos a base de diferentes precursores sólidos en diferentes condiciones de curado.

También se observa que la absorción de agua tiene variaciones con el cambio de material precursor. La capacidad de absorción es mayor en mortero geopolimérico de FA y disminuye con el reemplazo del 50% de FA por GGBS, pero disminuye más cuando se reemplaza una parte de GGBS por humo de sílice (FS). Elyamany et al. (2018) investigaron la causa de estos resultados y encontraron que la disminución de la capacidad de absorción se debe a la adición de Ca por medio del GGBS, que es el factor que contribuye a la formación de mezclas más densas y compactas.

También encontraron que el FS tiene mayor reacción con el activador alcalino en comparación con las FA debido a su gran finura y alto contenido de sílice. El uso de materiales de gran finura sirve adecuadamente como relleno para proporcionar compacidad a la mezcla, disminuyendo su capacidad de absorción (Novais et al. 2019; Elyamany et al. 2018). También los morteros geopoliméricos de material combinado (FA+MK) presentaron un 10.10% de absorción de agua, mientras que los mismos morteros con adición de escoria del 37.50% de su material precursor alcanzaron el 8.70% de absorción (Novais et al. 2019).

Por lo tanto, según la información recopilada, los morteros geopoliméricos tienden a variar drásticamente su capacidad de absorción mayormente a causa de su temperatura de curado. Siendo esto un factor a considerar para la fabricación de los morteros según la aplicación que se desee.

### **3.3 Trabajabilidad**

La trabajabilidad es una propiedad del mortero en estado fresco de la cual pueden depender sus propiedades en estado endurecido, ya que se considera una característica propia del comportamiento reológico del mortero. El Instituto Americano del Concreto (ACI por sus siglas en inglés) define esta propiedad como “la facilidad con que puede ser mezclada, colocada, consolidada y terminada una mezcla de concreto o mortero fresco”.

La buena trabajabilidad del mortero es esencial para todas sus aplicaciones, pero la fluidez de la mezcla es determinante para evaluar el uso del mortero; por ejemplo, la consistencia de un mortero de pega no será la misma que la del mortero de relleno (grout), y de igual manera ocurre con los tiempos de fraguado en diferentes aplicaciones del mortero.

Esta propiedad se mide a través de otros parámetros que conllevan a la buena estabilidad y movilidad de la mezcla. Entre los parámetros más utilizados encontramos la fluidez de la mezcla que se evalúa en base a las especificaciones descritas en la norma NTP 334.057 o ASTM C 1437, que además está fuertemente ligada al tiempo de fraguado (ASTM C191) que indica cuánto tiempo se puede trabajar o manipular la mezcla antes de su aplicación sin que perjudique sus propiedades mecánicas y de durabilidad. En general, se estima que los valores mayores e iguales a 200 mm de asentamiento del concreto de geopolímero son los mejores para considerar una buena trabajabilidad (Nath y Sarker 2014).

En el caso de los geopolímeros, la reología no es igual a la de una mezcla de PC (Nath y Sarker 2014). La trabajabilidad puede verse influenciada por diversos factores como la temperatura ambiental, la forma y el contenido de las partículas del precursor sólido, la reacción entre el precursor sólido y la solución alcalina, etc., siendo el componente líquido de la mezcla el parámetro más influyente sobre la trabajabilidad.

Para las mezclas de mortero geopolimérico, el componente líquido está constituido específicamente por el activador alcalino, y de ser el caso también se considera el agua añadida. Como precisa Wardhono (2018), el agua contribuye de diferentes formas en el mortero de geopolímero. Mientras que en el mortero PC el agua participa en la reacción química y tiene la capacidad de generar cambios en su microestructura, en el mortero geopolimérico el agua no

interviene en la reacción de geopolimerización. Es un medio para las reacciones que se dan en el proceso de disolución y reestructuración de los aluminosilicatos y contribuye a controlar la trabajabilidad de la mezcla durante el proceso de colocación y solidificación. Recuérdese que el agua es expulsada al final de la geopolimerización.

Cabe aclarar que, si bien el agua no interviene en la reacción de geopolimerización, sí puede afectar la dosificación de la solución activadora y, por tanto, su efecto en el proceso de geopolimerización. Cuando se añade agua en exceso al contenido original del activador alcalino se estaría reduciendo la cantidad de iones  $\text{OH}^-$  que se necesita en el proceso de disolución, lo cual repercute en las propiedades mecánicas de la mezcla (Temuujin et al. 2010). Así mismo, el exceso de agua, al igual que en el concreto o mortero de PC, crea porosidad en la pasta, disminuyendo la resistencia mecánica final. Se ha confirmado, por ejemplo, que una adición de agua extra a la mezcla de un mortero de geopolímero disminuye la resistencia a la compresión en un 43% (Novais et al. 2019).

En cuanto a las condiciones ambientales, se ha encontrado que los morteros geopoliméricos con mayor fluidez tienden a ser más sensibles a las condiciones del entorno, especialmente de la temperatura porque ésta genera efectos sobre la viscosidad del activador alcalino (Naghizadeh y Ekolu (2019). Una mayor fluidez normalmente implica una mayor cantidad de activador alcalino y, por tanto, una mayor sensibilidad a la temperatura.

Otro aspecto importante es la falta de coincidencia entre la trabajabilidad y el flujo. Cuando se ha medido el flujo en los morteros o el asentamiento en los concretos, los mismos resultados no corresponden con el mismo grado de trabajabilidad. Por ejemplo, para dos mezclas de concreto, una de geopolímero y otra de cemento portland, ambas con el mismo valor de asentamiento, el concreto geopolimérico tiende a ser menos trabajable que el concreto PC, debido fundamentalmente a la mayor viscosidad del componente líquido de la mezcla de geopolímero en comparación con el agua de mezcla en el concreto PC (Naghizadeh y Ekolu 2019; Nath y Sarker 2014).

La adición de agua extra es particularmente importante cuando se quiere mejorar la trabajabilidad y los tiempos de fraguado. En un mortero PC se puede optar por añadir agua extra o aditivos superplastificantes, teniendo efectos sobre las propiedades del estado endurecido. Sin embargo, en el mortero geopolimérico no ocurre igual. Ismail y El-Hassan (2018) encontraron que, en este aspecto, el mortero geopolimérico tiene un comportamiento similar al mortero PC aumentando su tiempo de fraguado con el agua adicional, reportando tiempos de fraguado inicial entre 9-51 minutos y un tiempo de fraguado final entre 21-124 minutos.

Pero cuando se disminuye la trabajabilidad, también se reduce considerablemente el tiempo para manipular la mezcla (Nath y Sarker 2014), lo cual depende en gran parte del anión del activador alcalino, ya que el silicato hace las veces de un acelerador del fraguado (Navarro et al. 2018). Se ha encontrado, por ejemplo, que el módulo  $M_s$  y el contenido total de agua aumentan de forma proporcional con el flujo de la mezcla, lo cual incrementa la trabajabilidad y el tiempo de fraguado (Ismail y El-Hassan 2018).

Otro aspecto por considerar en los geopolímeros es la dificultad para relacionar el componente líquido con la trabajabilidad. El componente líquido se mide con la proporción en peso líquido a sólido, donde el sólido es el material precursor utilizado para la fabricación del mortero, incluyendo a veces al agregado. Es claro que el flujo de las mezclas generalmente aumenta junto con el contenido de la solución activadora (Novais et al. 2019; Nath y Sarker 2014).

En mezclas de mortero a base de FA y GGBS se encontró que un contenido del 40% a más de componente líquido permite lograr una trabajabilidad de 200 mm y mostró un valor de flujo de alrededor del 100% (Nath y Sarker 2014). También Naghizadeh y Ekolu (2019) encontraron que la trabajabilidad del mortero geopolimérico de FA mejora al incrementarse el contenido del componente líquido, obteniendo la mayor trabajabilidad cuando la relación líquido/precursor era de 0.60.

Sin embargo, la trabajabilidad podía disminuir a medida que se aumentaba la cantidad de NS, aun cuando la proporción líquido/precursor se mantenía constante, ya que el silicato es una solución altamente viscosa, en comparación con el NH. Por lo tanto, no sólo es importante la cantidad de solución alcalina que va a reaccionar con el precursor sólido sino también su composición, puesto que una mayor proporción de NS puede tener impacto en la trabajabilidad de la mezcla. Así, Al Bakri Abdullah et al. (2012) afirma que NS/NH igual a 2.50 es una proporción óptima para una buena resistencia mecánica.

Por otro lado, Al Bakri Abdullah et al. (2012) encontraron que una proporción líquido/precursor igual a 2.00 y 1.00 producen una trabajabilidad muy baja, mientras que la proporción igual a 0.33 produce una alta trabajabilidad.

Además, la relación líquida/sólido depende también de las características del precursor sólido. Novais et al. (2019) encontró que en los morteros con mezclas de FA y MK, los morteros que contienen agua extra y mayor contenido de NS (F3), obtiene la viscosidad más baja y la fluidez aumenta en 24.00% en comparación con los morteros que contienen menor cantidad de NS y sin agua adicional (F1) (Ver Figura 18). Al mismo tiempo, al añadir escoria al precursor sólido y manteniendo intactas las cantidades de componentes líquidos, se obtienen mezclas con menor fluidez, debido a la disminución de la proporción líquido/sólido.

Se sabe que las partículas de escoria reaccionan mucho más rápido con la solución activadora que las partículas de FA. Por lo tanto, un aumento en la cantidad de escoria respecto a la cantidad de FA provoca una disminución en la fluidez de los morteros (Gholampour et al. 2019), y tiempos de fraguado más cortos, en contraste con los morteros de FA sin escoria, que toman mayor tiempo en fraguar (Ismail y El-Hassan 2018).

De acuerdo con lo mencionado, se observa que la pérdida de fluidez se atribuye también a la forma de las partículas del precursor sólido, ya que la forma angular de las partículas de escoria causa fricción entre las partículas, en comparación con la forma esférica de las partículas de FA, además de una mayor demanda de agua para la hidratación del CaO en la escoria. El flujo para estos morteros de geopolímero están en el rango de 49-150% (Ismail y El-Hassan 2018).

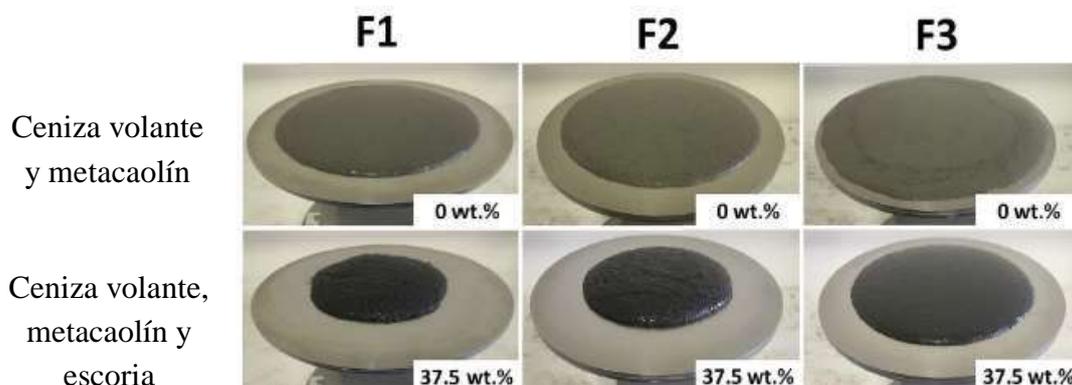


Figura 18. Comportamiento de las muestras de morteros con diferentes proporciones de componente líquido y diferente composición del precursor sólido sobre la mesa de fluidez (Fuente: Novais et al. 2019).

Otro factor que influye sobre la cantidad de solución activadora en las mezclas de geopolímero es la calidad de los agregados, los cuales juegan un rol similar al que tienen en las mezclas de PC. De la misma manera que se relaciona el activador alcalino con el precursor sólido, también ocurre con el agregado seleccionado para la fabricación de los morteros. Gholampour et al. (2019) encontraron que los agregados con las partículas de mayor tamaño y con forma menos angular producen morteros con mayor flujo, y por tanto, más trabajables.

Por otro lado, Navarro et al. (2018) y Temuujin et al. (2010) identificaron la dependencia que existe entre la cantidad de solución activadora y el tipo o cantidad de agregado, ya que la cantidad de sólidos a lubricar es mayor en morteros con mayor cantidad de arena. Además, en los geopolímeros, el activador alcalino puede reaccionar con los agregados y así restar contenido alcalino para la disolución del precursor sólido, manifestando cambios en el proceso de geopolimerización y en las propiedades finales como la resistencia a la compresión.

Al evaluar morteros de geopolímero a base de FA con contenido de agregado entre 10 - 30% en peso se obtuvo una fluidez aceptable y más alta resistencia, mientras que los morteros que contenían agregados al 40 y 50% en peso fueron rígidos y difíciles de colocar en los moldes de fabricación de las muestras (Temuujin et al. 2010).

Además, se sabe que las mezclas con mucha fluidez dejan de ser cohesivas, es decir, se observa que la pasta se desplaza más rápido que los agregados sobre la mesa de fluidez, es decir, una muestra con mucha fluidez representa una mezcla difícil de trabajar ya que, parte de los agregados tiende a separarse del conjunto de la mezcla.

Se concluye entonces que la trabajabilidad de los morteros geopoliméricos es influenciada por el contenido de agua en la mezcla, pero sobre todo por la cantidad de solución activadora y su composición, que influye por su grado de viscosidad. A su vez, esta fluidez es poco controlable porque depende de las características del precursor sólido, que determina la cantidad y composición de la solución activadora para lograr las propiedades finales requeridas para una determinada aplicación.

## Capítulo 4

### Propiedades mecánicas

#### 4.1 Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión es una de las principales propiedades a medir en el mortero endurecido. A través de ella se pueden analizar otras propiedades importantes como la resistencia a los ataques químicos, a las temperaturas elevadas e incluso su resistencia al fuego.

En la síntesis de geopolímeros, la resistencia a la compresión del producto resultante se usa comúnmente como un indicador cuantitativo de la reactividad geopolimérica de las materias primas (Tchadjie y Ekolu 2018). También puede definir la utilidad del mortero, fundamentalmente para los morteros de pega, morteros de reparación estructural y unidades de albañilería o mampostería. Otra de las aplicaciones del mortero geopolimérico es como material de unión entre unidades de albañilería.

La norma ASTM C270 (NTP 334.069) clasifica los morteros PC en 4 categorías, según su resistencia mínima a la compresión a 28 días de edad, así como se muestra en la Tabla 2. En base a esta propiedad, Salamanca (2001) define sus posibles aplicaciones y usos.

Tabla 2. Morteros de cemento Portland, sus resistencias mínimas y aplicaciones (Fuente: Adaptado de Salamanca 2001).

Tipo de Mortero	Resistencia a la Compresión a 28 días	Descripción	Aplicaciones
M	17.2 MPa	Alta resistencia y mayor durabilidad	Mampostería con o sin refuerzo, para estructuras en contacto con el suelo, sometidas a grandes cargas de compresión y congelamiento.
S	12.4 MPa	Mayor adherencia	Estructuras sometidas a cargas de compresión normales.
N	5.2 MPa	Mejor trabajabilidad	De uso general, para mampostería sobre el nivel del suelo.
O	2.4 MPa	Baja resistencia y alto contenido de cal	Para elementos sin carga o revestimientos que no estén sometidos a congelamiento.

En relación con las unidades de albañilería, la resistencia a la compresión del ladrillo de arcilla quemada alcanza un valor promedio de 6.04 MPa (Sarangapani et al. 2005), mientras que en bloques huecos de geopolímero de FA y GGBS a la edad de 3 días se ha podido conseguir más de 5 MPa y hasta 17.5 MPa a la edad de 28 días, lo que hace que el usuario lo manipule sin problemas (Venugopal y Radhakrishna 2016a). En ese sentido, es posible recomendar los bloques de geopolímero para mampostería estructural.

Hasta ahora se sabe que los factores que influyen en el desarrollo de la resistencia a la compresión de los geopolímeros son las condiciones de curado, la proporción de los elementos en su composición química y el tipo del material precursor. Así como se explicó con mayor amplitud en la sección 1.3, estos factores repercuten en el desarrollo microestructural del geopolímero, por lo tanto, también sobre su comportamiento mecánico.

En cuanto al método de curado, los morteros geopoliméricos llevan un proceso diferente a los morteros PC. Tal como se describe en la sección 1.3.3, las condiciones de curado para morteros geopoliméricos se refieren a la temperatura usada para propiciar la geopolimerización. Shukor Lim et al. (2018) señala que la resistencia a la compresión de los morteros geopoliméricos curados a temperatura ambiente es demasiado baja en comparación con los morteros geopoliméricos curados en horno. En la Figura 19 se evidencia como la resistencia a la compresión aumenta considerablemente con el aumento de la temperatura en geopolímeros basados en FA.

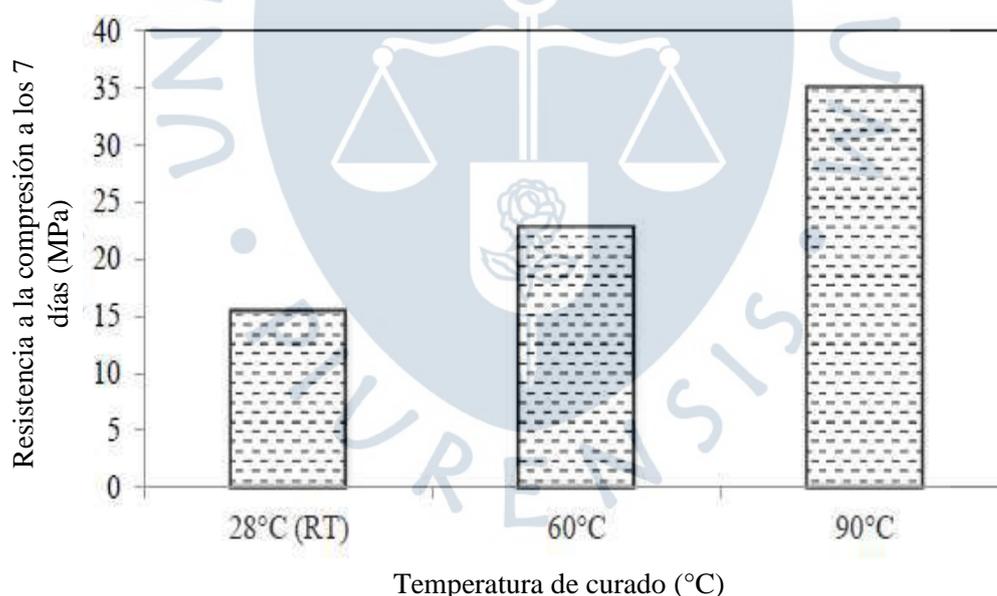


Figura 19. Efecto de la temperatura de curado sobre la resistencia a la compresión de morteros de geopolímero a base de FA en edades tempranas (Fuente: Shukor Lim et al. 2018).

Asociado a la temperatura de curado está el tiempo de aplicación. Shukor Lim et al. (2018) encontró que, contrario a lo esperado, un aumento en la duración del curado por calor (90°C) más allá de las 24 horas iniciales no mejora significativamente las propiedades de resistencia de los morteros geopoliméricos.

La resistencia a la compresión durante el curado de 24 horas fue de 31.46 MPa y durante la condición de curado de 48 horas aumentó ligeramente a 32.10 MPa. Es decir, la tasa de aumento de la resistencia fue rápida hasta las 24 horas y más allá de eso, el incremento de la resistencia fue solo moderada e incluso menor (Figura 20). Al parecer queda claro que una mayor temperatura es capaz de aumentar la resistencia, pero un mayor tiempo de aplicación de la temperatura no es relevante.

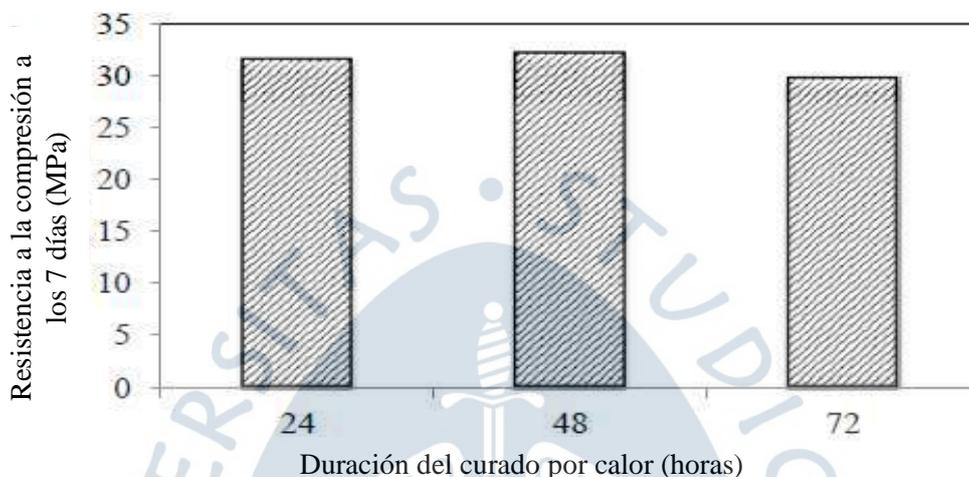


Figura 20. Efecto de la duración del curado por calor (90 °C) sobre la resistencia a la compresión de los morteros geopoliméricos a edades tempranas (Fuente: Shukor Lim et al. 2018).

Respecto a los elementos de su composición química, Bashar et al. (2016) y Gholampour et al. (2019) encontraron que una alta proporción de  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$  permiten el desarrollo de una alta resistencia a la compresión del mortero geopolimérico. Al comparar morteros geopoliméricos de FA y BFS, encontraron que las cenizas volantes tienen el contenido más alto de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  lo que genera proporciones muy bajas de  $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ , siendo estos valores de 2.01 y 0.19, respectivamente, mientras que la BFS es rica en  $\text{CaO}$ , lo que aumentó la resistencia a la compresión en comparación a los morteros de FA.

Por otro lado, la adquisición de resistencia a la compresión en el tiempo es también gradual, similar a lo que ocurre con los morteros PC, aunque con una mayor adquisición de resistencia a edades tempranas. Para este estudio se analizó la resistencia bajo el parámetro de la resistencia a la compresión relativa descrita a continuación en la ecuación 1, siendo el término que se utiliza para determinar qué porcentaje de la resistencia total adquiere el mortero a diferentes edades. Siguiendo la ecuación:

$$R_{C_{relativa}}(\%) = \frac{R_{C_{ti}}}{R_{C_t}} \times 100\% \quad (1)$$

Donde:

$R_c$  = resistencia a la compresión del mortero.

$t_i$  = 1, 3, 7, 14, 28, 42, 60 y 90 días.

$t$  = resistencia a la edad de 28 días.

En la Figura 21 se han graficado los resultados de diversas investigaciones que muestran la evolución de la resistencia a la compresión en el tiempo para diversos morteros geopoliméricos, para la comparación con la evolución del mortero PC se utilizan los resultados obtenidos por Lozano (2018). Se puede observar que todas las muestras geopoliméricas tienen una evolución de la resistencia en el tiempo similar a la que presenta un cemento Portland. En algunos casos como, por ejemplo, en los geopolímeros de GGBS, el 90% de la resistencia a la compresión se logró a la edad de 7 días y en el caso del FA se alcanzó el 86% de la resistencia a la edad de 3 días (Islam et al. 2014). Aunque se considera que, en comparación con el PC los geopolímeros adquieren resistencia a edades tempranas, esta condición depende mucho del tipo de precursor usado en la síntesis del geopolímero.

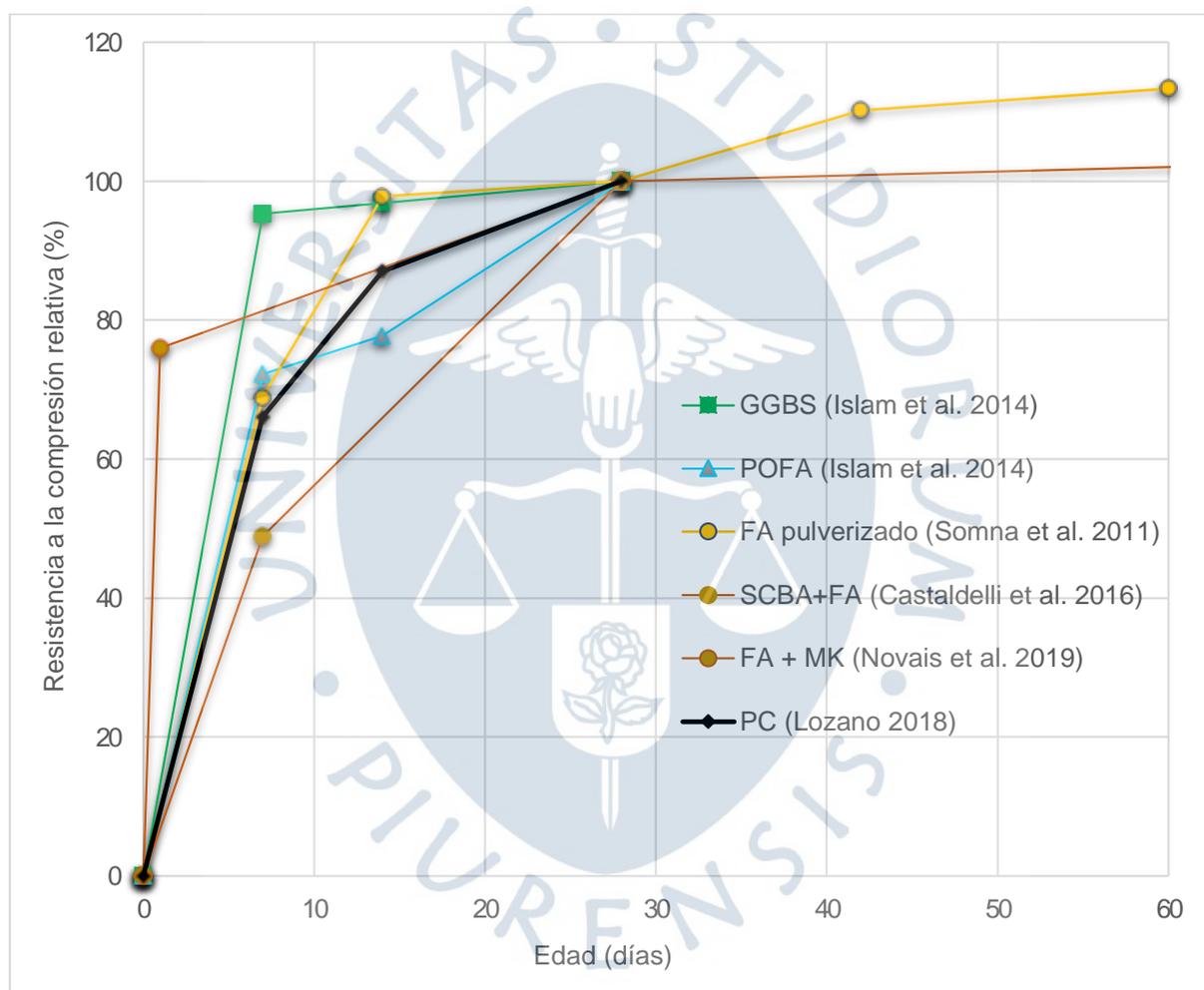


Figura 21. Evolución de la resistencia a la compresión relativa de diferentes morteros geopoliméricos reportados en la literatura.

Se muestra en la Tabla 3 una recopilación de resultados de resistencia a la compresión con diferentes precursores sólidos y combinaciones de ellos, quedando en evidencia que los morteros geopoliméricos tienen en todos los casos, más de 16.5 MPa, garantizando un buen desempeño en sus aplicaciones prácticas.

Tabla 3. Resistencia a la compresión de morteros geopoliméricos con diferentes precursores y condiciones de curado.

Precursor sólido	Resistencia a la compresión (MPa)		Temperatura de curado	Referencia
	07 días	28 días		
100% BFS	26.7	39.3	25°C	Moraes et al. 2016
25% SCA + 75% BFS	4.0	46.8	25°C	
25% FA + 75% SCA	11.3	23.1	20°C	Castaldelli et al. 2016
75% FA + 25% SCA	3.70	32.10	20°C	
50% FA + 50% SCA	33.1		65°C	
70% FA + 30% MK		16.50	23°C	Novais et al. 2019
100% FA	17.5	25.4	60°C	Lozano 2018
100% GGBS	61.0	64.0	65°C	Islam et al. 2014
100% POFA	13.0	18.0	65°C	
70% GGBS + 30% POFA	60.0	66.0	65°C	
50% GGBS + 50% FA	45.0	46.0	65°C	Sharmin et al. 2017
25%RHA + 25%MK + 50%BFS		48.0	65°C	
60% FA + 40% RHA	26.0		75°C	Detphan y Chindaprasirt 2009

#### 4.2 Resistencia a la flexión

La resistencia a la flexión no es una propiedad característica de los morteros de uso convencional por considerarse materiales cerámicos frágiles sin capacidad de deformación. Aunque esta propiedad no suele tomarse en cuenta en los materiales cerámicos por alcanzar valores muy reducidos, se puede evaluar en determinadas aplicaciones, por ejemplo, en morteros autonivelantes o de revestimiento continuo que se usan esencialmente para soleras y pavimentos rígidos. En este caso, la resistencia a la flexión se promueve con la incorporación de fibras.

Según la norma ASTM C348, la resistencia a la flexión es una medida de la resistencia a la tracción de los morteros, y se expresa como el módulo de rotura de muestras prismáticas de mortero endurecido, aplicando carga en el centro de luz o punto medio de la muestra. Por ello, suele usarse también como parámetro para calificar los bloques o elementos prismáticos fabricados con morteros.

Se ha encontrado que los geopolímeros tienen una resistencia a la flexión, ligeramente mayor que la del cemento convencional debido a la buena unión entre aglutinantes fluidos y agregados (Venugopal y Radhakrishna 2016a).

Por otro lado, se ha demostrado que la resistencia a la flexión de los geopolímeros aumenta a medida que aumenta la concentración de la solución de NH (Celikten y Sandemir 2018; Wang et al. 2005). En la Figura 22 se ha graficado los resultados de 2 investigaciones que relacionan la resistencia a la flexión con la concentración Molar del NH.

Al parecer la solución de NH con una concentración más alta proporciona una mejor capacidad de disolución de las partículas del precursor sólido, lo cual propicia una mejor formación de la estructura del geopolímero. Por otro lado, Celikten y Sandemir (2018) evaluó la resistencia a la flexión de morteros geopoliméricos de FA, reafirmando lo mencionado anteriormente. Aumentó la concentración de NH medido en %Na, las muestras obtuvieron 8.40 MPa con 8% Na y disminuyó a 1.90 MPa con 4% Na.

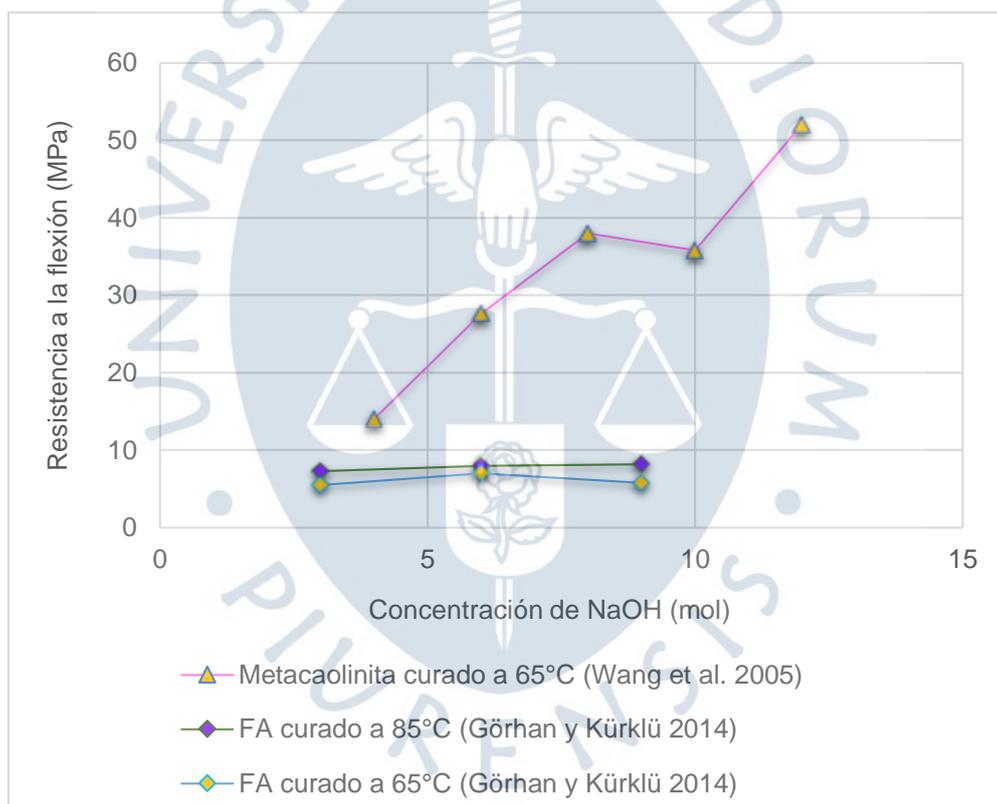


Figura 22. Resistencia a la flexión de morteros geopoliméricos y su variación de acuerdo con las diferentes concentraciones Molar de NaOH en la fabricación de las muestras.

De igual manera, se observa que la resistencia a la flexión de los morteros geopoliméricos también se ve influenciada por la temperatura de curado. En muestras de morteros geopoliméricos de FA curadas a 65°C durante 24 horas, las resistencias a la flexión variaron entre 4.90 y 7.00 MPa, mientras que los valores de resistencia a la flexión de las muestras curadas a 85°C oscilaron entre 5.50 y 8.10 MPa (Görhan y Kürklü 2014).

En la Figura 23 se compara los resultados de resistencia a la flexión de morteros geopoliméricos con un mortero PC, y de acuerdo con Lozano (2018), se afirma que el geopolímero resulta ser superior que el mortero PC. Se llega a la misma conclusión comparando los resultados de Wang et al. (2005), siendo la única diferencia el tipo de precursor sólido. Por lo tanto, los morteros geopoliméricos tienen una mayor amplitud de factores con los que se puede aumentar la resistencia a la flexión.

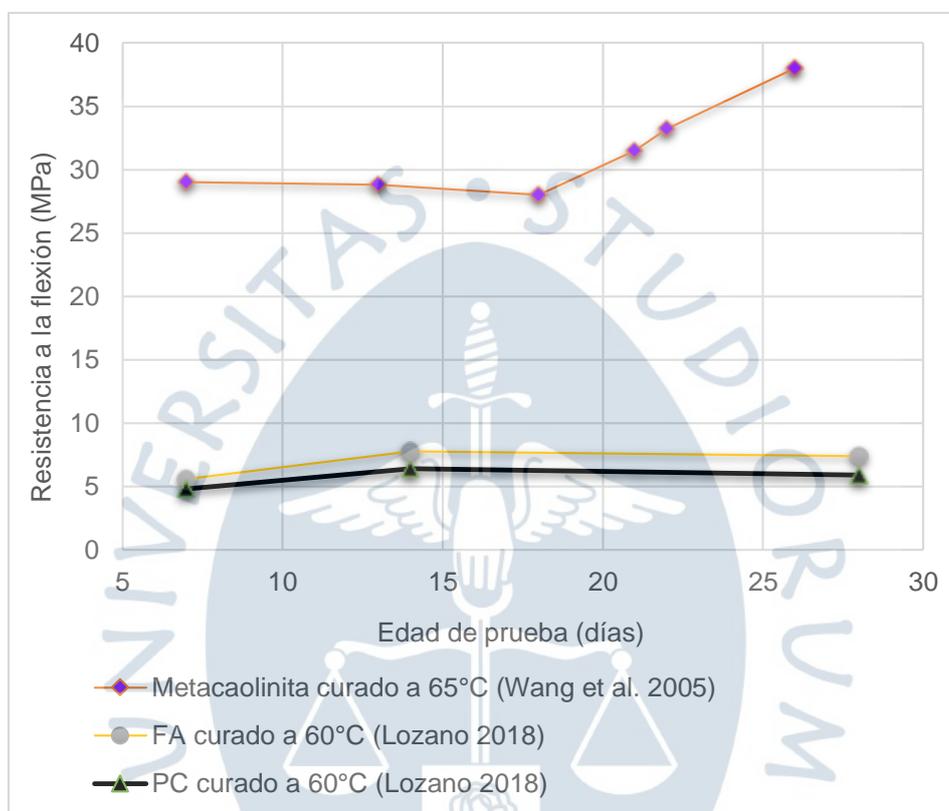


Figura 23. Resistencia a la flexión de morteros geopoliméricos y su variación según la edad de prueba del espécimen para muestras de metacaolín (MK), cenizas volantes (FA) y su comparación con cemento Portland convencional (PC).



## **Capítulo 5**

### **Propiedades de durabilidad**

#### **5.1 Resistencia a elevadas temperaturas**

Esta propiedad refractaria del mortero, o la capacidad que tiene como revestimiento ignífugo es requerida para la protección contra el fuego o aislante térmico de estructuras de acero o concreto, evitando la rápida propagación del fuego o retardando sus efectos sobre las estructuras.

La norma ASTM E119 proporciona instrucciones para la clasificación y criterios para la resistencia al fuego de varios materiales de construcción. El cemento Portland tiene la capacidad de resistir el fuego en situaciones normales, incluso es utilizado para los revestimientos ignífugos, aunque tiende a mostrar fuertes cambios físicos y químicos llegando al deterioro de las propiedades mecánicas del material cuando es expuesto a temperaturas por encima de los 400°C (Ranjbar et al. 2014; Kong y Sanjayan 2010).

Esto se debe a que uno de los productos de hidratación del cemento portland es el hidróxido de calcio, el cual se descompone en óxido de calcio y agua cuando la temperatura alcanza los 400°C aproximadamente. Por encima de esta temperatura es evidente el deterioro de sus propiedades mecánicas por la deshidratación del hidróxido de calcio y la rehidratación del óxido de calcio (Rashad 2019; Ranjbar et al. 2014).

Hasta ahora se ha encontrado que el geopolímero es un material con propiedades cerámicas que le proporcionan una buena resistencia al fuego y baja conductividad térmica o alta capacidad como aislante térmico. Rashad (2019) encontró que los morteros geopoliméricos de MK y FA exhibieron 33.57% y 42.14% menos de conductividad térmica que los morteros PC, después de la exposición a una elevada temperatura de 600°C por 2 horas, y una reducción de la resistencia a la compresión, que representa su resistencia a temperaturas elevadas, del 20.23% y 28.51% de sus respectivas resistencias iniciales, frente a una reducción del 61.13% de la muestra de mortero PC.

Como el material geopolimérico es un aglutinante con bajo contenido en calcio, no se dan los mismos cambios físicos y químicos que afectan al cemento portland. Sin embargo, Kong y Sanjayan (2010) encontraron que el concreto geopolímero puede perder resistencia a partir de la exposición a temperaturas mayores de 500°C, debido al desajuste térmico entre la matriz del geopolímero y los agregados. Es decir, la resistencia a la compresión resulta afectada

debido a la diferencia entre expansión térmica de los agregados y la pasta de geopolímero (Wongsa et al. 2020; Rashad 2019).

Este cambio en las propiedades del mortero geopolimérico cuando es sometido a elevadas temperaturas no siempre se manifiesta como una pérdida. Ranjbar et al. (2014) encontró que los morteros geopoliméricos de FA y POFA curados a 65°C aumentan su resistencia a la compresión cuando son expuestos a temperaturas de hasta 500°C, pero es más significativo este incremento en geopolímeros de GGBS curados en agua (Bingöl et al. 2020). Así se observa en la Figura 24, donde el mayor incremento de la resistencia a la compresión de los geopolímeros se da con la exposición a 300°C.

En la misma gráfica se observan los resultados de Bingöl et al. (2020) donde los morteros PC reaccionan de la misma forma que los morteros geopoliméricos, aumentando levemente su resistencia a la compresión frente a la exposición de temperaturas elevadas. Pasa de obtener 55 MPa a la temperatura de 20°C, a obtener aproximadamente 58 MPa luego de la exposición a 300°C, y luego descender hasta llegar a los 13 MPa con la exposición a 900°C respectivamente.

De acuerdo con lo mencionado, Wongsa et al. (2020) recopilaron información de diversos autores, los que sugieren que la causa de este ligero aumento en la resistencia a la compresión es el mejoramiento en la densificación y volumen de la matriz de geopolímero. Además, se encontró que en las muestras de mortero se formaron algunos productos cristalinos a causa de su exposición a 900°C, varios de estos nuevos productos afectan de forma negativa y positiva en la resistencia a la compresión del mortero geopolimérico. Por ejemplo, el sulfato de calcio hizo un efecto negativo mientras que los productos como  $Ye'elimate^4$ , silicato de calcio hidratado y aluminato tricálcico favorecieron la resistencia a la compresión del mortero a esos niveles de temperatura elevada.

---

<sup>4</sup> *Ye'elimate*, también llamado sulfoaluminato de calcio, es un mineral que se forma cuando los compuestos de alúmina y carbonato de calcio se calientan a una temperatura de hasta 1000 °C. El comportamiento expansivo de los cementos de *Ye'elimate* está controlado principalmente por la cantidad de etringita.

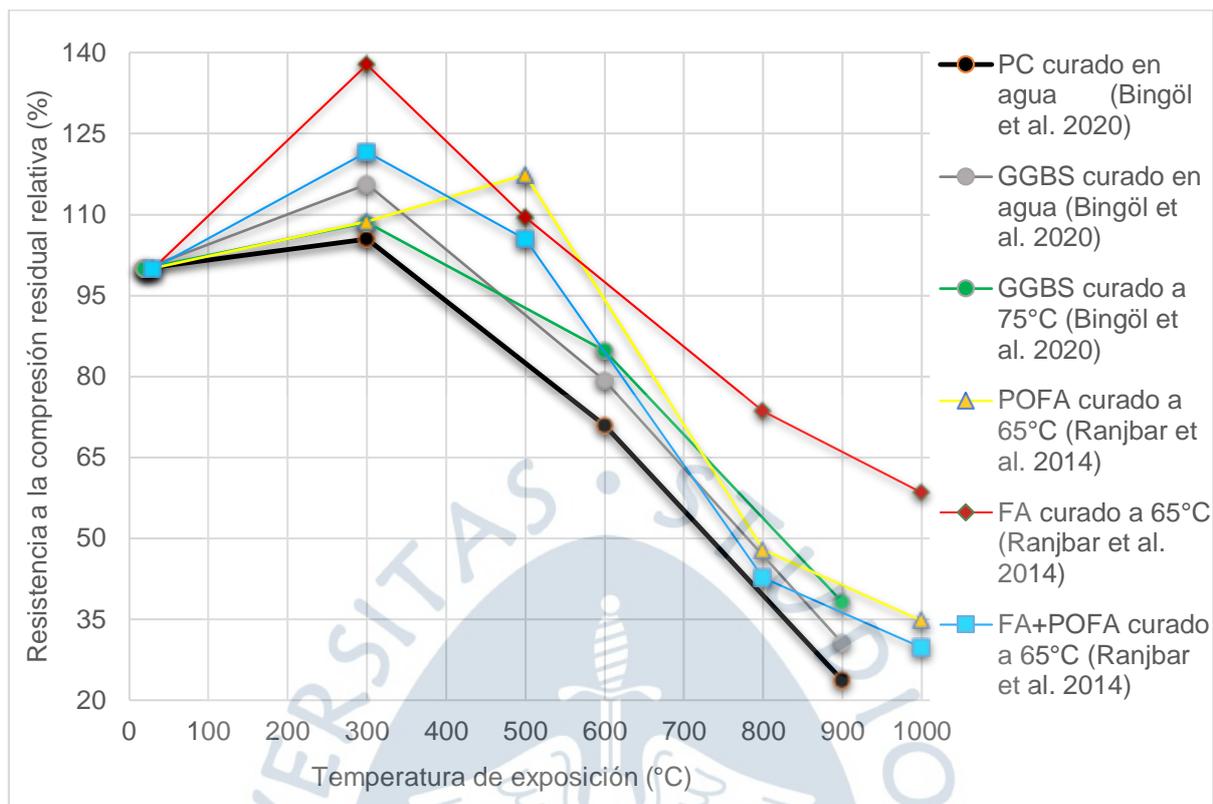


Figura 24. Resistencia a la compresión relativa después de la exposición a varias temperaturas elevadas de los morteros geopoliméricos.

Contrario a lo que se observa en la Figura 24, Kong y Sanjayan (2010) también experimentaron con la exposición a altas temperaturas (800°C) en pastas, morteros y concreto geopolimérico de FA curados durante 24 horas a temperatura ambiente y luego 24 horas a calor (80°C). Las muestras cilíndricas de morteros que inicialmente obtuvieron 72.30 MPa de resistencia a la compresión, colapsaron al alcanzar los 600°C, a diferencia de lo que se observa en el anterior gráfico donde el mortero a base de FA, pero bajo diferentes condiciones de curado, muestra una resistencia a la compresión de 21 MPa al exponerse a 600°C. Incluso cuenta con una resistencia residual expuesto hasta los 1000°C.

Los autores atribuyen este efecto al tamaño de la muestra y el tamaño de los agregados como los principales factores para una buena resistencia. Las muestras con agregados de 10 mm a más obtuvieron un buen resultado tanto a temperatura ambiental como a temperaturas elevadas. También observaron que la conducción de calor disminuye significativamente a medida que aumenta el tamaño de la muestra, es decir, aumenta el gradiente térmico entre el exterior caliente y el interior frío, lo que origina un agrietamiento térmico en las muestras más grandes.

Al parecer, la resistencia al fuego depende también del tipo de precursor sólido usado. Rashad (2019) encontró que los morteros geopoliméricos a base de MK obtuvieron mayor resistencia al fuego que los basados en FA, mientras que los morteros de geopolímeros a base de FA resultaron ser mejores aislantes térmicos que los morteros a base de MK. Esto podría

estar relacionado con el mayor contenido de óxido de aluminio, que tiene buenas propiedades refractarias (Rashad 2019).

Por otro lado, la exposición al fuego, calor o elevadas temperaturas no repercuten solamente en la microestructura y propiedades mecánicas de los morteros geopoliméricos. Las consecuencias de la exposición también se reflejan con los cambios físicos de la muestra (Figura 25). Wongsa et al. (2020) observó el cambio de color de los geopolímeros de FA expuestos a 300°C y lo atribuyen a la pérdida de humedad en la pasta de geopolímero, mientras que el color marrón de las otras muestras expuestas a 600°C y 900°C podría deberse al alto contenido de óxido de hierro de las FA a elevadas temperaturas.

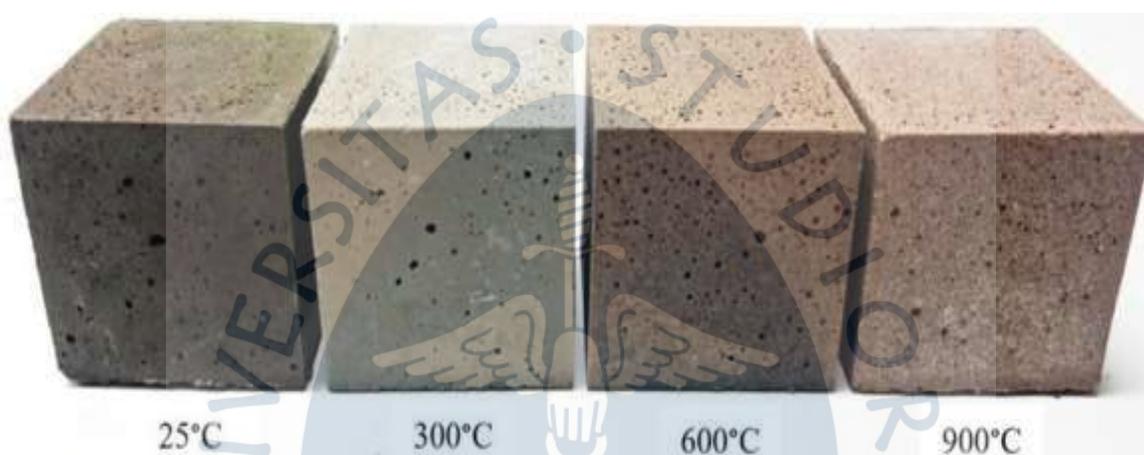


Figura 25. Morteros geopolimérico de FA, después de las exposiciones a temperaturas de 25°C, 300°C, 600°C y 900°C (Fuente: Wongsa et al. 2020).

Así mismo, otro efecto importante en un material expuesto a elevadas temperaturas es la pérdida de masa. Wongsa et al. (2020) halló que a mayor temperatura, mayor sería la pérdida de masa, debido a la pérdida de humedad y alguna desintegración en la matriz por las altas temperaturas. En este sentido, el cemento portland y el geopolímero reaccionan de forma similar.

## 5.2 Resistencia a ataques ácidos y sulfatos

Esta propiedad es importante para definir los posibles campos de aplicación, ya que se asocia con la exposición de las estructuras a ciertas condiciones o ambientes, como son los diferentes tipos de suelos, contacto con el agua (superficial, subterránea o de mar) u otros elementos.

El ataque de sulfatos es una de las causas que provocan mayor daño y deterioro en las estructuras de concreto de PC, ya que se encuentran de manera natural en los subsuelos y aguas subterráneas, incluso se encuentran depósitos naturales de sales, siendo los más comunes el sulfato de sodio y el sulfato de magnesio. En un mortero de PC, los sulfatos penetran en la microestructura de la mezcla para reaccionar con el compuesto C-S-H, y éste reacciona con el componente aluminato de la pasta endurecida.

En el geopolímero parece que ocurre algo similar. En su microestructura se encuentran ambos compuestos (C-S-H y aluminio), y esto promueve la formación de yeso y etringita

respectivamente, en las paredes de los poros capilares y en el gel, lo que causa, directa o indirectamente, la expansión y el agrietamiento, mientras que el ablandamiento y la desintegración son causados por la destrucción de C-S-H (Elyamany et al. 2018) con la aparición de la etringita, que afecta a la resistencia del geopolímero, tal como se explicó anteriormente en la sección 1.3.1(b), se trata del componente que desarrolla la resistencia de la matriz de geopolímero.

Otra posible causa del deterioro de los geopolímeros expuestos a sulfatos, específicamente del  $\text{MgSO}_4$ , se debe a la migración de Mg y S de la solución de sulfato de magnesio a la matriz y la migración de Ca y álcalis desde el interior de la muestra a la superficie, lo que provoca la destrucción de los enlaces Si-O-Si (Elyamany et al. 2018). Como resultado, los geles N-A-S-H reaccionan con  $\text{MgSO}_4$ , creando geles de silicato de aluminio y magnesio hidratado (M-A-S-H) de baja resistencia.

En relación con la resistencia a los ácidos, es una propiedad deseable para las estructuras utilizadas en el entorno agresivo de las industrias química, minera, de procesamiento de minerales y otras. Por ejemplo, el ácido sulfúrico es un tipo de solución ácida que se utiliza con frecuencia para simular el ataque del ácido en los sistemas de tuberías de alcantarillado o en las plantas de tratamiento de aguas, mientras que el ácido nítrico es un ácido muy oxidante que puede aparecer en el agua residual con un alto contenido en nitrógeno a través de bacterias de nitrificación en una planta de tratamiento de agua. Cuando estos ácidos se producen conjuntamente, la mezcla ácida tiene una acción de oxidación muy potente.

Por lo tanto, el ataque de ácidos y sulfatos es un problema importante en la durabilidad y tiempo de servicio de dichas estructuras. Pueden afectar la estructura de manera superficial, erosionando el concreto o mortero, o a profundidad a través de las microfisuras o vacíos del concreto, alterando la microestructura de la matriz.

Sin embargo, tomando como referencia que las soluciones ácidas tienden a disolver o neutralizar los compuestos de la pasta de cemento causando su desintegración, se puede decir que el cemento geopolimérico es realmente más resistente a los ácidos porque, a diferencia del cemento Portland, los cementos geopoliméricos no dependen de la cal y no se disuelven con soluciones ácidas (Wallah y Rangan 2006).

La estimación de esta resistencia a los ácidos y los sulfatos de un material se realiza básicamente mediante la medición de la masa, dimensiones y resistencia a la compresión de las muestras antes y después de exponerlas directamente a diferentes soluciones de sulfatos y ácidos, para luego hacer un análisis del grado de variación de los parámetros mencionados. Y los resultados se van a ver influenciados por diversos factores, como es lógico la concentración y el tipo de agente químico, además de la temperatura de curado, el tipo de precursor sólido, activador alcalino y otros que están directamente relacionados con los factores principales (permeabilidad y porosidad) (Pereira et al. 2015).

Por ello, en la Tabla 4 se muestra una recopilación de resultados de los morteros geopoliméricos expuestos a ácidos y sulfatos bajo diferentes parámetros de fabricación. Como se puede entender, el daño más severo y probablemente irreparable causado por dichos agentes

químicos se debe a que logran penetrar y hacer contacto con la microestructura y compuestos de la pasta de cemento PC, por lo que para que exista un ataque de agentes químicos, éstos deben encontrarse en solución, en su forma líquida, ya que en estado sólido no existe posibilidad de ingresar en la estructura ni de alterar químicamente la pasta de cemento PC.

De acuerdo con Pereira et al. (2015) se puede deducir que la severidad del daño depende en gran medida de su permeabilidad y porosidad del material, ya que las mezclas más compactas son menos deterioradas. Asimismo, ACI 201 indica que la permeabilidad del concreto tiene un efecto significativo para la resistencia a todos los ataques químicos.

En la Tabla 4 se ha encontrado que la resistencia al ataque químico de los geopolímeros parece estar relacionado con la temperatura de curado usada durante su fabricación. Una mayor temperatura de curado promueve una microestructura más estable y menos sensible al ataque químico. Aquí se encontró, por ejemplo, que los morteros geopoliméricos de FA: POFA curados a 90°C registraron una disminución del 32% en su resistencia a la compresión, mientras que para los morteros curados a temperatura ambiente la disminución fue del 35% después de 1 año de exposición a sulfatos.

Así también se encontró que el deterioro de la resistencia aumenta con el tiempo de exposición. Ya que, la exposición por 90 días, los morteros curados a temperatura ambiente tuvieron una reducción del 18% en la resistencia a la compresión, mientras que los morteros curados a 90°C tuvieron una disminución del 15% (Bhutta et al. 2013).

De la misma manera Elyamany et al. (2018) experimentó con morteros de diferentes precursores sólidos sumergidos en sulfato de magnesio (al 10%), encontrando la misma relación con la temperatura de curado, así como se observa en la Figura 26, a mayor temperatura de curado es menor el deterioro de la resistencia a la compresión.

Tabla 4. Resultados de la exposición morteros geopoliméricos expuestos a diferentes soluciones de ácidos y sulfatos en base a la variación de su resistencia a la compresión y masa.

Solución evaluada	Concentración (%)	Período de exposición (días)	Precursor	Temperatura de curado (°C)	Molaridad del activador (NH) (M)	Rc residual (%)	Variac. De masa (%)	Referencia
Sulfato de sodio	5%	365	FA+POFA	90	14	68.0	+2.00	Bhutta et al. 2013
				28		65.0	+1.70	
Sulfato de magnesio	10%	300	BFS+SCA	65	8	82.8	-0.40	Pereira et al. 2015
	5%			65		72.0	+2.00	
	10%	365	FA+GGBS	30	16	83.0	+0.65	

			90		90.0	+0.40	
			60		85.0	+0.50	Elyamany et al. 2018
			60	10	78.0	+0.66	
Ácido nítrico	10%	168	85		37.5	-0.54	Thokchom et al. 2009a
	10%		85		42.9	-1.31	
	0.25%	FA	60		45.0		
Ácido sulfúrico	0.50%		60	8	25.0		Wallah y Rangan 2006
	1%	365	60		12.0	-1.50	
	2%	FA+POFA	90	14	60.0	-1.50	Bhutta et al. 2013

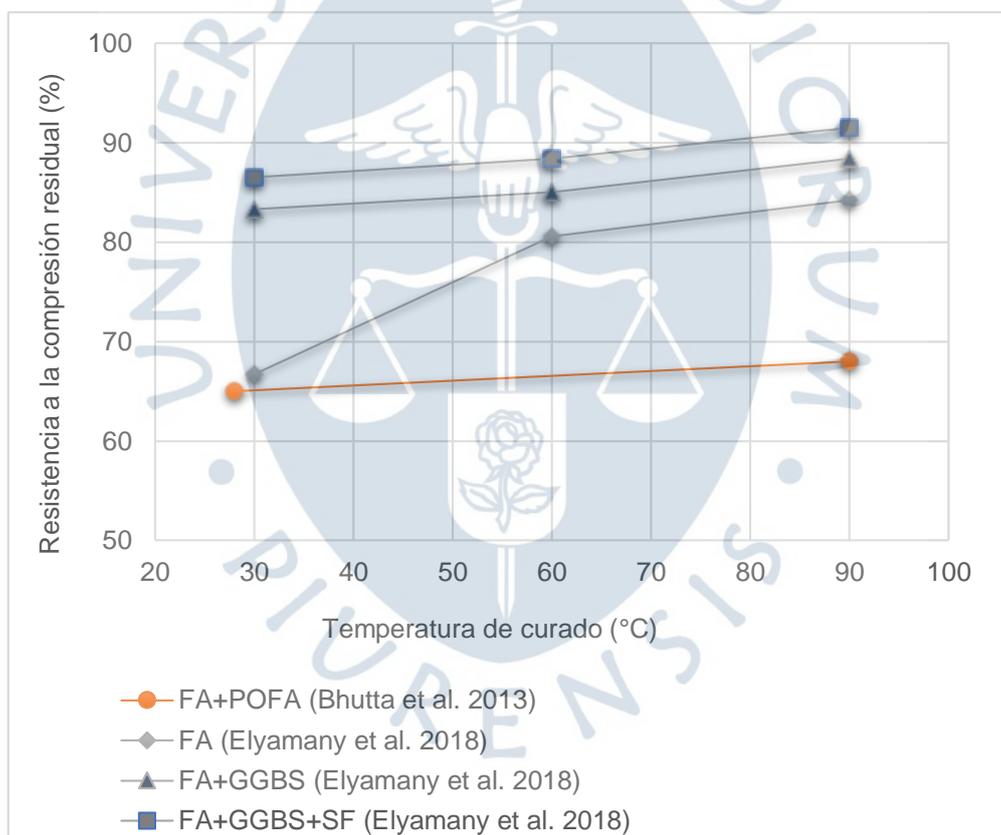


Figura 26. Efecto de la temperatura de curado sobre la resistencia a la compresión residual de morteros geopoliméricos después de 48 semanas de inmersión en sulfatos reportados en la literatura.

Elyamany et al. (2018) analizó uno de los principales parámetros, la relación de vacíos que se relaciona directamente con la porosidad, y se encontró que la relación más baja, es decir, de menor porosidad, producía la resistencia a la compresión residual más elevada en comparación con mezclas con mayor porosidad. Y verificó también que la relación de vacíos

más alta la obtuvo el mortero OPC, por lo tanto, la difusión de sulfato de magnesio sería más fácil y causaría la máxima reducción de resistencia, que no ocurre en los morteros geopoliméricos.

Además, se verificó que todas las muestras de geopolímeros incrementaron su masa de forma gradual durante el período de inmersión de 1 año en sulfato de sodio. En comparación con el mortero PC (+3.5%), el cambio de masa de todos los morteros geopoliméricos (+1.80%) fue mucho menor. Y esto se puede atribuir a una mayor absorción de agua por parte del mortero PC (Bhutta et al. 2013).

También se ha demostrado que la absorción de agua y la relación de vacíos y el aumento de masa disminuyen cuando aumenta la molaridad de NH para diversos tipos de precursor sólido, este hallazgo puede deberse a que el aumento en la molaridad de la solución de NH de 10 M a 16 M conduce a mejorar la densidad de la mezcla y reducir el contenido de huecos ya que el aumento de la molaridad contribuyó a reducir el contenido de agua (Elyamany et al. 2018).

Respecto a la exposición de los morteros en soluciones ácidas, Bhutta et al. (2013) encontró que el ataque de ácido sulfúrico (al 2%) durante un período de inmersión de hasta un año, las resistencias a la compresión residual se redujeron gradualmente para los morteros geopoliméricos curados a 90°C y a temperatura ambiente hasta 40% y 44%, respectivamente.

Además, Wallah y Rangan (2006) recopilaron información que le sugiere utilizar ácido sulfúrico con concentraciones de 0.25% a 2% para simular el ataque ácido en concreto para tuberías de alcantarillado. Los morteros geopoliméricos a base de FA fueron expuestos a estas soluciones por el periodo de 1 año.

Los resultados de la prueba sugieren que la degradación de la resistencia a la compresión se debe principalmente a la degradación de la matriz del geopolímero más que a los agregados. Dado que el mortero contenía aproximadamente un 50% en masa de aglutinante, en comparación con el concreto de aproximadamente un 23% en masa de aglutinante, la degradación de la resistencia a la compresión del mortero fue mayor que la del concreto.

Parece que el porcentaje de masa de agregados en una mezcla influye en la resistencia al ácido sulfúrico del concreto geopolimérico. La disminución de la resistencia a la compresión de las muestras de mortero geopolimérico fueron aproximadamente 55%, 75% y 88% para concentraciones de solución ácida de 0.25%, 0.5% y 1%, respectivamente.

En la Figura 27 se muestra el grado de deterioro superficial como la erosión y la distorsión de la forma de las muestras de mortero geopolimérico de FA para las concentraciones de solución ácida evaluada. Aquí se observa que la distorsión y deterioro de las muestras depende de la concentración de la solución ácida.

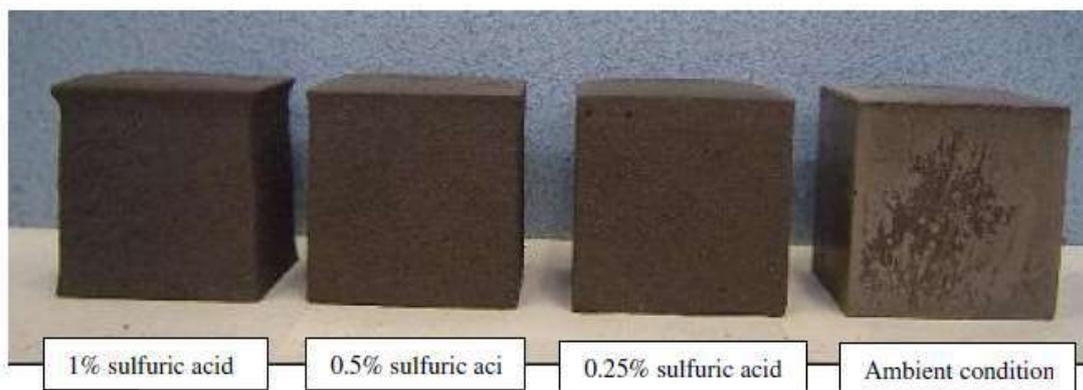


Figura 27. Aspecto visual de morteros geopoliméricos de FA después de un año de exposición en solución de ácido sulfúrico (Fuente: Wallah y Rangan 2006).

Sin embargo, Bhutta et al. (2013) observó que los morteros geopoliméricos de FA:POFA, con activador alcalino NH de 14M y curados a la temperatura de 90°C no mostraron signos visibles de deterioro, permaneciendo estructuralmente intactas. Contrariamente, las superficies de las muestras de mortero PC se deterioraron y se volvieron rugosas después de un año de exposición a ácido sulfúrico (ver Figura 28).

Además, se puede deducir la influencia de la temperatura de curado y concentración del activador alcalino sobre la durabilidad de los morteros geopoliméricos, ya que las muestras que sí fueron deterioradas (de la Figura 27) fueron preparadas en menor temperatura de curado (60°C) y concentración de NH (8M).



Figura 28. Aspecto visual de mortero geopolimérico de FA y el mortero PC después de un año de exposición en solución de ácido sulfúrico (2%) (Fuente: Bhutta et al. 2013).

También, se ha demostrado que la exposición al ácido nítrico (10%) provoca una pérdida de resistencia a la compresión un poco menor que la del ácido sulfúrico (10%). Incluso después de ser completamente des-alcalinado por ácidos, las muestras de morteros geopolimérico de FA (con aditivo superplastificante) todavía poseían una resistencia a la compresión residual mínima de aproximadamente el 30%, lo que confirma su alta resistencia (Thokchom et al. 2009a).

De la revisión de varios autores, se obtiene que los morteros PC pueden llegar a tener una reducción desde el 30% y hasta el 65% en su resistencia a la compresión, y hasta +4.5% de incremento de masa. Por lo tanto, se puede afirmar que los morteros geopoliméricos superan en resultados a los morteros PC. Además, los morteros geopoliméricos pueden variar sus resultados con los parámetros mencionados anteriormente, según lo requiera su aplicación.



## **Capítulo 6**

### **Adherencia con otros materiales**

La adherencia de los morteros de geopolímero con otros materiales es un requisito fundamental para su uso como mortero de pega, ya que, como su propio nombre lo dice, tiene la función de pegar diferentes materiales para formar estructuras, por lo que se necesita un mortero de unión de alta resistencia para obtener un ensamblaje estable sin grietas.

También es importante en reparaciones de estructuras y en concreto reforzado por su capacidad de adherencia a las barras de acero estructural. Esta capacidad depende principalmente de la interacción entre el mortero y el otro material a unirse, es decir, de la fuerza de unión en la interfaz o del vínculo que se crea entre los dos materiales. Este vínculo es influenciado generalmente por las características superficiales del material a unirse (Pareek et al. 2019; Sarangapani et al. 2005).

Por ejemplo, en la unión de madera con ladrillo de tierra mediante un aglomerante geopolimérico se observó que la nueva estructura es viable debido a la buena adherencia del mortero con los otros elementos, lo cual puede explicarse por la penetración del aglomerante geopolimérico en los poros de la madera, lo que crea entrelazamientos mecánicos y enlaces químicos cuando el potasio del activador alcalino reacciona con las células de la madera (Gouny et al. 2012).

En otras palabras, al igual que el mortero PC, el grado de penetración del mortero en la porosidad de la superficie a pegar es importante, pero en el caso de los geopolímeros, la adherencia química sí juega un rol determinante. El activador alcalino es capaz de disolver o modificar los compuestos del material a unir, creando una interfaz bastante resistente que contribuye grandemente a la adherencia del geopolímero.

En la Figura 29 se muestra la interfaz madera-geopolímero que Gouny et al. (2012) observó. Allí se señala que en la interfaz hay un alto contenido de K, que coincide la muestra con mejor adherencia observada. En general, Gouny et al. (2013) determinó que el ligante geopolímero de MK proporciona una buena adherencia de aproximadamente 1,5 MPa o 2 MPa, según el tipo de ladrillo usado.

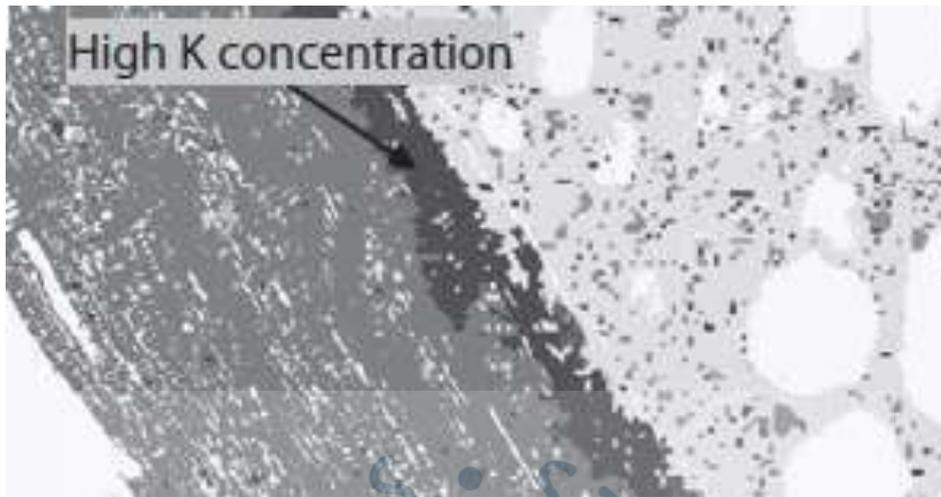


Figura 29. Imagen SEM de la interfaz madera-mortero geopolimérico observada en geopolímeros de MK (Fuente: Gouny et al. 2012).

También se sabe que el tipo de mortero influye en esta propiedad. Venugopal y Radhakrishna (2016b) encontraron que la resistencia de la mampostería de geopolímero se incrementó con el aumento del espesor del mortero geopolimérico, lo cual es totalmente opuesto a lo que ocurre con el cemento PC. En la mampostería con juntas de mortero PC, la resistencia aumenta a medida que se reduce el espesor del mortero. Dicha resistencia hace referencia a la fuerza de unión entre las unidades de albañilería y mortero.

Otra aplicación del mortero donde se hace crítica la adherencia es la reparación. Se han realizado varios estudios para verificar la utilidad del geopolímero como material de reparación, encontrándose que los geopolímeros tienen una mayor fuerza de adhesión y durabilidad comparados con los materiales a base de PC.

Pareek et al. (2019) realizaron un amplio estudio sobre la capacidad de adherencia del mortero geopolimérico de FA con otros materiales aplicando diferentes tratamientos en la superficie de contacto. Descubrieron que, a diferencia del mortero PC, los morteros geopoliméricos tienen excelentes propiedades de adhesión a superficies de concreto seco, placas de acero y barras de refuerzo.

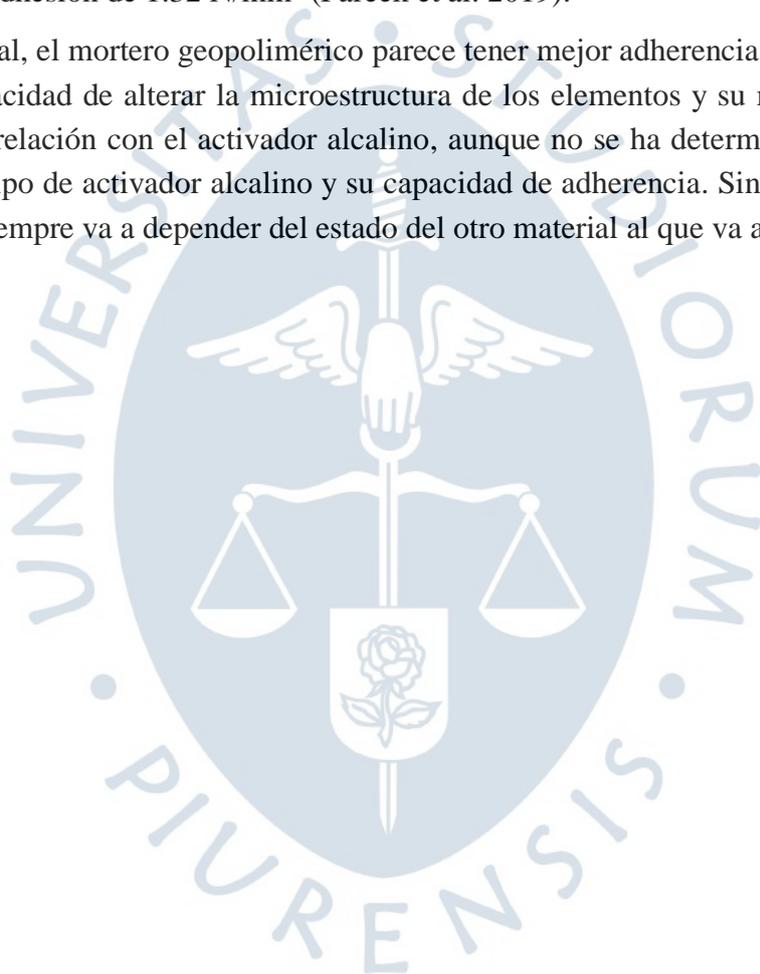
Al parecer la buena adherencia a los sustratos de concreto seco se debe a la formación de rugosidades en la superficie de contacto. Pareek et al. (2019) encontraron que los tratamientos a los sustratos de concreto con trituradora, amoladora, cepillos de alambre y pulidos con chorros de arena mejoraron aún más las propiedades de adherencia con los morteros geopoliméricos. Misma conclusión a la que llegó Gouny et al. (2012) cuando descubrió que la rugosidad de la madera resultaba ser favorecedora para la unión con el mortero geopolimérico.

Y, por el contrario, se obtiene una mala adhesión de los morteros geopoliméricos a las superficies de concreto húmedo debido a la presencia de agua en la zona interfacial, lo que disminuye la concentración de álcali del geopolímero, resultando en una menor fuerza de adherencia.

Respecto a la fuerza de unión con otros materiales como las barras de refuerzo estructural, se evaluó una varilla de acero embebida en un cubo de mortero tanto de geopolímero como de PC. Se obtuvo que la fuerza de unión más alta fue de  $14.80 \text{ N/mm}^2$  para mortero geopoliméricos, mientras que el mortero PC tuvo  $7.10 \text{ N/mm}^2$  cuando se usaban varillas deformadas. También se verificó que el mortero geopolimérico tiene mejores propiedades de adherencia que el mortero PC con barras de acero redondas lisas y para las placas de acero, la fuerza de adhesión fue  $1.34 \text{ N/mm}^2$  (Pareek et al. 2019).

Finalmente, en una prueba de resistencia a la adhesión para concreto con diferentes condiciones de superficie y adherido con material de reparación a base de cemento obtuvo una resistencia a la adhesión de  $1.32 \text{ N/mm}^2$  (Pareek et al. 2019).

En general, el mortero geopolimérico parece tener mejor adherencia que el mortero PC debido a la capacidad de alterar la microestructura de los elementos y su mayor variedad de propiedades en relación con el activador alcalino, aunque no se ha determinado una relación exacta entre el tipo de activador alcalino y su capacidad de adherencia. Sin embargo, su nivel de adherencia siempre va a depender del estado del otro material al que va a unirse.





## Conclusiones

El mortero geopolimérico resulta ser un material con la capacidad de mejorar las propiedades del mortero de cemento portland, incluso de abarcar propiedades que el mortero PC no alcanza, especialmente en relación con la durabilidad. Por lo tanto, abarca una mayor variedad de aplicaciones que un mortero de cemento portland.

Dada la naturaleza del geopolímero, se requiere desarrollar una formulación para cada precursor sólido que se desee usar para su producción, ya que son varios los factores que definen sus propiedades y, por lo tanto, el alcance de sus aplicaciones.

En la información recopilada se ha encontrado que algunos de los precursores sólidos utilizados en la fabricación de geopolímeros son materiales presentes en nuestra región. Se encuentran de manera abundante como desechos, por lo tanto, se considera un producto factible a producir en Piura.

Se han determinado tres factores principales que influyen en el desarrollo del mortero geopolímero: el activador alcalino, las condiciones de curado y el tipo de precursor sólido. El precursor sólido define gran parte de las propiedades que se van a desarrollar en el mortero geopolimérico, ya que todo el proceso empieza desde el tratamiento que se le da a este material hasta las varias combinaciones que se pueden hacer con diferentes precursores, y de eso dependen las condiciones de curado y activador alcalino que se vayan a requerir.

En cuanto a las propiedades físicas, no se puede afirmar que el mortero geopolimérico siempre se comporte mejor que los morteros de cemento portland. La porosidad y absorción de las muestras se encuentran en el rango de aproximadamente 11-30% y 5-10%, respectivamente. Mientras que la trabajabilidad se presenta como una propiedad muy similar a la del cemento portland.

Las propiedades mecánicas y de durabilidad del mortero geopolimérico muestran una tendencia muy definida a ser superiores que los morteros tradicionales. Los morteros geopoliméricos pueden llegar a obtener desde 12 MPa hasta 64 MPa de resistencia a la compresión, dependiendo de los factores que influyen en ello. Además, los resultados marcan una mayor ganancia de la resistencia a edades tempranas que los morteros tradicionales. Comparado con la resistencia del mortero de cemento portland, el mortero geopolimérico puede llegar a ser hasta 3 veces mayor, aproximadamente. La resistencia a la flexión de los morteros geopoliméricos tiene valores promedios de 7 MPa, en la mayoría de las literaturas revisadas.

Sin embargo, se ha reportado un valor que alcanza hasta los 52 MPa bajo las condiciones óptimas para el metacaolín.

Las muestras de mortero estudiadas revelan que cuando son expuestas a temperaturas elevadas de 300°C tienden a aumentar su resistencia a la compresión. Luego disminuyen gradualmente hasta deteriorarse por completo con la exposición a temperaturas por encima de los 900°C. Este comportamiento es similar al que ocurre con las muestras de mortero de cemento portland. Sin embargo, debido a su elevada resistencia a la compresión inicial (72 MPa) una muestra geopolimérica de cenizas volantes colapsó a la temperatura de 600°C.

Para la aplicación de morteros con exposición a agentes químicos, los morteros geopoliméricos obtuvieron mejores resultados frente a los sulfatos. Las muestras evaluadas sufrieron una disminución máxima en su resistencia a la compresión del 20%, mientras que los resultados por la exposición a medios ácidos registraron una reducción máxima del 50% de su resistencia a la compresión. Siendo estos resultados superiores a los encontrados para los morteros de cemento portland, con una reducción máxima hasta del 70%.

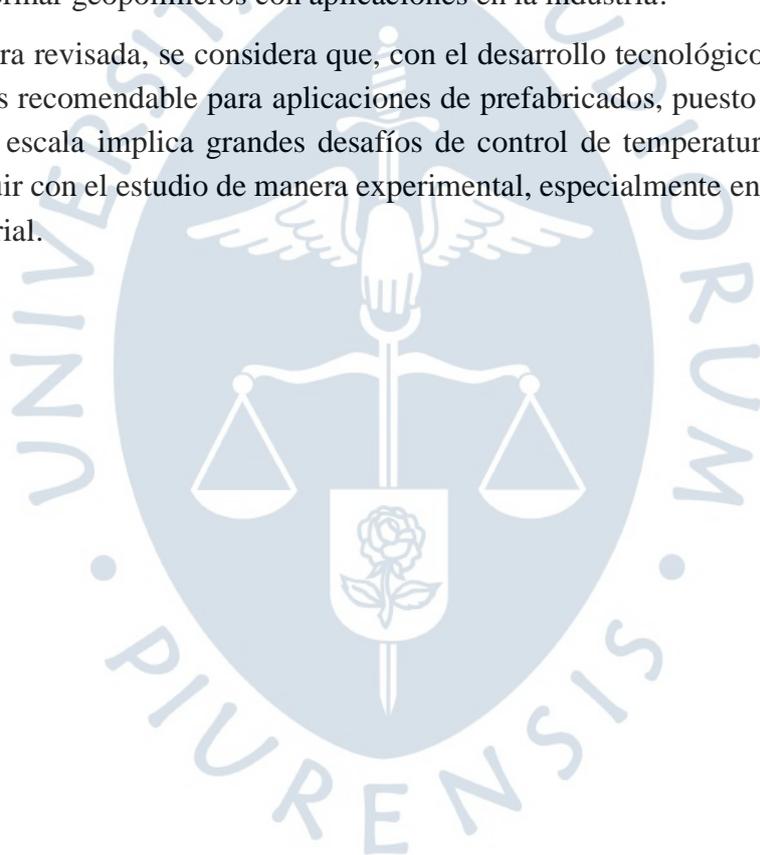
La adherencia del mortero geopolimérico y otros materiales, especialmente el acero de refuerzo del concreto constituye un potencial interesante para sus aplicaciones. Esto abre un amplio campo de aplicación, especialmente en casos de reparación o ambientes agresivos.

Las condiciones de curado hacen la mayor diferencia entre los morteros geopoliméricos y morteros PC, en cuanto a las propiedades de durabilidad, ya que atacan a la microestructura del material. Respecto a las propiedades físicas, el mortero geopolimérico puede ser igual o mejor que los morteros PC, dependiendo de su fabricación.

### **Recomendaciones**

En el desarrollo de este trabajo se encontró información de morteros geopoliméricos fabricados con materiales que abundan en la región Piura. Por ello, se recomienda iniciar un campo de investigación, evaluando la calidad de los precursores sólidos encontrados en Piura, y su potencial para formar geopolímeros con aplicaciones en la industria.

Según la literatura revisada, se considera que, con el desarrollo tecnológico actual, el mortero geopolimérico es recomendable para aplicaciones de prefabricados, puesto que su fabricación in situ y a gran escala implica grandes desafíos de control de temperatura. Por lo tanto, se recomienda seguir con el estudio de manera experimental, especialmente en las condiciones de curado del material.





## Referencias bibliográficas

- Abdullah; Hussin; Bnhussain; Ismail; Ibrahim (2011): Mechanism and Chemical Reaction of Fly Ash Geopolymer Cement- A Review. En: International Journal of Pure and Applied Sciences and Technology.
- Al Bakri Abdullah, Mohd Mustafa; Hussin, Kamarudin; Bnhussain, Mohammed; Khairul Nizar, Ismail; Abd Razak, Rafiza; Zarina, Yahya (2012): Microstructure Study on Optimization of High Strength Fly Ash Based Geopolymer. En: AMR 476-478, pág. 2173–2180. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.476-478.2173.
- Barbosa, V. F.; MacKenzie, K. J.; Thaumaturgo, C. (2000): Synthesis and characterisation of materials based on inorganic polymers of alumina and silica: sodium polysialate polymers. International Journal of Inorganic Materials 2 (4), pág. 309–317.
- Bashar, Iftekhair Ibnul; Alengaram, U. Johnson; Jumaat, Mohd Zamin; Islam, Azizul (2016): Development of Sustainable Geopolymer Mortar using Industrial Waste Materials. En: Materials Today: Proceedings 3 (2), pág. 125–129. DOI: 10.1016/j.matpr.2016.01.038.
- Bhutta, M. A. R.; Ariffin, N. F.; Hussin, M. W.; Lim, N. H. A. S. (2013): Sulfate and sulfuric acid resistance of geopolymer mortars using waste blended ash. En: Jurnal Teknologi 61 (3).
- Bingöl, Şinasi; Bilim, Cahit; Atiş, Cengiz Duran; Durak, Uğur (2020): Durability Properties of Geopolymer Mortars Containing Slag. En: Iran J Sci Technol Trans Civ Eng 44 (1), pág. 561–569. DOI: 10.1007/s40996-019-00337-0.
- Castaldelli, V. N.; Moraes, J.C.B.; Akasaki, J. L.; Melges, J.L.P.; Monzó, J.; Borrachero, M. V. et al. (2016): Study of the binary system fly ash/sugarcane bagasse ash (FA/SCBA) in SiO<sub>2</sub>/K<sub>2</sub>O alkali-activated binders. En: Fuel 174, pág. 307–316. DOI: 10.1016/j.fuel.2016.02.020.
- Celikten, Serhat; Sandemir, Mustafa (2018): An Investigation on the production potential of geopolymer mortar with fly ash, pág. 294–300.
- Chindaprasirt, Prinya; Jaturapitakkul, Chai; Chalee, Wichian; Rattanasak, Ubolluk (2009): Comparative study on the characteristics of fly ash and bottom ash geopolymers. En: Waste management (New York, N.Y.) 29 (2), pág. 539–543. DOI: 10.1016/j.wasman.2008.06.023.
- Davidovits, Joseph (2015): Geopolymer Chemistry and Applications, 4th edition. En: Geopolymer Institute –Saint-Quentin, France.
- Detphan, S.; Chindaprasirt, Prinya (2009): Preparation of fly ash and rice husk ash geopolymer. En: International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials 16 (6), pág. 720–726. DOI: 10.1016/S1674-4799(10)60019-2.

- Díaz, E. I.; Allouche, E. N.; Eklund, S. (2010): Factors affecting the suitability of fly ash as source material for geopolymers. En: *Fuel* 89 (5), pág. 992–996. DOI: 10.1016/j.fuel.2009.09.012.
- Duxson, P.; Fernández-Jiménez, A.; Provis, J. L.; Lukey, G. C.; Palomo, A.; Van Deventer, J. S. J. (2007): Geopolymer technology: the current state of the art. En: *J Mater Sci* 42 (9), pág. 2917–2933. DOI: 10.1007/s10853-006-0637-z.
- Elyamany, Hafez E.; Abd Elmoaty, Abd Elmoaty M.; Elshaboury, Ahmed M. (2018): Magnesium sulfate resistance of geopolymer mortar. En: *Construction and Building Materials* 184 (8), pág. 111–127. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.06.212.
- Gholampour, Aliakbar; van Ho, Dac; Ozbakkaloglu, Togay (2019): Ambient-cured geopolymer mortars prepared with waste-based sands: Mechanical and durability-related properties and microstructure. En: *Composites Part B: Engineering* 160, pág. 519–534. DOI: 10.1016/j.compositesb.2018.12.057.
- Glasby, Tom; Day, John; Genrich, Russell; Kemp, Michael (2015): Wagners 'Earth Friendly Concrete geopolymer concrete saudi conference 2015.
- Görhan, Gökhan; Kürklü, Gökhan (2014): The influence of the NaOH solution on the properties of the fly ash-based geopolymer mortar cured at different temperatures. En: *Composites Part B: Engineering* 58, pág. 371–377. DOI: 10.1016/j.compositesb.2013.10.082.
- Gouny, F.; Fouchal, F.; Maillard, P.; Rossignol, S. (2012): A geopolymer mortar for wood and earth structures. En: *Construction and Building Materials* 36, pág. 188–195. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.04.009.
- Gouny, F.; Fouchal, F.; Pop, O.; Maillard, P.; Rossignol, S. (2013): Mechanical behavior of an assembly of wood–geopolymer–earth bricks. En: *Construction and Building Materials* 38, pág. 110–118. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.07.113.
- Hanjitsuwan, Sakonwan; Phoo-ngernkham, Tanakorn; Damrongwiriyanupap, Nattapong (2017): Comparative study using Portland cement and calcium carbide residue as a promoter in bottom ash geopolymer mortar. En: *Construction and Building Materials* 133, pág. 128–134. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.12.046.
- Heah, C. Y.; Kamarudin, H.; Bakri, A. Mustafa AIM.; Binhussain, M.; Luqman, M.; Nizar, I. Khairul et al. (2011): Effect of Curing Profile on Kaolin-based Geopolymers. En: *Physics Procedia* 22, pág. 305–311. DOI: 10.1016/j.phpro.2011.11.048.
- INEI - Instituto Nacional de Estadística e Informática (2015): Residuos Sólidos. En: *Anuario de Estadísticas Ambientales 2015 Capítulo 5*, pág. 319–356.
- Islam, Azizul; Alengaram, U. Johnson; Jumaat, Mohd Zamin; Bashar, Iftekhair Ibnul (2014): The development of compressive strength of ground granulated blast furnace slag-palm oil fuel ash-fly ash based geopolymer mortar. En: *Materials & Design* (1980-2015) 56, pág. 833–841. DOI: 10.1016/j.matdes.2013.11.080.

- Ismail, Najif; El-Hassan, Hilal (2018): Development and Characterization of Fly Ash–Slag Blended Geopolymer Mortar and Lightweight Concrete. En: *J. Mater. Civ. Eng.* 30 (4), pág. 1–14. DOI: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002209.
- Jeffrey, C. (2011): Construction and demolition waste recycling: A literature review. En: *Dalhousie University's Office of Sustainability* 35.
- Kaur, Mandeep; Singh, Jaspal; Kaur, Manpreet (2018): Microstructure and strength development of fly ash-based geopolymer mortar: Role of nano-metakaolin. En: *Construction and Building Materials* 190, pág. 672–679. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.09.157.
- Klaartje De Weerdt (2011): Geopolymers – State of the art. En: *Consortium Concrete Innovation Centre*.
- Kong, Daniel L.Y.; Sanjayan, Jay G. (2010): Effect of elevated temperatures on geopolymer paste, mortar and concrete. En: *Cement and concrete research* 40 (2), pág. 334–339. DOI: 10.1016/j.cemconres.2009.10.017.
- Lozano, J. Norvey (2018): Análisis de la resistencia a la compresión y flexión en morteros activados alcalinamente con ceniza volante sin la utilización de cemento portland.
- Mahboob, S. (2014): Development of Low Carbon and Low Energy Geopolymer-based Cement free Construction Materials. En: *Department of Civil Engineering, Brunel University (Doctoral dissertation, PhD Thesis)*.
- Majidi, Behzad (2009): Geopolymer technology, from fundamentals to advanced applications: a review. En: *Materials Technology* 24 (2), pág. 79–87. DOI: 10.1179/175355509X449355.
- McLellan, Benjamin C.; Williams, Ross P.; Lay, Janine; Van Riessen, A.; Corder, Glen D. (2011): Costs and carbon emissions for geopolymer pastes in comparison to ordinary portland cement. En: *Journal of Cleaner Production* 19 (9-10), pág. 1080–1090. DOI: 10.1016/j.jclepro.2011.02.010.
- Mijarsh, M.J.A.; Megat Johari, M. A.; Ahmad, Z. A. (2014): Synthesis of geopolymer from large amounts of treated palm oil fuel ash: Application of the Taguchi method in investigating the main parameters affecting compressive strength. En: *Construction and Building Materials* 52, pág. 473–481. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2013.11.039.
- Moraes, J.C.B.; Tashima, M. M.; Akasaki, J. L.; Melges, J.L.P.; Monzó, J.; Borrachero, M. V. et al. (2016): Increasing the sustainability of alkali-activated binders: The use of sugar cane straw ash (SCSA). En: *Construction and Building Materials* 124, pág. 148–154.
- Naghizadeh, A.; Ekolu, S. O. (2019): Method for comprehensive mix design of fly ash geopolymer mortars. En: *Construction and Building Materials* 202 (6), pág. 704–717. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.12.185.

- Nath, Pradip; Sarker, Prabir Kumar (2014): Effect of GGBFS on setting, workability and early strength properties of fly ash geopolymer concrete cured in ambient condition. En: *Construction and Building Materials* 66, pág. 163–171. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.05.080.
- Navarro, R.; Alcocel, E. G.; Sánchez, I.; Garcés, P.; Zornoza, E. (2018): Mechanical properties of alkali activated ground SiMn slag mortars with different types of aggregates. En: *Construction and Building Materials* 186, pág. 79–89. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.07.093.
- Ndjock, B. Djon Li; Elimbi, Antoine; Cyr, Martin (2017): Rational utilization of volcanic ashes based on factors affecting their alkaline activation. En: *Journal of Non-Crystalline Solids* 463, pág. 31–39. DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2017.02.024.
- Ng, Connie; Alengaram, U. Johnson; Wong, Leong Sing; Mo, Kim Hung; Jumaat, Mohd Zamin; Ramesh, S. (2018): A review on microstructural study and compressive strength of geopolymer mortar, paste and concrete. En: *Construction and Building Materials* 186, pág. 550–576. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.07.075.
- Noticias RSE (2013): En el Perú se dispondrían sólo 500 mil toneladas anuales de residuos industriales. En: *Noticias RSE Perú*. Disponible en línea en <https://noticias.rse.pe/en-el-peru-se-dispondrian-solo-500-mil-toneladas-anuales-de-residuos-industriales/>.
- Novais, Rui M.; Carvalheiras, João; Senff, Luciano; Seabra, Maria P.; Pullar, Robert C.; Labrincha, João A. (2019): In-depth investigation of the long-term strength and leaching behaviour of inorganic polymer mortars containing green liquor dregs. En: *Journal of Cleaner Production* 220, pág. 630–641. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.02.170.
- Palomo, A.; Fernández-Jiménez, A.; Criado, M. (2004): "Geopolimeros": una única base química y diferentes microestructuras. En: *Materiales de construcción* 54 (275), pág. 77–91.
- Palomo, A.; Grutzeck, M. W.; Blanco, M. T. (1999): Alkali-activated fly ashes: A cement for the future. En: *Cement and concrete research* 29 (8), pág. 1323–1329.
- Pareek, Sanjay; Kashima, Hiroo; Maruyama, Ippei; Araki, Yoshikazu (2019): Adhesion characteristics of geopolymer mortar to concrete and rebars. En: *MATEC Web Conf.* 258, pág. 1012. DOI: 10.1051/mateconf/201925801012.
- Part, W. K.; Ramli, M.; Cheah, C. B. (2017): Chapter11 - An overview on the influence of various factors on the properties of geopolymer concrete derived from industrial by-products. En: *Construction and Building Materials* 77, pág. 263–334. DOI: 10.1016/B978-0-12-804524-4.00011-7.
- Pereira, Adriana; Akasaki, Jorge L.; Melges, José L.P.; Tashima, Mauro M.; Soriano, Lourdes; Borrachero, María V. et al. (2015): Mechanical and durability properties of alkali-activated mortar based on sugarcane bagasse ash and blast furnace slag. En: *Ceramics International* 41 (10), pág. 13012–13024. DOI: 10.1016/j.ceramint.2015.07.001.

- Perera, D. S.; Uchida, O.; Vance, E. R.; Finnie, K. S. (2007): Influence of curing schedule on the integrity of geopolymers. En: *J Mater Sci* 42 (9), pág. 3099–3106. DOI: 10.1007/s10853-006-0533-6.
- Puertas, F.; Martínez-Ramírez, S.; Alonso, S.; Vazquez, T. (2000): Alkali-activated fly ash/slag cements: strength behaviour and hydration products. En: *Cement and concrete research* 30 (10), pág. 1625–1632. DOI: 10.1016/S0008-8846(00)00298-2.
- Ranjbar, Navid; Mehrali, Mehdi; Alengaram, U. Johnson; Metselaar, Hendrik Simon Cornelis; Jumaat, Mohd Zamin (2014): Compressive strength and microstructural analysis of fly ash/palm oil fuel ash based geopolymer mortar under elevated temperatures. En: *Construction and Building Materials* 65, pág. 114–121. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.04.064.
- Rashad, Alaa M. (2019): Insulating and fire-resistant behaviour of metakaolin and fly ash geopolymer mortars. En: *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Construction Materials* 172 (1), pág. 37–44. DOI: 10.1680/jcoma.17.00016.
- Rovnaník, Pavel (2010): Effect of curing temperature on the development of hard structure of metakaolin-based geopolymer. En: *Construction and Building Materials* 24 (7), pág. 1176–1183. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2009.12.023.
- Ruiz, G. (2019): Natural fiber reinforced geopolymer bricks for masonry applications. Literature review.
- Ruiz, G.; Aguilar, R.; Nakamatsu, J.; Kim, S. (2019a): Effect of Curing conditions on the Compressive Strength of Spent Fluid Catalytic Cracking Catalyst (SFCCC)-based Geopolymers.
- Ruiz, G.; Aguilar, R.; Nakamatsu, J.; Kim, S. (2019b): Synthesis of a Geopolymer Binders Using Spent Fluid Catalytic Cracking (FCC) Catalyst.
- Salamanca, Rodrigo (2001): La Tecnología De Los Morteros. En: *Ciencia e Ingeniería Neogranadina* 11 (1), pág. 41–48.
- Sarangapani, G.; Venkatarama Reddy, B.; Jagadish, K. (2005): Brick-Mortar Bond and Masonry Compressive Strength. En: *Journal of materials in civil engineering* 17 (2), pág. 229–237. DOI: 10.1061/(ASCE)0899-1561(2005)17:2(229).
- Sharmin, Afia; Alengaram, U. Johnson; Jumaat, Mohd Zamin; Yusuf, Moruf Olalekan; Kabir, S. AlamgirM.; Bashar, Iftekhair Ibnul (2017): Influence of source materials and the role of oxide composition on the performance of ternary blended sustainable geopolymer mortar. En: *Construction and Building Materials* 144 (2), pág. 608–623. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.03.178.
- Shi, Caijun (1996): Strength, pore structure and permeability of alkali-activated slag mortars. En: *Cement and concrete research* 26 (12), pág. 1789–1799.

- Shukor Lim, Nor Hasanah Abdul; Samadi, Mostafa; Ariffin, Nur Farhayu; Hussin, Mohd Warid; Rafique Bhutta, Muhammad Aamer; Sarbini, Noor Nabilah et al. (2018): Effect of Curing Conditions on Compressive Strength of FA-POFA-based Geopolymer Mortar. En: IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 431, pág. 92007. DOI: 10.1088/1757-899X/431/9/092007.
- Singh, B.; Ishwarya, G.; Gupta, M.; Bhattacharyya, S. K. (2015): Geopolymer concrete: A review of some recent developments. En: Construction and Building Materials 85, pág. 78–90. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.03.036.
- Somna, Kiatsuda; Jaturapitakkul, Chai; Kajitvichyanukul, Puangrat; Chindapasirt, Prinya (2011): NaOH-activated ground fly ash geopolymer cured at ambient temperature. En: Fuel 90 (6), pág. 2118–2124. DOI: 10.1016/j.fuel.2011.01.018.
- Sukmak, Patimapon; Horpibulsuk, Suksun; Shen, Shui-Long (2013): Strength development in clay-fly ash geopolymer. En: Construction and Building Materials 40, pág. 566–574. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.11.015.
- Tashima, M. M.; Akasaki, J. L.; Melges, J.L.P.; Soriano, L.; Monzó, J.; Payá, J.; Borrachero, M. V. (2013): Alkali activated materials based on fluid catalytic cracking catalyst residue (FCC): Influence of SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O and H<sub>2</sub>O/FCC ratio on mechanical strength and microstructure. En: Fuel 108, pág. 833–839. DOI: 10.1016/j.fuel.2013.02.052.
- Tchadjie, L. N.; Ekolu, S. O. (2018): Enhancing the reactivity of aluminosilicate materials towards geopolymer synthesis. En: Journal of Materials Science 53 (7), pág. 4709–4733.
- Temuujin, J.; Van Riessen, A.; MacKenzie, K.J.D. (2010): Preparation and characterisation of fly ash based geopolymer mortars. En: Construction and Building Materials 24 (10), pág. 1906–1910. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.04.012.
- Temuujin, J.; Williams, R. P.; Van Riessen, A. (2009): Effect of mechanical activation of fly ash on the properties of geopolymer cured at ambient temperature. En: Journal of Materials Processing Technology 209 (12-13), pág. 5276–5280. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2009.03.016.
- Thokchom, S.; Ghosh, P.; Ghosh, S. (2009a): Acid resistance of fly ash based geopolymer mortars. En: International Journal of Recent Trends in Engineering 1 (6), pág. 36.
- Thokchom, S.; Ghosh, S.; Ghosh, P. (2009b): Effect of water absorption, porosity and sorptivity on durability of geopolymer mortars. En: ARPN Journal of engineering and Applied Sciences 4 (7), pág. 28–32.
- Valera, Benjamin; Bandeira Tavares, Pedro; Teixeira Pinto, Amandio; Castro Gomes, Joao (2013): Chemical composition correction of aluminosilicate materials to enhance their conditions as precursors for alkaline activation. En: Journal of Materials Science and Engineering with Advanced Technology.
- Venugopal, K.; Radhakrishna (2016a): Development of solid and Hollow geopolymer masonry blocks. En: Indian Journal of Science and Technology 9 (26).

- Venugopal, K.; Radhakrishna (2016b): Structural Behavior of Geopolymer Masonry. En: Indian Journal of Science and Technology 9 (25). DOI: 10.17485/ijst/2016/v9i25/91586.
- Wallah, S. E.; Rangan, B. V. (2006): Low-Calcium Fly Ash-based Geopolymer Concrete: Long-Term Properties.
- Wang, Hongling; Li, Haihong; Yan, Fengyuan (2005): Synthesis and mechanical properties of metakaolinite-based geopolymer. En: Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects 268 (1-3), pág. 1–6. DOI: 10.1016/j.colsurfa.2005.01.016.
- Wardhono, A. (2018): The Application of Different Curing Models to the Strength Development of High Calcium Fly Ash Geopolymer Incorporating Limestone. En: J. Phys.: Conf. Ser. 1108, pág. 12087. DOI: 10.1088/1742-6596/1108/1/012087.
- Williams, Ross P.; Van Riessen, Arie (2010): Determination of the reactive component of fly ashes for geopolymer production using XRF and XRD. En: Fuel 89 (12), pág. 3683–3692. DOI: 10.1016/j.fuel.2010.07.031.
- Wongsa, Ampol; Wongkvanklom, Athika; Tanangteerapong, Duangkanok; Chindaprasirt, Prinya (2020): Comparative study of fire-resistant behaviors of high-calcium fly ash geopolymer mortar containing zeolite and mullite. En: Journal of Sustainable Cement-Based Materials 9 (5), pág. 307–321. DOI: 10.1080/21650373.2020.1748741.
- Xu, Hua; Van Deventer, Jannie (2002): Geopolymerization of multiple minerals. En: Minerals engineering 15 (12), pág. 1131–1139.
- Zuhua, Z.; Xiao, Y.; Huajun, Z.; Yue, C. (2009): Role of water in the synthesis of calcined kaolin-based geopolymer. En: Applied Clay Science 43 (2), pág. 218–223. DOI: 10.1016/j.clay.2008.09.003.