

**UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ**

**Colegio de Ciencias e Ingenierías**

**Desarrollo de Geopolímeros y Análisis de sus Propiedades  
Mecánicas para Evaluar su Viabilidad en la Construcción en el  
Ecuador**

**José Ignacio Arroyo Cifuentes**

**Ingeniería Civil**

Trabajo de fin de carrera presentado como requisito  
para la obtención del título de  
Ingeniero Civil

Quito, 18 de diciembre de 2024

# **Universidad San Francisco de Quito USFQ**

**Colegio de Ciencias e Ingenierías**

## **HOJA DE CALIFICACIÓN DE TRABAJO DE FIN DE CARRERA**

**Desarrollo de Geopolímeros y Análisis de sus Propiedades Mecánicas para  
Evaluar su Viabilidad en la Construcción en el Ecuador**

**José Ignacio Arroyo Cifuentes**

**Nombre del profesor, Título académico**

**Francisco Játiva, PhD**

Quito, 18 de diciembre de 2024

## © DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en la Ley Orgánica de Educación Superior del Ecuador.

Nombres y apellidos: José Ignacio Arroyo Cifuentes

Código: 00203796

Cédula de identidad: 1717544215

Lugar y fecha: Quito, 18 de diciembre de 2024

## **ACLARACIÓN PARA PUBLICACIÓN**

**Nota:** El presente trabajo, en su totalidad o cualquiera de sus partes, no debe ser considerado como una publicación, incluso a pesar de estar disponible sin restricciones a través de un repositorio institucional. Esta declaración se alinea con las prácticas y recomendaciones presentadas por el Committee on Publication Ethics COPE descritas por Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing, disponible en <http://bit.ly/COPETHeses>.

## **UNPUBLISHED DOCUMENT**

**Note:** The following capstone project is available through Universidad San Francisco de Quito USFQ institutional repository. Nonetheless, this project – in whole or in part – should not be considered a publication. This statement follows the recommendations presented by the Committee on Publication Ethics COPE described by Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing available on <http://bit.ly/COPETHeses>.

## RESUMEN

La síntesis de geopolímeros implica el uso de materiales ricos en sílice y aluminio para formar redes tridimensionales de aluminosilicatos, que otorgan propiedades mecánicas y durabilidad superiores. En esta investigación, se emplearon ceniza volante y humo de sílice como precursores. La ceniza volante, rica en ambos elementos, facilitó la formación de una matriz densa y resistente, mientras que el humo de sílice, con bajo contenido de aluminio, mostró limitaciones en estabilidad estructural y resistencia. Se utilizó una solución alcalina de hidróxido de sodio (NaOH) de 10 M con una relación solución/precursores de 0.5. La mezcla fue moldeada en especímenes cúbicos, L= 5cm y curada bajo diferentes condiciones controladas: i) En seco y ii) En alta humedad, ambas realizadas a 80 °C, durante 1 y 24 horas. Los resultados indicaron que el curado en condiciones húmedas y por tiempos prolongados promovió una mayor densidad y resistencia a la compresión, particularmente en los geopolímeros de ceniza volante, que mostraron baja porosidad y una estructura compacta. Por el contrario, los geopolímeros a base de humo de sílice presentaron porosidad y una estructura menos estable, afectando su desempeño mecánico. Estos hallazgos sugieren que los geopolímeros de ceniza volante son una alternativa viable para aplicaciones de construcción, debido a su resistencia y durabilidad en condiciones adversas.

**Palabras clave:** Geopolímeros, ceniza volante, humo de sílice, activación alcalina, polimerización, hidróxido de sodio, resistencia a la compresión.

## ABSTRACT

The synthesis of geopolymers involves the use of materials rich in silica and aluminum to form three-dimensional networks of aluminosilicates, which provide superior mechanical properties and durability. In this research, fly ash and silica fume were used as precursors. The fly ash, rich in both elements, facilitated the formation of a dense and strong matrix, while the silica fume, with low aluminum content, showed limitations in structural stability and strength. A 10 M sodium hydroxide (NaOH) alkaline solution was used with a solution/precursor ratio of 0.5. The mixture was molded into cubic specimens, L=5 cm, and cured under different controlled conditions: i) in dry conditions and ii) in high humidity, both conducted at 80°C for 1 and 24 hours. The results indicated that curing under humid conditions and for extended periods promoted higher density and compressive strength, particularly in the fly ash-based geopolymers, which showed low porosity and a compact structure. In contrast, the silica fume-based geopolymers exhibited porosity and a less stable structure, affecting their mechanical performance. These findings suggest that fly ash-based geopolymers are a viable alternative for construction applications due to their strength and durability under adverse conditions.

Keywords: Geopolymers, fly ash, silica fume, alkaline activation, polymerization, sodium hydroxide, compressive strength.

Introducción .....	10
Antecedentes .....	10
Justificación .....	11
Objetivos .....	12
Objetivo Principal .....	12
Objetivos Específicos.....	12
Desarrollo del Tema.....	12
Metodología .....	12
Resultados .....	14
Síntesis y Caracterización de Geopolímeros Basados en Humo de Sílice y Ceniza Volante como Precursores .....	14
Curado Geopolímeros .....	16
Ensayo Resistencia a la Compresión de Geopolímero Precursor Humo de Sílice .....	19
Ensayo Resistencia a la Compresión de Geopolímero Precursor Ceniza Volante .....	21
Ensayo Resistencia a la Flexión de Geopolímero Precursor Ceniza Volante.....	23
Módulo Dinámico Geopolímeros .....	24
Módulo Dinámico de Geopolímero Precursor Ceniza Volante .....	26
Módulo Dinámico de Geopolímero Precursor Humo de Sílice .....	29
Análisis de la Aplicación de Geopolímeros en la Construcción en el Ecuador.....	32
Conclusiones .....	34
Referencias bibliográficas.....	35
Anexo A: Configuración curado en humedad a 80°C .....	39
Anexo B: Humo de Sílice .....	39
Anexo C: Ceniza Volante .....	40
Anexo D: Ensayo flexión Geopolímero Ceniza Volante curado húmedo por 24 horas a 80°C .....	40
Anexo e: Valor $\Omega_0$ .....	41

## Índice de Figuras

Figura 1: Geopolímero Precursor Humo de Sílice.....	16
Figura 2: Porosidad Geopolímero Precursor Humo de Sílice.....	16
Figura 3: Geopolímero Precursor Ceniza Volante.....	16
Figura 4: Porosidad Geopolímero Precursor Ceniza Volante.....	16
Figura 5: Geopolímero Precursor Humo de Sílice Curado Seco a 80°C en 24 Horas.....	18
Figura 6: Geopolímero Precursor Humo de Sílice Curado Seco a 80°C en 1 Hora.....	18
Figura 7: Geopolímero Precursor Humo de Sílice Curado Húmedo a 80°C a 24 Horas.....	18
Figura 8: Geopolímero Precursor Humo de Sílice Curado Húmedo a 80°C a 1 Hora.....	18
Figura 9: Resistencia a la Compresión y Densidad Geopolímero - Humo de Sílice.....	20
Figura 10: Resistencia a la Compresión y Densidad Geopolímero - Ceniza Volante.....	22
Figura 11: Comparación de Resistencia a la Flexión.....	24
Figura 12: Frecuencia de Geopolímero de Ceniza Volante Curado Húmedo 1 Hora vs 24 Horas .....	27
Figura 13: Frecuencia de Geopolímero de Ceniza Volante Curado Seco 1 Hora vs 24 Horas	28
Figura 14: Módulo Dinámico de Geopolímeros de Ceniza Volante Según Tiempo de Curado .....	29
Figura 15: Frecuencia de Geopolímero de Humo de Sílice Curado Húmedo 1 Hora vs 24 Horas .....	30
Figura 16: Frecuencia de Geopolímero de Humo de Sílice Curado Seco 1 Hora vs 24 Horas	31
Figura 17: Módulo Dinámico de Geopolímeros de Humo de Sílice Según Tiempo de Curado .....	32

## Índice de tablas

Tabla 1: Composición Ceniza Volante .....	15
Tabla 2: Tiempos de Curado, Temperatura y Características de Curado .....	17
Tabla 3: Resistencia a la Compresión Geopolímero Humo de Sílice .....	20
Tabla 4: Resultados Resistencia a la Compresión Geopolímeros Ceniza Volante .....	22
Tabla 5: Resultados Resistencia a al Flexión.....	23
Tabla 6: Módulo Dinámico de Geopolímeros de Ceniza Volante.....	29
Tabla 7: Módulo Dinámico de Geopolímeros de Humo de Sílice.....	32

## **INTRODUCCIÓN**

### ***Antecedentes***

Joseph Davidovits introdujo el término de "geopolímero" en 1978, refiriéndose a materiales inorgánicos caracterizados por estructuras tridimensionales de aluminosilicato, como Poly(sialate), Poly(sialate-siloxo) y Poly(sialate-disiloxo). Estas estructuras consisten en redes de enlace aluminosilicato que proporcionan a los geopolímeros propiedades destacadas de resistencia térmica y mecánica, (Davidovits, 1991). La investigación arqueológica ha sugerido que las propiedades geopoliméricas ya eran conocidas en la antigüedad: algunos estudios indican que los egipcios utilizaron morteros con características geopoliméricas en la construcción de las pirámides, donde los materiales ricos en sílice y aluminio, como la caliza y la arcilla, se combinaron para otorgar a estas estructuras durabilidad y resistencia excepcionales (Davidovits, 1994). Según Davidovits este uso refleja una "comprensión intuitiva de las propiedades químicas de los materiales que estaban utilizando".

El análisis de los materiales antiguos ha contribuido a profundizar la comprensión moderna de los geopolímeros, destacando su potencial como alternativa sostenible al cemento Portland. En términos de propiedades de desempeño, diversos estudios han demostrado que los geopolímeros poseen resistencia superior al agua, al fuego y a ambientes agresivos, lo cual los posiciona como una opción viable y sostenible en aplicaciones de construcción (Provis & van Deventer, 2014). A diferencia del cemento Portland, la producción de geopolímeros puede reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> entre un 40 % y un 80 %, favoreciendo su uso como material de bajo impacto ambiental (Provis & van Deventer, 2014). Hoy en día, los geopolímeros se emplean en diversas estructuras modernas, y su capacidad para soportar condiciones extremas, como altas temperaturas y ambientes altamente corrosivos, ha superado en rendimiento al

cemento Portland en infraestructuras que enfrentan condiciones adversas (Provis & Bernal, 2019).

No obstante, el uso de geopolímeros también presenta desafíos, como su dependencia de la disponibilidad geográfica de materias primas como las cenizas volantes, metacaolín y la escoria de alto horno, las cuales no están tan ampliamente distribuidas como los recursos para la fabricación de cemento Portland (Provis et al., 2014). Además, el uso de activadores alcalinos como el hidróxido de sodio es restringido en algunos países debido a regulaciones asociadas a la fabricación de sustancias controladas, lo que limita la expansión de los geopolímeros en ciertas regiones (Provis et al., 2014; van Deventer et al., 2006).

### ***Justificación***

El estudio de los geopolímeros en Ecuador está en una fase inicial, lo cual representa una oportunidad significativa para desarrollar alternativas sostenibles en la construcción. En Ecuador, la producción de cemento se basa principalmente en el “cemento por desempeño,” que incorpora puzolanas naturales como material suplementario, reduciendo la cantidad de clínker en el cemento y, por ende, las emisiones de CO<sub>2</sub>.

La industria cementera en Ecuador produce aproximadamente 2.8 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> anualmente, representando el 7 % de las emisiones nacionales de carbono. Sin embargo, con el uso de puzolanas, se ha logrado reducir el contenido de clínker, disminuyendo así las emisiones hasta en un 9 % por debajo del promedio mundial para esta industria (Energía Estratégica, 2024; SciELO, 2020). A nivel global, se estima que el sector del cemento es responsable de aproximadamente el 8 % de las emisiones de CO<sub>2</sub>, lo que equivale a alrededor de 2900 millones de toneladas anuales (El Confidencial, 2022). Estas emisiones provienen principalmente del proceso de calcinación de la piedra caliza, que

representa el 60 % de las emisiones de la industria, y del uso de combustibles fósiles, que contribuye con el 40 % restante (CORDIS, 2023).

## ***Objetivos***

### **Objetivo Principal**

- Diseñar y desarrollar una mezcla de geopolímeros, caracterizando sus propiedades mecánicas i.e. Resistencia a la compresión, Resistencia a la flexión y Módulo dinámico.

### **Objetivos Específicos**

- Formular y caracterizar mezclas de geopolímeros utilizando materias primas i.e. humo de sílice y ceniza volante, optimizando la relación de los componentes para maximizar su desempeño mecánico.
- Realizar ensayos experimentales para evaluar las propiedades mecánicas de geopolímeros, incluyendo: Resistencia a la compresión, flexión y módulo dinámico.
- Análisis de viabilidad para la aplicación de geopolímeros en la construcción en el Ecuador.

## ***DESARROLLO DEL TEMA***

### ***Metodología***

En esta investigación, se sintetizan dos tipos de mezclas de geopolímeros empleando distintos precursores de aluminio y sílice: i) humo de sílice y ii) ceniza volante. El proceso inicia con la preparación de la solución alcalina, en la que se disuelve hidróxido de sodio (NaOH) en agua hasta alcanzar una concentración de 10 M. Es esencial que la solución alcance la temperatura ambiente antes de su uso para evitar reacciones excesivamente exotérmicas, que podrían comprometer la integridad del proceso.

Posteriormente, se procede a la dosificación y mezcla de los precursores. En primer lugar, se utiliza humo de sílice, que aporta un alto contenido de sílice, aunque carece de aluminio. En segundo lugar, se emplea ceniza volante, la cual actúa como fuente tanto de sílice como de aluminio en proporciones adecuadas para la formación del gel geopolimérico (Provis & van Deventer, 2009). Para ambas mezclas, se establece una relación de solución/precursores de 0.5, lo cual garantiza una trabajabilidad y permite una distribución homogénea en los moldes.

La mezcla de la solución alcalina con los precursores se realiza de forma vigorosa para asegurar una disolución completa de las partículas y una pasta homogénea. Esta fase es fundamental para lograr una reacción completa entre el agente alcalino y los precursores, permitiendo que los iones liberados se reorganicen y formen la red geopolimérica. Según van Deventer et al. (2007), este proceso de disolución y reorientación es clave para la estabilidad estructural del material final y su resistencia a factores externos.

Una vez obtenida la mezcla, se procede al vertido de la pasta geopolimérica en moldes con las dimensiones adecuadas para las pruebas planificadas bajo condiciones controladas. Se emplean cubos de  $L=5\text{cm}$  (2") para los ensayos de compresión, viguetas prismáticas de (  $16 \times 4 \times 4 \text{ cm}$  ) para los ensayos de flexión, y discos,  $\phi=7.6\text{cm}$  (3"),  $e=2.54\text{cm}$  (1") para pruebas de módulo dinámico. La compactación y vibrado de la pasta en los moldes es esencial para eliminar burbujas de aire y asegurar una estructura densa y uniforme, garantizando la integridad estructural en las pruebas posteriores (Davidovits, 1991).

Los especímenes se someten a un proceso de curado en condiciones controladas y bajo diferentes tratamientos. En este estudio, el curado se realiza en dos condiciones: i) curado seco en un horno a  $80^{\circ}\text{C}$  durante 1 hora y 24 horas, y ii) curado húmedo, en el que los especímenes se mantienen en un ambiente controlado de humedad a  $80^{\circ}\text{C}$  también durante 1 hora y 24 horas. Estas variaciones en el tiempo y el ambiente de curado permiten evaluar el efecto de las

condiciones de curado sobre la reacción de geopolimerización y la formación de una estructura amorfa y resistente (van Deventer et al., 2007). Tras el proceso de curado, los especímenes se dejan en reposo a temperatura ambiente durante un período adicional de 7 días para completar su maduración, favoreciendo una estructura interna más estable y duradera.

## **RESULTADOS**

### ***Síntesis y Caracterización de Geopolímeros Basados en Humo de Sílice y Ceniza Volante como Precursores***

La mezcla que emplea únicamente humo de sílice presenta limitaciones significativas en términos de estabilidad estructural y resistencia mecánica. A diferencia de la ceniza volante, el humo de sílice carece de contenido de aluminio, elemento esencial para la formación de una red de tetraedros de Si-O-Al, la cual es clave para la estabilidad y resistencia mecánica en los geopolímeros. Esta falta de aluminio restringe la capacidad de entrecruzamiento en la red polimérica, generando una estructura menos densa y más porosa, lo que dificulta la densificación de la matriz y reduce la estabilidad de la reacción de polimerización (Provis & van Deventer, 2009).

Añadiendo que el humo de sílice presenta limitaciones en el control de la expansión de volumen del geopolímero. Este efecto se observa en la formación de espacios porosos y microfisuras que pueden afectar la resistencia a largo plazo del material, especialmente en condiciones de variación de temperatura y humedad (Park et al., 2022). Además, la falta de aluminio en el humo de sílice provoca que la matriz formada sea más frágil, con una estabilidad química limitada, lo cual compromete su durabilidad y aplicabilidad en entornos exigentes (Davidovits, 1991; van Deventer et al., 2007).

\* Véase Anexo B para imágenes de humo de sílice empleado.

En contraste, al utilizar ceniza volante que tiene una relación sílice/aluminio de 3.95, esta relación fue obtenida acorde al certificado químico de análisis dado por el proveedor del material utilizado (Ver Tabla 1). La relación usada facilita la formación de una red tridimensional de tetraedros de (Si-O-Al). Esta red estructuralmente densa y resistente que optimiza la reacción de polimerización, contribuyendo a una mayor durabilidad y resistencia del material final (Provis & Bernal, 2014; Rattanasak & Chindaprasirt, 2009). El bajo contenido de calcio en la ceniza volante es particularmente beneficioso, ya que evita la formación de hidratos de calcio, los cuales en otros materiales pueden dar lugar a una estructura menos estable y más susceptible a la degradación (Duxson et al., 2007). En cambio, la ceniza volante permite la formación de una estructura amorfa similar a la de las zeolitas, proporcionando una excelente estabilidad química y térmica, lo cual es ideal para aplicaciones en condiciones ambientales extremas (Provis & van Deventer, 2014; Duxson et al., 2007).

\* Véase Anexo C para imágenes de ceniza volante empleado.

A continuación, se presentan la composición de la ceniza volante utilizada

Tabla 1: Composición Ceniza Volante

### Certificate of Analysis

<b>Product Name:</b>	Industrial Fly Ash	
<b>Test</b>	<b>Specification</b>	<b>Result</b>
SiO <sub>2</sub> (%)	66-71	69.35
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	16-21	17.52
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	1.55-6.22	1.52
K <sub>2</sub> O (%)	1.1-2.5	1.5
CaO (%)	1.54-2.2	1.74
MgO (%)	0.6-1.6	1.05



Figura 1: Geopolímero  
Precursor Humo de Sílice



Figura 2: Porosidad  
Geopolímero Precursor Humo  
de Sílice



Figura 3: Geopolímero  
Precursor Ceniza Volante

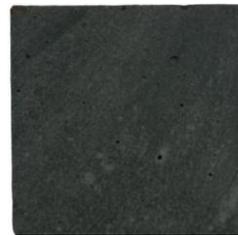


Figura 4: Porosidad  
Geopolímero Precursor  
Ceniza Volante

### ***Curado Geopolímeros***

El proceso de curado es fundamental para optimizar las propiedades mecánicas y la estabilidad de la matriz geopolimérica. Como señala Davidovits (1991), el curado a temperaturas elevadas, generalmente entre 60 °C y 85 °C, acelera la polimerización y fomenta la formación de una red tridimensional de aluminosilicatos, que da como resultado una matriz más densa y con mayor resistencia a la compresión. Provis y van Deventer (2014) también destacan que la durabilidad y resistencia de los geopolímeros están directamente relacionadas con el tiempo y la temperatura de curado; un curado inadecuado puede producir una estructura incompleta o débil, mientras que un curado óptimo maximiza las propiedades mecánicas y químicas del material, haciéndolo más resistente a ambientes agresivos (Duxson et al., 2007).

En general, los geopolímeros se curan a temperaturas elevadas (60-85 °C) durante periodos que pueden variar desde horas hasta días, dependiendo de la composición y las

propiedades buscadas (Davidovits, 1991). Este tratamiento térmico promueve una reacción de polimerización más rápida y eficiente. En esta investigación, los especímenes de geopolímero fueron curados a 80 °C durante 1 y 24 horas en condiciones secas y húmedas, para evaluar cómo varían sus propiedades mecánicas y químicas en función del tiempo y la presencia de humedad en el proceso de curado.

\* Véase Anexo A para ver condiciones de curado húmedo

Temperaturas y tiempos de curado según Davidovits (1991), Park et al. (2022) y Rattanasak & Chindaprasirt (2009).

Tabla 2: Tiempos de Curado, Temperatura y Características de Curado

Temperatura de Curado °C	Duración de Curado	Características de Curado
60-85	24-48 horas	Las temperaturas elevadas aceleran la polimerización y fortalecen las redes de aluminosilicatos.
80	1-24 horas	Examina el impacto del tiempo de curado y la humedad en la estabilidad de la matriz y la resistencia a la expansión.
65	48 horas	Curado a 65°C fue suficiente para alcanzar alta resistencia en geopolímeros a base de ceniza volante.

Estudios recientes han demostrado que el humo de sílice puede influir en la expansión de volumen y la estabilidad estructural de los geopolímeros especialmente cuando se considera la relación molar silicio/aluminio (S/A) (Park et al., 2022). A continuación, se presentan imágenes que muestran cómo el tiempo y la temperatura de curado afectan al geopolímero con precursor de humo de sílice.



Figura 5: Geopolímero Precursor  
Humo de Sílice Curado Seco a  
80°C en 24 Horas



Figura 6: Geopolímero Precursor  
Humo de Sílice Curado Seco a  
80°C en 1 Hora



Figura 7: Geopolímero Precursor  
Humo de Sílice Curado Húmedo  
a 80°C a 24 Horas



Figura 8: Geopolímero Precursor  
Humo de Sílice Curado Húmedo a  
80°C a 1 Hora

Estudios indican que los geopolímeros formulados con ceniza volante desarrollan una matriz densa de aluminosilicatos que es altamente estable, lo cual minimiza la expansión volumétrica y mejora la durabilidad en ambientes agresivos (Davidovits, 1991).

Se observó que los geopolímeros formulados con ceniza volante como precursor no experimentan expansión, independientemente del tipo de curado o del tiempo de exposición, debido a la estabilidad de su reacción química. Además, la presencia de fases secundarias, como la mullita, un mineral aluminosilicatado formado por la descomposición y transformación térmica de materiales ricos en sílice y alúmina, y el cuarzo, con una estructura cristalina altamente resistente a temperaturas elevadas, contribuye a la rigidez estructural del material. Esta rigidez ayuda a reducir aún más la posibilidad de expansión bajo condiciones de alta humedad y temperaturas elevadas (Duxson et al., 2007). Por lo tanto, los geopolímeros basados en ceniza volante no mostraron expansión, lo que mejora significativamente su resistencia a la compresión.

### ***Ensayo Resistencia a la Compresión de Geopolímero Precursor Humo de Sílice***

Los resultados de los ensayos reflejan una limitación clave en los geopolímeros de humo de sílice: la falta de aluminio en la composición impide la formación de una red aluminosilicato densa y estable, lo que da lugar a una estructura porosa y con baja resistencia a la compresión. La literatura indica que los geopolímeros requieren de una cantidad balanceada de silicio y aluminio para formar una red tridimensional estable de  $[\text{SiO}_4]$  y  $[\text{AlO}_4]$  en su estructura, lo cual contribuye a una matriz compacta y resistente (Davidovits, 1991).

La ausencia de aluminio en los geopolímeros a base de humo de sílice afecta directamente la capacidad de polimerización, limitando la cohesión de la matriz y resultando en una alta porosidad. Provis et al. (2009) explican que, sin suficiente aluminio, el humo de sílice no puede formar una estructura densa, dejando vacíos y poros que debilitan la resistencia a la compresión del material. Esto se observa en los resultados, donde la baja densidad y la alta porosidad están correlacionadas con una resistencia a la compresión inferior a la esperada.

A continuación, se presentan los resultados de resistencia a la compresión.

Tabla 3: Resistencia a la Compresión Geopolímero Humo de Sílice

Resistencia a la Compresión Geopolímero Humo de Sílice			
Condición de Curado	Tiempo de Curado	Resistencia (MPa)	Desviación
Seco 80°C	1 hora	0.291	0.016
Seco 80°C	24 horas	1.021	0.013
Húmedo 80°C	1 hora	0.469	0.016
Húmedo 80°C	24 horas	1.596	0.103

Se presenta la correlación entre la densidad y la resistencia a la compresión, demostrando cómo estas propiedades se ven afectadas por la falta de una estructura densa en los geopolímeros de humo de sílice.

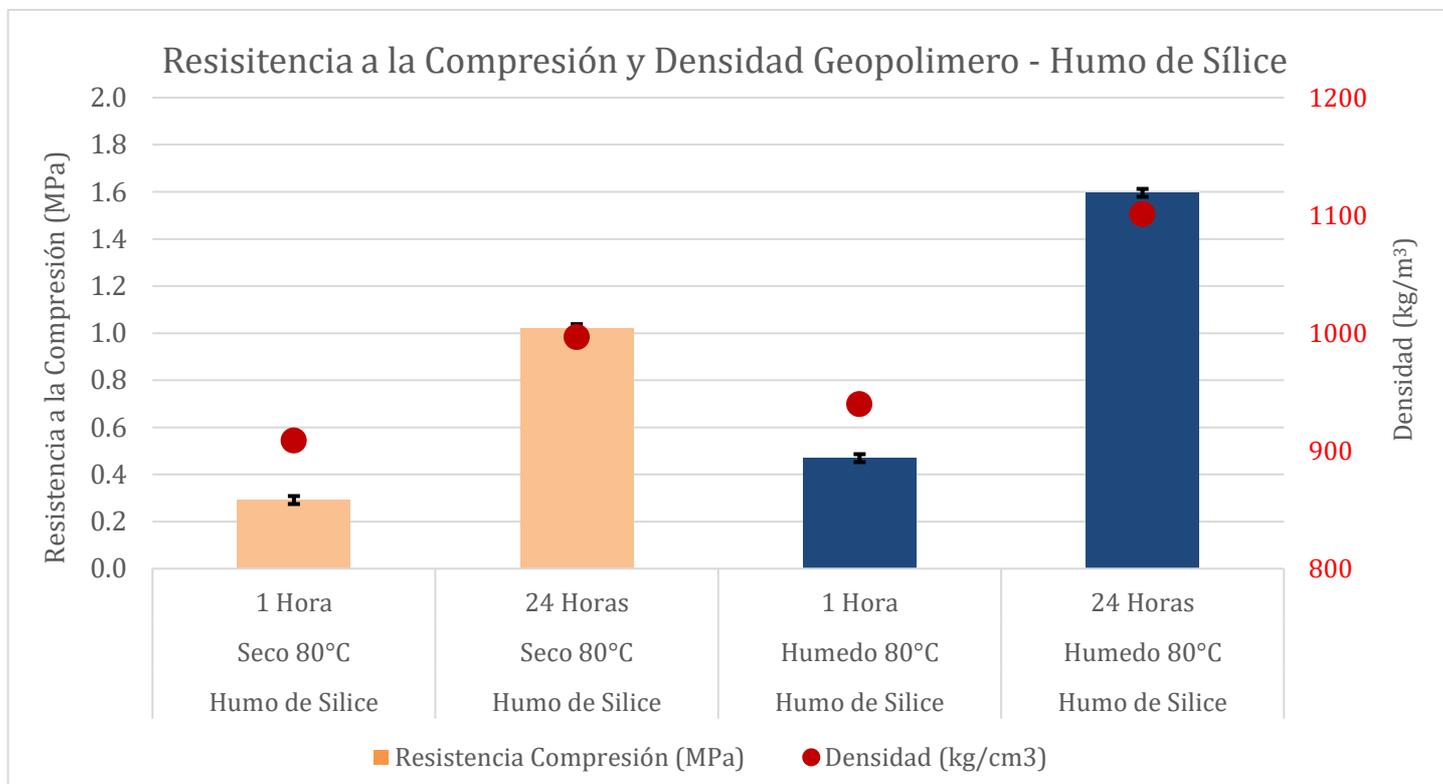


Figura 9: Resistencia a la Compresión y Densidad Geopolímero - Humo de Sílice

El análisis de Park et al. (2022) sobre los geopolímeros sin suficiente aluminio señala que estas estructuras tienden a expandirse y a crear más poros en el material, comprometiendo su integridad estructural y, en consecuencia, su resistencia mecánica. Así, los datos de resistencia a la compresión reflejan que la falta de densidad y la porosidad son factores

determinantes en la baja resistencia obtenida, dado que los vacíos en la red del geopolímero reducen su capacidad de soportar cargas. En resumen, la ausencia de aluminio en el humo de sílice impide la creación de una red resistente, resultando en un geopolímero poroso y de baja densidad que compromete sus propiedades mecánicas.

### ***Ensayo Resistencia a la Compresión de Geopolímero Precursor Ceniza Volante***

Los geopolímeros basados en ceniza volante son conocidos por su estabilidad estructural y alta densidad, lo que contribuye a una baja porosidad en la matriz y a una excelente resistencia a la compresión. La estabilidad estructural de los geopolímeros de ceniza volante permite que los vacíos sean mínimos, resultando en una estructura compacta que maximiza la resistencia a la compresión (Castillo et al., 2021).

La resistencia a la compresión obtenida tras 1 hora de curado en condiciones secas es considerablemente mayor que la observada en condiciones húmedas. Esta variación se debe a que, en el curado seco, la ausencia de humedad limita la formación de microgrietas asociadas a la rápida evaporación de agua, lo que permite una estructura inicial más compacta. Según Castillo et al. (2021), la presencia de agua en etapas tempranas puede retrasar el desarrollo de resistencia, ya que produce una mayor porosidad y disminuye la cohesión de la matriz en las primeras etapas de curado

Por otro lado, al extender el tiempo de curado a 24 horas, la diferencia entre los resultados de curado en condiciones secas y húmedas se reduce significativamente. Esto se debe a que el tiempo prolongado permite una mayor estabilidad y cohesión en la estructura del geopolímero, independientemente de la condición de humedad. Wang et al. (2022) señalan que, en curados largos, la humedad ayuda a consolidar una estructura más densa, pero el efecto ya no es tan marcado, ya que la polimerización y densificación de la matriz alcanzan una estabilidad similar en ambas condiciones.

A continuación, se presentan los resultados de resistencia a la compresión.

Tabla 4: Resultados Resistencia a la Compresión Geopolímeros Ceniza Volante

Resistencia a la Compresión Ceniza Volante			
Condición de Curado	Tiempo de Curado	Resistencia (MPa)	Desviación
Seco 80°C	1 hora	15.823	1.735
Seco 80°C	24 horas	32.851	5.041
Húmedo 80°C	1 hora	1.575	0.028
Húmedo 80°C	24 horas	33.374	3.018

Se muestran las densidades y resistencias a la compresión de los geopolímeros de ceniza volante bajo diferentes condiciones de curado y tiempos de exposición. Estos valores reflejan cómo las variaciones en el tiempo y las condiciones de curado afectan las propiedades mecánicas y la densidad, destacando la influencia del curado en seco y en húmedo para lograr una estructura más densa y resistente.

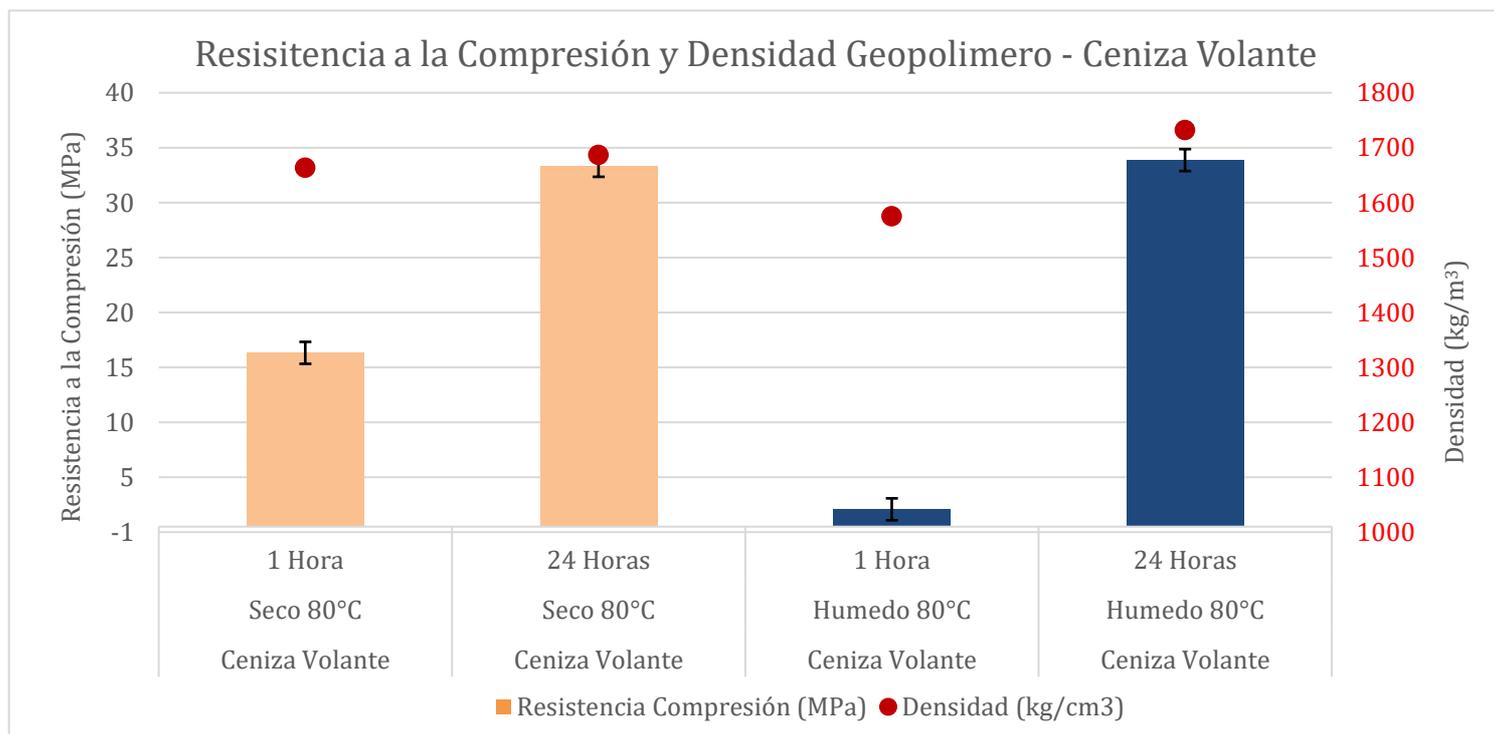


Figura 10: Resistencia a la Compresión y Densidad Geopolímero - Ceniza Volante

### ***Ensayo Resistencia a la Flexión de Geopolímero Precursor Ceniza Volante***

La resistencia a la flexión de los geopolímeros aumenta significativamente con el tipo de curado, especialmente cuando se emplean altas temperaturas. En condiciones de curado de entre 65 a 85 °C, los geopolímeros típicamente presentan resistencias a la flexión entre 6 y 10 MPa. Sin embargo, el curado térmico a temperaturas elevadas, como 1150 °C, puede incrementar este valor hasta 15 MPa. Este incremento se atribuye a la formación de fases cristalinas como albita y nefelina, las cuales densifican la matriz del material y mejoran sus propiedades mecánicas. Además, el tiempo de curado influye directamente en la evolución de la microestructura, promoviendo un entrelazado más eficiente de los productos de reacción y, por ende, una mayor capacidad de resistir fuerzas de flexión (Ng et al., 2022).

Se llevó a cabo un ensayo de flexión en un geopolímero de ceniza volante curado en condiciones húmedas durante 24 horas a 80 °C, seleccionado debido a su destacada resistencia a la compresión en comparación con otras formulaciones.

*\* Véase Anexo D para ver configuración de ensayo de flexión de geopolímero de ceniza volante curado húmedo durante 24 horas a 80°C.*

A continuación, se presentan los resultados del ensayo de flexión realizado.

Tabla 5: Resultados Resistencia a al Flexión

<b>Geopolímero Ceniza Volante Húmedo 24 Horas</b>	
<b>Resistencia (MPa)</b>	<b>Desviación</b>
9.98	0.13

Se muestra la comparación de la resistencia a la flexión de geopolímeros y pasta de cemento.

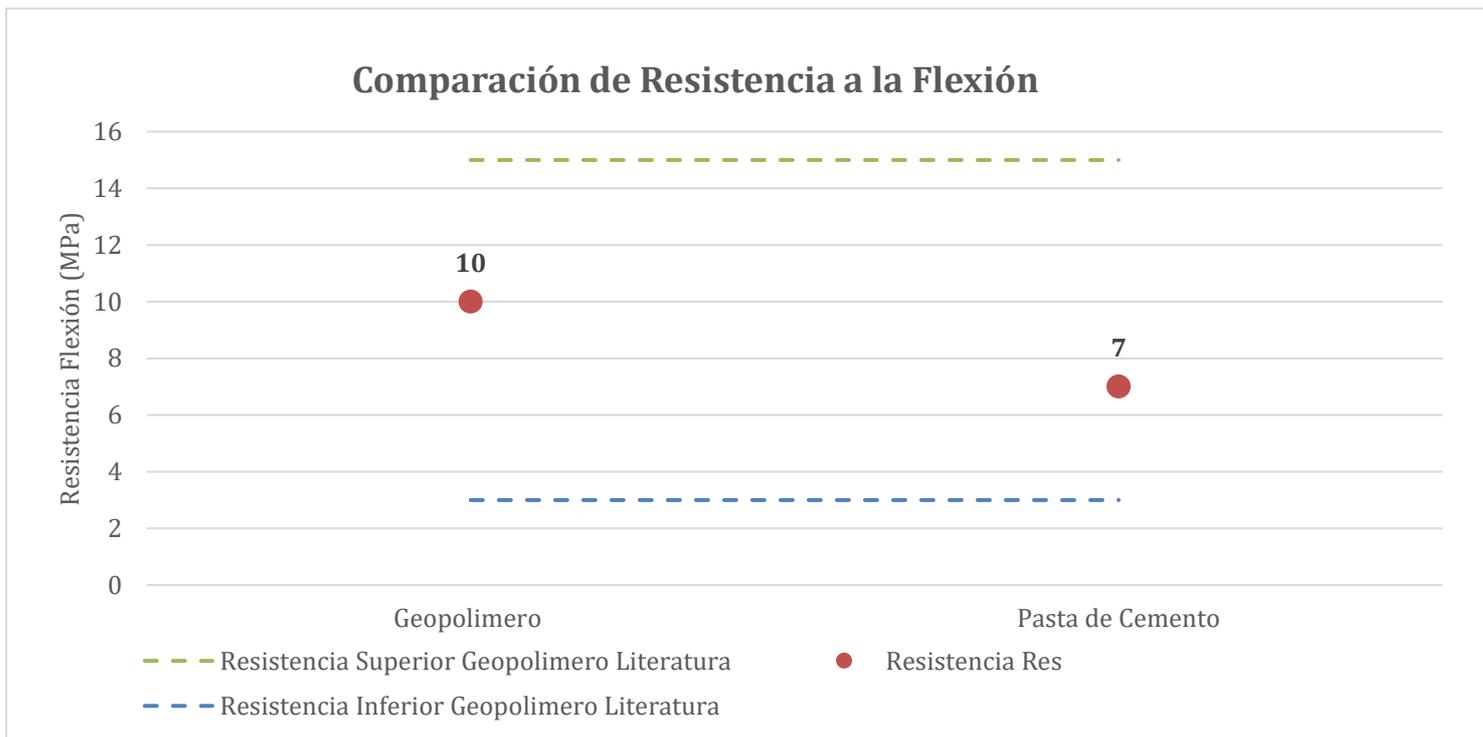


Figura 11: Comparación de Resistencia a la Flexión

### ***Módulo Dinámico Geopolímeros***

El módulo dinámico es una medida de la rigidez de un material bajo condiciones dinámicas, como vibraciones o propagación de ondas, y se utiliza para evaluar la capacidad del material para resistir deformaciones cuando está sometido a cargas oscilantes o impulsivas. Este parámetro, calculado generalmente mediante métodos no destructivos, refleja las propiedades elásticas globales del material (Rashetnia et al., 2016; Leming et al., 1998). En el contexto de los geopolímeros, el módulo dinámico es crucial para comprender cómo se comportan estos materiales bajo condiciones de carga dinámica, como vibraciones, impactos o cargas fluctuantes. Al igual que otros materiales de construcción, los geopolímeros pueden ser utilizados en estructuras expuestas a vibraciones, y su módulo dinámico es un indicador de cómo resisten las deformaciones elásticas y cómo disipan la energía bajo esfuerzos cíclicos. Según Hutchinson (1974), en su estudio de las vibraciones flexurales axisimétricas de placas

gruesas libres, el comportamiento dinámico de materiales con alta rigidez se ve influenciado por su capacidad para resistir deformaciones bajo cargas flexurales, lo que resulta relevante al evaluar el rendimiento de los geopolímeros bajo condiciones de vibración.

Para este estudio se realiza lo propuesto por Hutchinson (1974). Las vibraciones flexurales de placas gruesas sometidas a cargas radiales, utilizando un enfoque que consideraba tanto la rigidez del material como su comportamiento dinámico bajo diferentes frecuencias de vibración. Este tipo de análisis es importante para los geopolímeros, ya que proporciona una base para entender cómo las vibraciones afectarán sus propiedades mecánicas a lo largo del tiempo. El comportamiento vibratorio, influenciado por el módulo dinámico, está directamente relacionado con la rigidez de los geopolímeros, lo que determina su capacidad para resistir esfuerzos cíclicos y garantizar la estabilidad estructural en condiciones dinámicas.

El módulo dinámico se determina comúnmente utilizando técnicas basadas en la frecuencia fundamental de resonancia o vibraciones flexurales. En métodos como el de vibración flexural axisimétrica (AFV), se emplean discos de material sostenidos en condiciones "libres" de vibración. Un acelerómetro registra la respuesta del material tras un impacto controlado, y mediante un análisis de Fourier, se extrae la frecuencia resonante. A partir de esta, junto con las propiedades físicas del material (densidad y geometría), se calcula el módulo dinámico utilizando ecuaciones específicas. Estas técnicas son útiles para evaluar daños o deterioros progresivos en materiales como concreto o geopolímeros (Leming et al., 1998). Para calcular el módulo dinámico se utiliza la ecuación propuesta por Leming et al.

$$Ed = 2(1 + \nu)\rho \left[ \frac{\pi f d}{\Omega_0} \right]^2$$

Donde:

$\nu$ : Módulo de Poisson

$\rho$ : Densidad

$f$ : Frecuencia

$d$ : Diámetro

$\Omega_0$ : Relación Módulo Poisson y espesor

Para estos geopolímeros, el valor de  $\Omega_0$  se establece en 1.9, lo que permite calcular los siguientes módulos dinámicos.

*\* Véase ANEXO E para ver cómo se obtiene el valor de  $\Omega_0$*

La frecuencia juega un papel fundamental en la determinación del módulo dinámico, ya que este se calcula a partir de la frecuencia fundamental de resonancia, que refleja la rigidez global del material. Cambios en esta frecuencia pueden indicar variaciones en las propiedades mecánicas, como pérdida de rigidez debido a microgrietas o daño acumulado, o incluso modificaciones estructurales relacionadas con el envejecimiento del material. Además, en materiales no lineales, como geopolímeros y concretos, la frecuencia puede ser afectada por la evolución de la microestructura, lo que resalta su importancia como indicador del estado mecánico y estructural del material (Rashetnia et al., 2016; Leming et al., 1998).

### **Módulo Dinámico de Geopolímero Precursor Ceniza Volante**

Para determinar el módulo dinámico de este tipo de geopolímero se asume un módulo de Poisson de 0.225, ya que geopolímeros elaborados a partir de ceniza volante y una solución de hidróxido de sodio (NaOH) al 10% en masa, puede variar según las condiciones específicas de síntesis y curado, pero estudios relacionados indican que los geopolímeros basados en ceniza volante presentan módulos de Poisson en el rango de 0.20 a 0.25 (Hernández et al., 2017).

A continuación, se presenta la como frecuencia (Hz) de los geopolímeros varía dependiendo del tiempo y condiciones de curado.

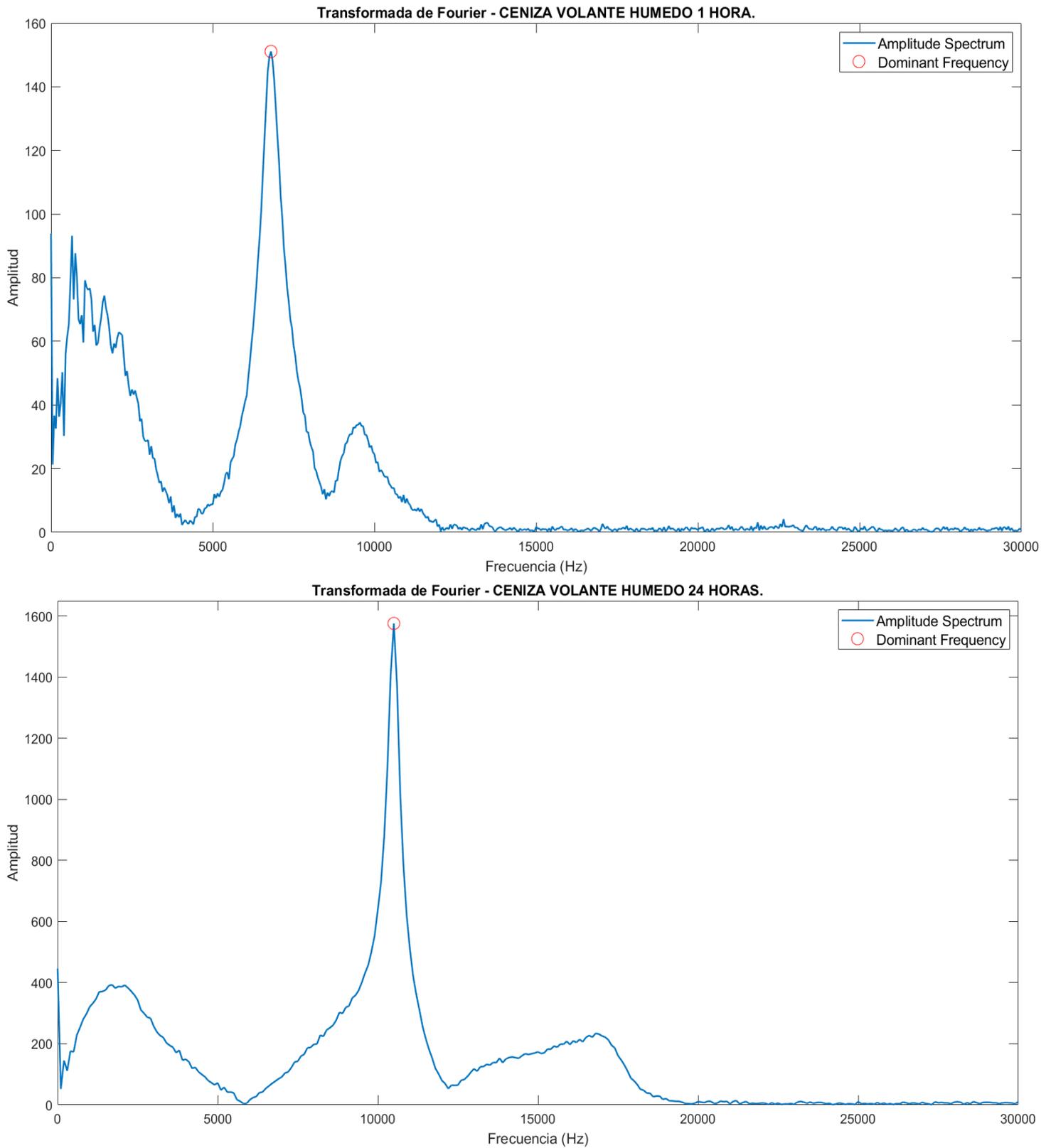


Figura 12: Frecuencia de Geopolímero de Ceniza Volante Curado Húmedo 1 Hora vs 24 Horas

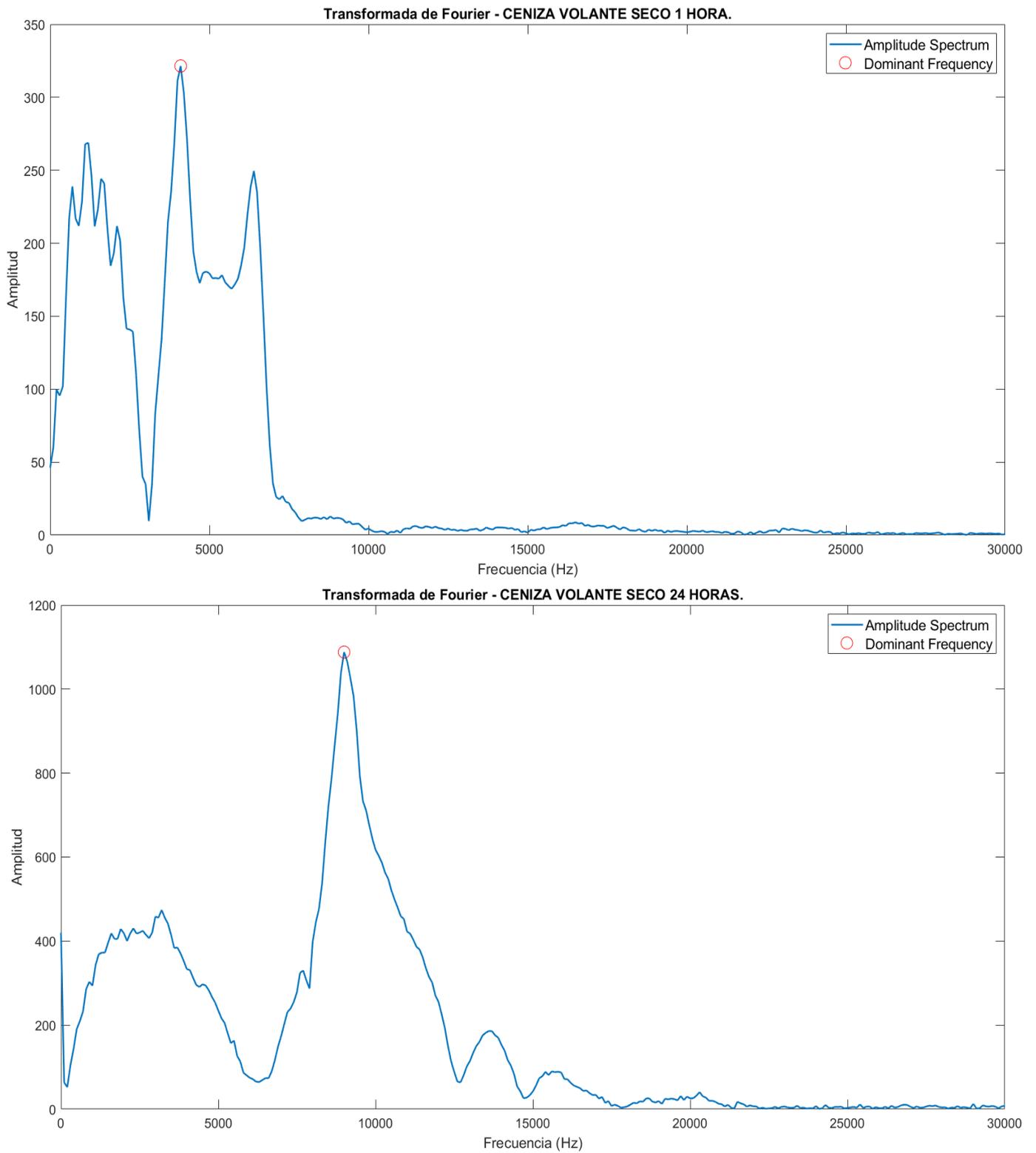


Figura 13: Frecuencia de Geopolímero de Ceniza Volante Curado Seco 1 Hora vs 24 Horas

Se puede evidenciar que el geopolímero de ceniza volante al poder formar una matriz densa sus frecuencias (Hz) tienen valores mayores a los geopolímeros de humo de sílice que presentan porosidad y microfisuras.

A continuación, se muestran los valores de módulo dinámico obtenidos.

Tabla 6: Módulo Dinámico de Geopolímeros de Ceniza Volante

Geopolímero Ceniza Volante Curado a 80°C		
Tipo de Curado	Módulo Dinámico (GPa)	Desviación
Húmedo 1 Hora	27.33	0.7
Húmedo 24 Horas	50.76	0.7
Seco 1 Hora	10.33	0.7
Seco 24 Horas	48.05	0.67

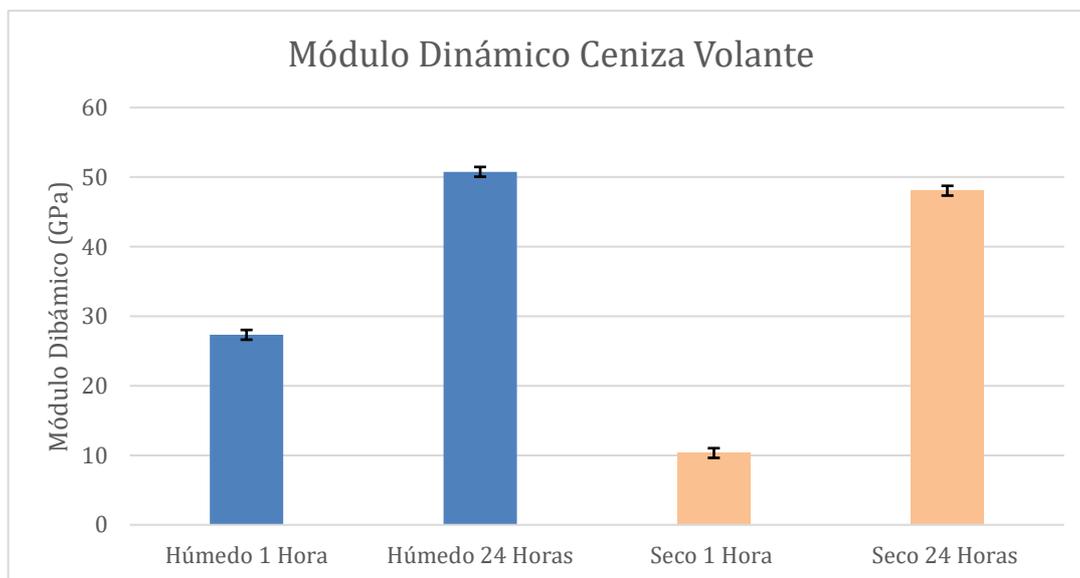


Figura 14: Módulo Dinámico de Geopolímeros de Ceniza Volante Según Tiempo de Curado

### Módulo Dinámico de Geopolímero Precursor Humo de Sílice

Para los geopolímeros de humo de sílice debido a que presentan una tasa de deformación alta se asume un módulo de Poisson de 0.35. A continuación, se presenta la como frecuencia (Hz) de los geopolímeros varía dependiendo del tiempo y condiciones de curado.

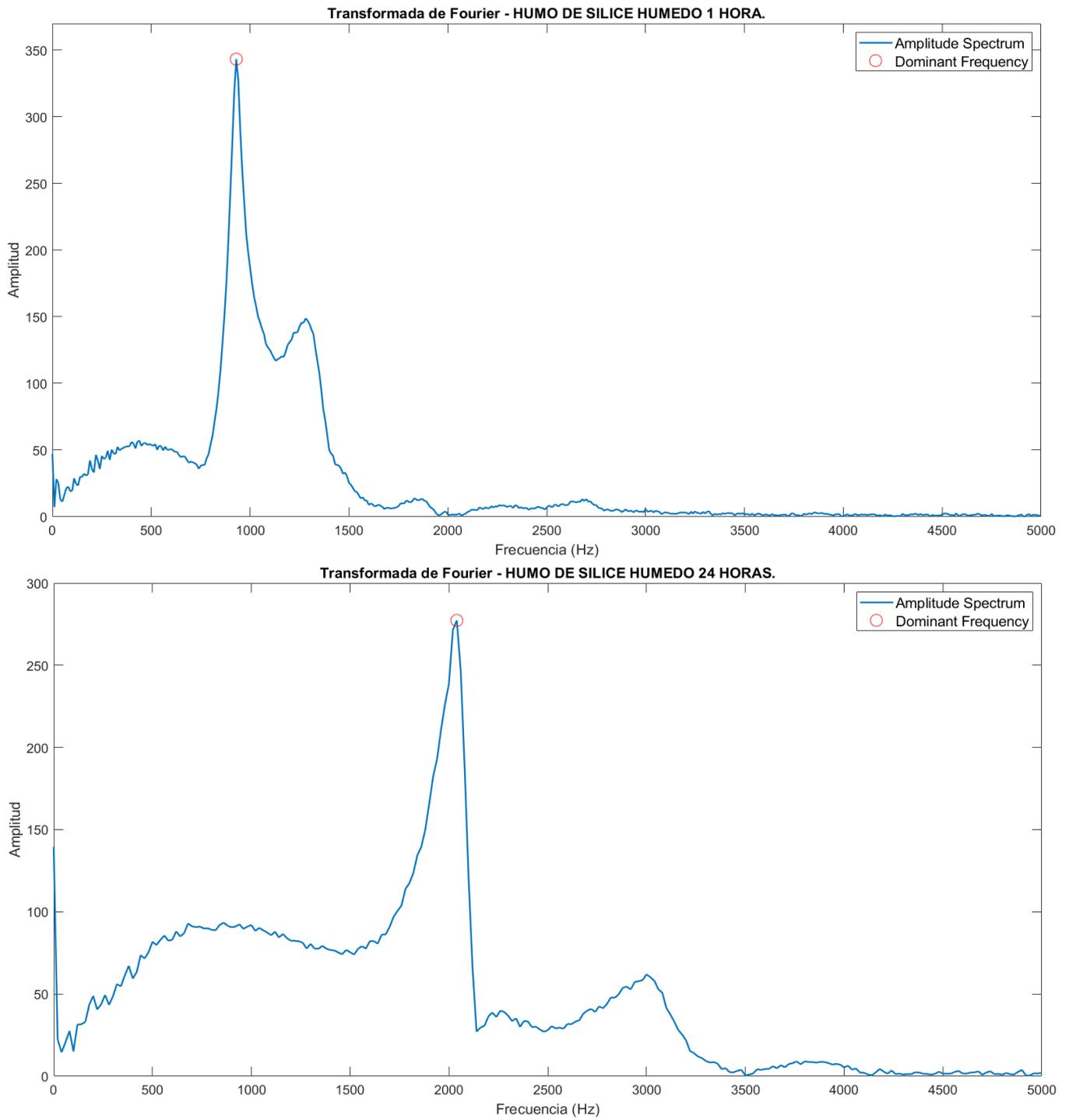


Figura 15: Frecuencia de Geopolímero de Humo de Sílice Curado Húmedo 1 Hora vs 24 Horas

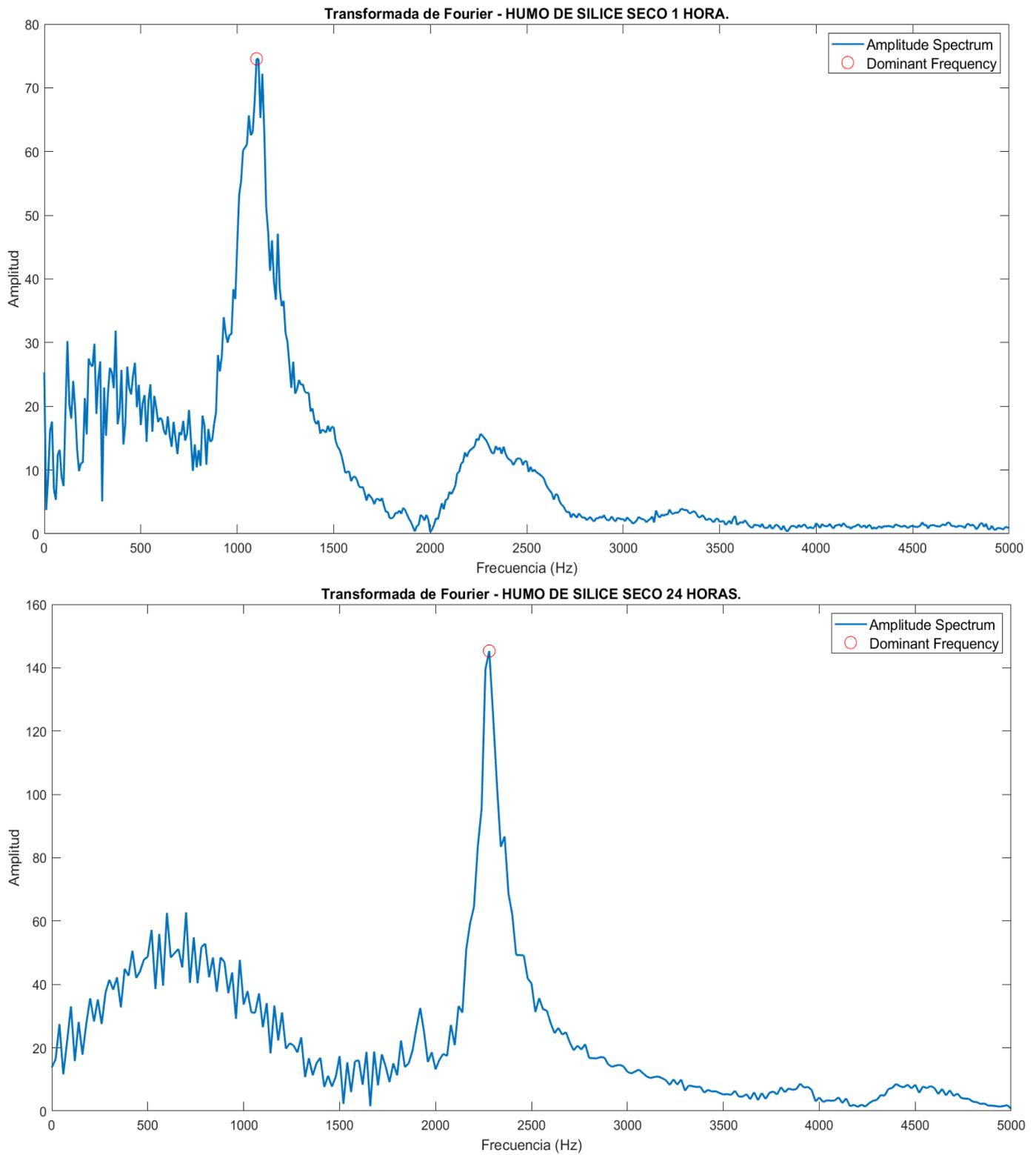


Figura 16: Frecuencia de Geopolímero de Humo de Sílice Curado Seco 1 Hora vs 24 Horas

A diferencia de los geopolímeros de ceniza volante, los geopolímeros de humo de sílice presentan frecuencias más bajas, lo cual se atribuye a su matriz más porosa y la presencia de microfisuras internas. Estas características afectan directamente al módulo dinámico, reduciendo su rigidez global y capacidad de transmitir vibraciones de manera eficiente.

Se procede a mostrar los valores de módulo dinámico obtenidos.

Tabla 7: Módulo Dinámico de Geopolímeros de Humo de Sílice

Geopolímero Humo de Sílice Curado a 80°C		
Tipo de Curado	Módulo Dinámico (GPa)	Desviación
Húmedo 1 Hora	0.49	0.1
Húmedo 24 Horas	1.77	0.1
Seco 1 Hora	0.59	0.1
Seco 24 Horas	2.16	0.09

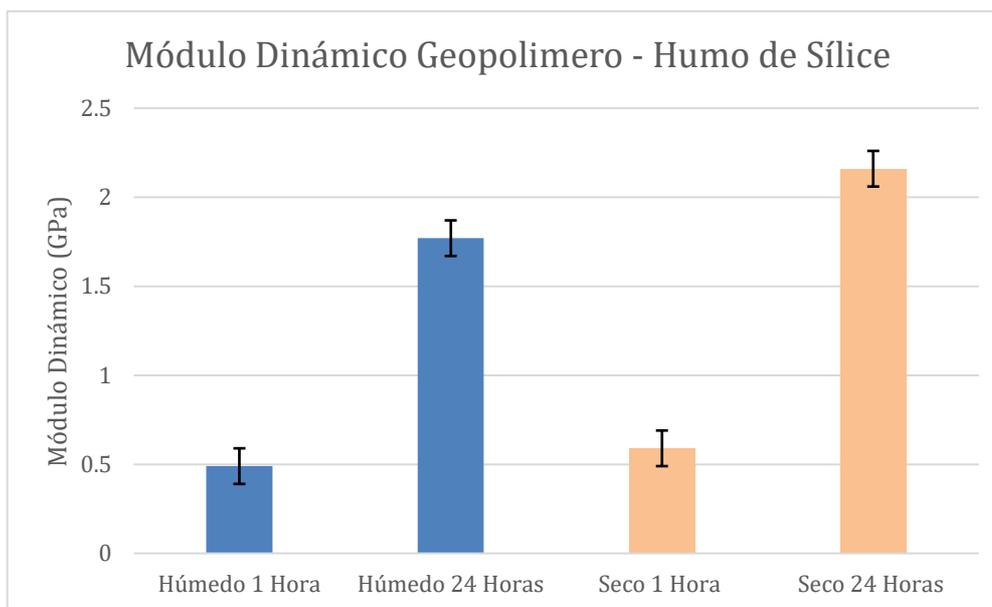


Figura 17: Módulo Dinámico de Geopolímeros de Humo de Sílice Según Tiempo de Curado

### ***Análisis de la Aplicación de Geopolímeros en la Construcción en el Ecuador***

La aplicación de geopolímeros en Ecuador enfrenta serias limitaciones debido a la baja disponibilidad de las materias primas necesarias para su producción. La ceniza volante, una de las fuentes principales de aluminosilicatos utilizados en la fabricación de geopolímeros, es

escasa en el país debido a la mínima dependencia del carbón en la matriz energética nacional. Las centrales termoeléctricas ecuatorianas operan principalmente con combustibles como diésel y gas natural, lo que genera residuos diferentes a la ceniza volante (Villacrés et al., 2021; Chindaprasirt et al., 2009; Ahmaruzzaman, 2010).

De manera similar, el metacaolín, otra materia prima esencial para la síntesis de geopolímeros, tiene una disponibilidad limitada en Ecuador debido a la baja producción de caolín y la falta de infraestructura para su calcinación. Aunque es posible importar este material bajo pedido específico, esto implica mayores costos y tiempos de adquisición, lo que dificulta su implementación a gran escala (Provequim, 2023). Por su parte, la escoria de alto horno, otro precursor común para la fabricación de geopolímeros, también es prácticamente inexistente en el país, ya que Ecuador no cuenta con una industria siderúrgica de gran capacidad que genere este subproducto de manera significativa, dependiendo mayormente de la importación desde países productores (Ternium, 2023.).

Además, otro factor crítico es la disponibilidad limitada de hidróxido de sodio (NaOH) y de hidróxido de potasio (KOH), los cuales son esenciales como activadores alcalinos en la síntesis de geopolímeros. En Ecuador, la venta de estos químicos está restringida y su adquisición puede resultar costosa, especialmente en las cantidades necesarias para aplicaciones industriales.

En general, las limitaciones en la disponibilidad de materias primas locales y reactivos químicos han dificultado la producción de geopolímeros en Ecuador a gran escala, tanto desde una perspectiva técnica como económica. Sin embargo, estudios recientes han identificado nuevas alternativas de materias primas disponibles en el país que muestran resultados prometedores para la síntesis de geopolímeros.

La actividad minera en Ecuador genera grandes volúmenes de desechos, los cuales pueden transformarse en precursores geopoliméricos. Entre estos materiales destacan la

montmorillonita y las escorias mineras, ambos ricos en sílice y aluminio, elementos esenciales para la formación de una matriz geopolimérica densa y resistente (Chindaprasirt et al., 2010). La montmorillonita es un mineral perteneciente al grupo de las arcillas esmectitas, caracterizado por su alta capacidad de intercambio catiónico y su estructura laminar que le confiere una excelente reactividad química. Estas propiedades hacen que la montmorillonita sea una alternativa viable como precursor en la síntesis de geopolímeros.

Por otro lado, Ecuador produce grandes cantidades de residuos agrícolas, como cáscaras de arroz y residuos de caña de azúcar, cuyos procesos de combustión generan cenizas de biomasa. Estas cenizas son ricas en sílice amorfo, un componente clave para la formación de geopolímeros sostenibles (Hernández et al., 2019). La valorización de estos residuos no solo contribuye a reducir el impacto ambiental, sino que también promueve un modelo de economía circular en el país.

De esta manera, el aprovechamiento de materiales como montmorillonita, escorias mineras y cenizas de biomasa agrícola representa una oportunidad para desarrollar geopolímeros en Ecuador, promoviendo soluciones constructivas sostenibles y económicamente viables.

## ***CONCLUSIONES***

**Viabilidad de Precursores:** Los resultados demuestran que la ceniza volante es un precursor altamente eficiente para la síntesis de geopolímeros debido a su contenido balanceado de sílice y aluminio, lo que favorece la formación de una matriz densa, estable y con excelente resistencia mecánica. Por el contrario, el humo de sílice, debido a su bajo contenido de aluminio, muestra limitaciones significativas, presentando estructuras más porosas y menor estabilidad, lo cual afecta sus propiedades mecánicas y su aplicabilidad.

**Condiciones de Curado:** El curado bajo condiciones de altas temperaturas mejora significativamente las propiedades mecánicas de los geopolímeros, particularmente la densidad y la resistencia a la compresión. Los tiempos prolongados de curado a temperaturas elevadas promueven una reacción más completa de polimerización, resultando en una mayor cohesión de la matriz, especialmente en los geopolímeros basados en ceniza volante.

**Propiedades Mecánicas:** Los geopolímeros de ceniza volante alcanzaron una resistencia a la compresión significativamente mayor en comparación con los de humo de sílice, con valores de hasta 33 MPa después de 24 horas de curado húmedo. En cuanto a la flexión, los geopolímeros curados bajo estas mismas condiciones alcanzaron resistencias de aproximadamente 10 MPa, mostrando su potencial como material de construcción de alto rendimiento.

**Módulo Dinámico:** El módulo dinámico de los geopolímeros también refleja una correlación directa con la densidad y la porosidad de la matriz. Los geopolímeros de ceniza volante curados en condiciones húmedas alcanzaron módulos dinámicos de hasta 76 GPa, mientras que los de humo de sílice presentaron valores considerablemente más bajos debido a su microestructura porosa.

**Relevancia para la Construcción:** Los resultados destacan a los geopolímeros de ceniza volante como una alternativa viable y sostenible para aplicaciones en la construcción, especialmente en ambientes donde se requiere alta resistencia y durabilidad. Las limitaciones observadas en el humo de sílice subrayan la necesidad de precursores ricos en aluminio para garantizar un desempeño óptimo del material.

## ***REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS***

Ahmaruzzaman, M. (2010). A review on the utilization of fly ash. *Progress in Energy and Combustion Science*, 36(3), 327–363. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2009.11.003>

- Castillo, H., Collado, H., Droguett, T., Sánchez, S., Vesely, M., Garrido, P., & Palma, S. (2021). *Factors Affecting the Compressive Strength of Geopolymers: A Review*. *Minerals*, 11(12), 1317. <https://doi.org/10.3390/min11121317>
- Chindaprasirt, P., Jaturapitakkul, C., & Sinsiri, T. (2009). Effect of fly ash fineness on compressive strength and pore size of blended cement paste. *Cement and Concrete Composites*, 31(5), 410–418. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.04.003>
- Chindaprasirt, P., Jaturapitakkul, C., Chalee, W., & Rattanasak, U. (2010). Comparative study on the characteristics of fly ash and bottom ash geopolymers. *Waste Management*, 30(11), 2225–2230. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.03.013>
- CORDIS. (s.f.). *Lower CO2 emissions on the horizon for cement*. Recuperado de <https://cordis.europa.eu/article/id/406925-lower-co2-emissions-on-the-horizon-for-cement/es>
- Davidovits, J. (1994). *Geopolymers: Inorganic polymeric new materials*. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 37(8), 1633-1656. <https://doi.org/10.1007/BF01912193>
- Duxson, P., Fernandez-Jimenez, A., Provis, J. L., & van Deventer, J. S. J. (2007). *Geopolymer technology: The current state of the art*. *Journal of Materials Science*, 42(9), 2917–2933.
- El Confidencial. (2022, 26 de julio). *Efecto invernadero y cambio climático: el cemento, el material más destructivo del mundo*. Recuperado de [https://www.elconfidencial.com/medioambiente/empresa/2022-07-26/efecto-invernadero-cambio-climatico-cemento\\_3463584/](https://www.elconfidencial.com/medioambiente/empresa/2022-07-26/efecto-invernadero-cambio-climatico-cemento_3463584/)

- Energía Estratégica. (2024). Por la sostenibilidad en la Industria del Cemento: Ecuador traza su hoja de ruta hacia la descarbonización. *Energía Estratégica*.  
<https://www.energiaestrategica.com>
- Hernández, J. F., Alonso, S., & Palomo, A. (2019). The role of rice husk ash in geopolymer binders. *Materials Letters*, 230, 134–137.
- Hernández, C., et al. (2017). Empleo de cenizas volantes para la elaboración de geopolímeros. *9º Congreso Internacional de Investigación Científica Multidisciplinaria*. Recuperado de  
<https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/1800/1/Congreso%20T-ECM%20Claudia%20Hdz.pdf>
- Hutchinson, J. R. (1974). Axisymmetric flexural vibrations of a thick free circular plate. *Journal of Applied Mechanics*, 41(1), 255-262. <https://doi.org/10.1115/1.3423274>
- L., Nau Leming, M., J. M., & Fukuda, J. (1998). Nondestructive determination of the dynamic modulus of concrete disks. *ACI Materials Journal*, 95(1), 50–56.
- León-Vélez, A., & Guillén-Mena, V. (2020). Energía contenida y emisiones de CO<sub>2</sub> en el proceso de fabricación del cemento en Ecuador. *SciELO*.
- Ng, Y.-S., Liew, Y.-M., Heah, C.-Y., & Abdullah, M. M. A. B. (2022). Flexural properties of thin fly ash geopolymers at elevated temperature. *Archives of Metallurgy and Materials*, 67(3), 1145–1150. <https://doi.org/10.24425/amm.2022.139714>
- Provequim. (2023). *Productos y servicios*. Recuperado de <https://www.provequimca.com>
- Provis, J. L., & van Deventer, J. S. J. (2014). *Alkali-activated materials: State-of-the-art report, RILEM TC 224-AAM*. Springer.

- Provis, J. L. (2018). Alkali-activated materials. *Cement and Concrete Research*, 114, 40-48.  
<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.02.009>
- Provis, J. L., & van Deventer, J. S. J. (2009). *Geopolymers: Structure, processing, properties and industrial applications*. Woodhead Publishing.
- Rashetnia, R., Ghasemzadeh, F., & Pour-Ghaz, M. (2016). Axisymmetric flexural vibration for estimating the dynamic elastic modulus of damaged cement-based materials. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 14(5), 287–298. <https://doi.org/10.3151/jact.14.287>
- Rattanasak, U., & Chindaprasirt, P. (2009). Influence of NaOH solution on the synthesis of fly ash geopolymer. *Minerals Engineering*, 22(12), 1073–1078.
- Ternium. (2023). *Escoria de Alto Horno*. Recuperado de <https://ar.ternium.com/es/productos/coproductos/escoria-de-alto-horno>
- van Deventer, J. S. J., Provis, J. L., Duxson, P., & Lukey, G. C. (2007). *Reaction mechanisms in the geopolymeric conversion of inorganic waste to useful products*. *Journal of Hazardous Materials*, 139(3), 506–513.
- Villacrés, L. D., Fiallos, M. L., & Vallejo, E. A. (2021). Evaluación de las propiedades puzolánicas de cenizas volcánicas ecuatorianas para la fabricación de cementos ecoeficientes. *Revista Científica UNEMI*, 14(36), 88–99.
- Wang, Q., Guo, H., Yu, T., Yuan, P., Deng, L., & Zhang, B. (2022). *Utilization of Calcium Carbide Residue as Solid Alkali for Preparing Fly Ash-Based Geopolymers: Dependence of Compressive Strength and Microstructure on Calcium Carbide Residue, Water Content and Curing Temperature*. *Materials*, 15(3), 973.  
<https://doi.org/10.3390/ma15030973>

***ANEXO A: CONFIGURACIÓN CURADO EN HUMEDAD A 80°C***



***ANEXO B: HUMO DE SÍLICE***



***ANEXO C: CENIZA VOLANTE***



***ANEXO D: ENSAYO FLEXIÓN GEOPOLÍMERO CENIZA VOLANTE CURADO HÚMEDO POR 24 HORAS A 80°C***



### ANEXO E: VALOR DE $\Omega_0$ PARA GEOPOLÍMEROS

Imagen: sacada de: L., Nau Leming, M., J. M., & Fukuda, J. (1998). Nondestructive determination of the dynamic modulus of concrete disks. *ACI Materials Journal*, 95(1), 50–56.

Los discos que se utilizaron para medir el módulo dinámico tuvieron un espesor de 25.40 mm, además de un diámetro de 76 mm, esto nos permite calcular el valor de  $\Omega_0$  de los geopolímeros.

