

INSTITUTO PARA INICIATIVAS EN LATINO AMERICA

INSTITUTE FOR INITIATIVES IN LATIN AMERICA



Instituto
para Iniciativas
en Latinoamerica



UNIVERSIDAD NACIONAL DE TRUJILLO
UNT



UNIVERSIDAD NACIONAL
DE MOQUEGUA



UNIVERSIDAD NACIONAL
SANTIAGO ANTÚNEZ DE MAYOLO
"Una Nueva Universidad para el Desarrollo"

Innovative Solutions for the Reuse of Mining Tailings in Arequipa as Construction Materials

Dr. Reza Hedayat

Associate Professor of Civil and Environmental Engineering

hedayat@mines.edu

Outline

Introducción y Motivación	<ul style="list-style-type: none">• Reutilización de relaves mineros
Muestreo y Caracterización	<ul style="list-style-type: none">• Caracterización física• Caracterización mineralógica• Caracterización Química
Geopolimerización	<ul style="list-style-type: none">• Proceso de preparación y curado• Solicitud• Adición de cenizas volantes
Propiedades mecánicas	<ul style="list-style-type: none">• fuerza• Propiedades de fractura

Introducción

¿Qué son los relaves mineros?

Los relaves son los materiales de desecho que quedan después de que el mineral objetivo se extrae del mineral. consisten en

- Roca triturada, Agua, Trazas de metales, Aditivos utilizados en el procesamiento.

Los relaves se almacenan en montones o estanques y se mantienen dentro mediante represas.



Introducción

- Altos costos monetarios, ambientales y ecológicos.
- Muchas operaciones mineras almacenan enormes cantidades de desechos en el sitio.
- Los relaves a menudo consisten en partículas finas suspendidas en el agua, que tienen el potencial de dañar el medio ambiente.

Contaminación
del río Moche
por relaves



Polvo de pilas de relaves

Motivación



Jerarquía de residuos



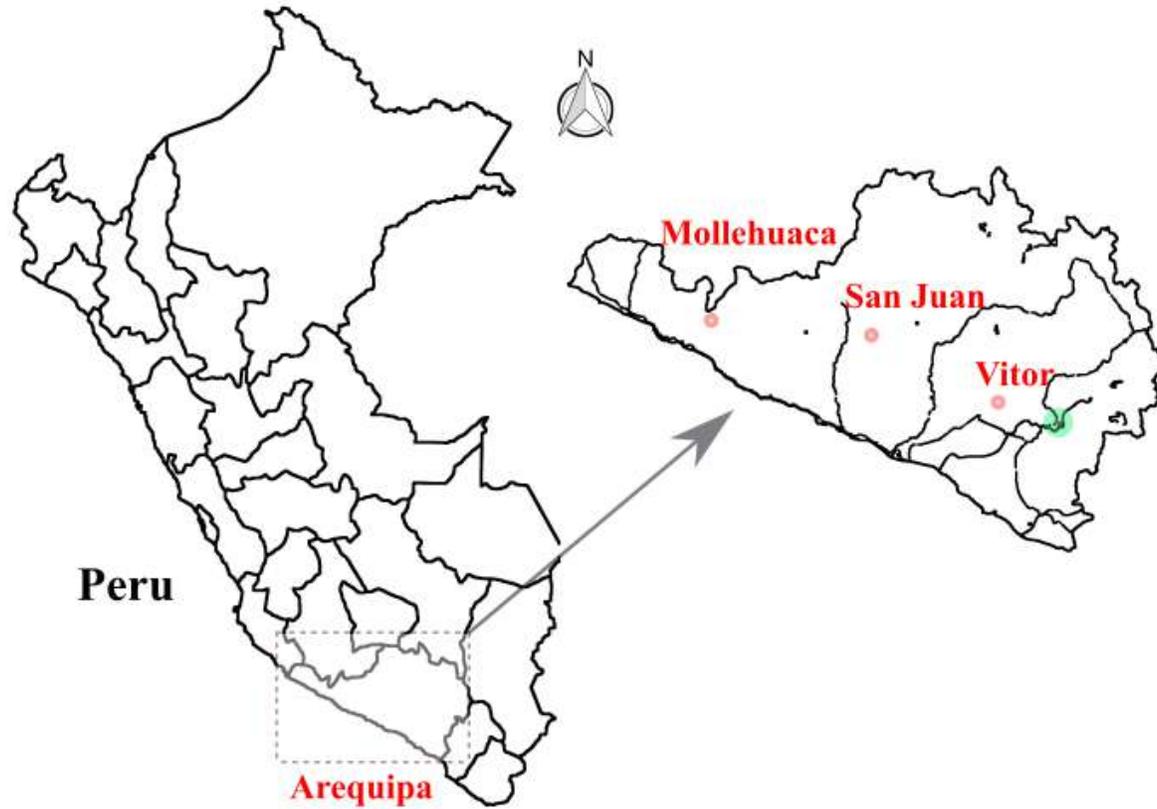
Beneficios de la reutilización

Motivación

- Objetivo de investigación: Reutilizar los relaves mineros transformándolos en materiales de construcción valiosos y sostenibles
- Ejemplos de reutilización:
- Ladrillos (macizos y huecos)
- bloques
- Hormigón para la construcción y estructuras



Recolección de Relaves de Arequipa



Mollehuaca



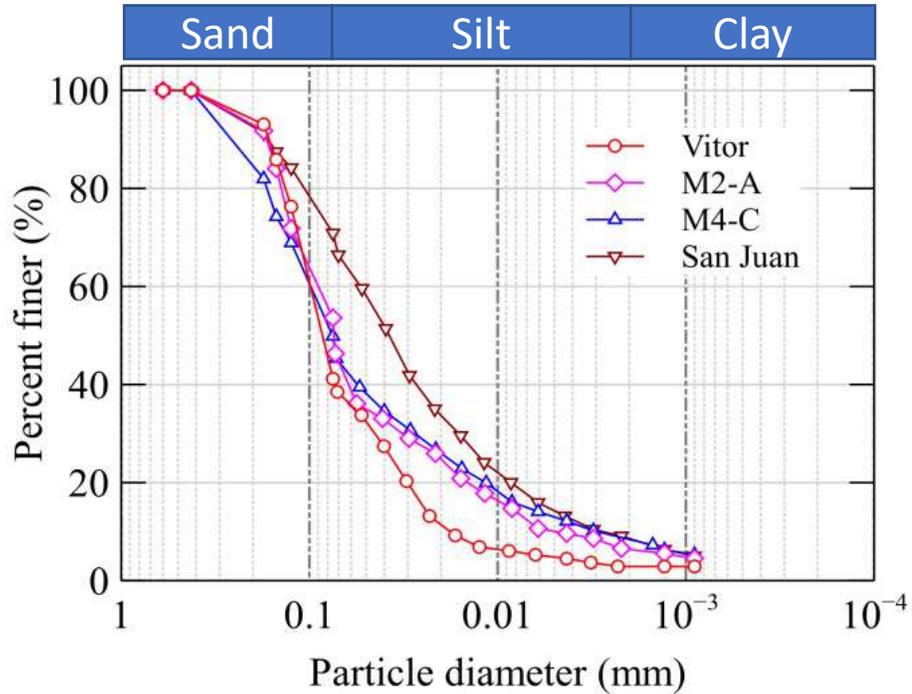
San Juan



Vitor



Caracterización física de relaves



Mollehuaca



Vitor

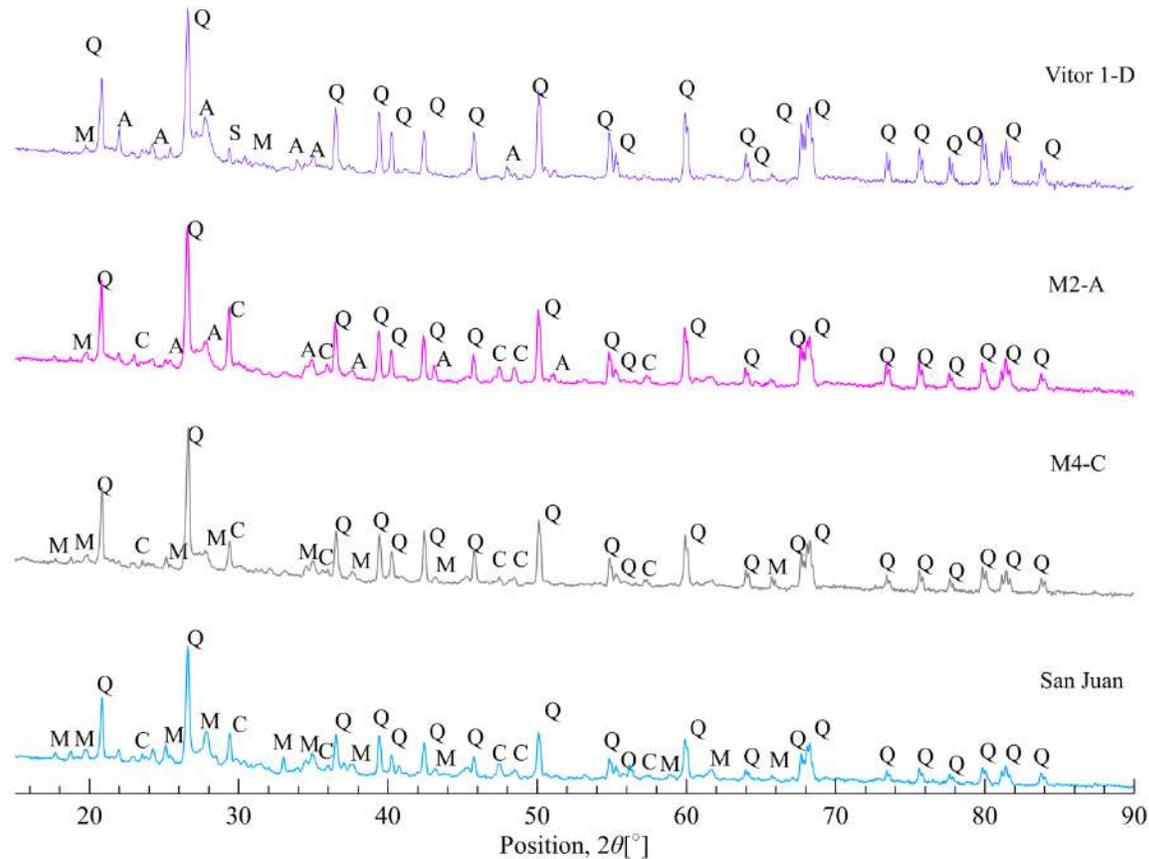


San Juan

Clasificación del suelo

Standards	Vitor	M2	M4	San Juan
AASHTO	Silty soil (A-4)	Silty soil (A-4)	Silty soil (A-4)	Silty soil (A-4)
USCS	Silty sand (SM)	Gravelly silt with sand (ML)	Gravelly lean clay with sand (CL)	Gravelly silty clay with sand (CL-ML)

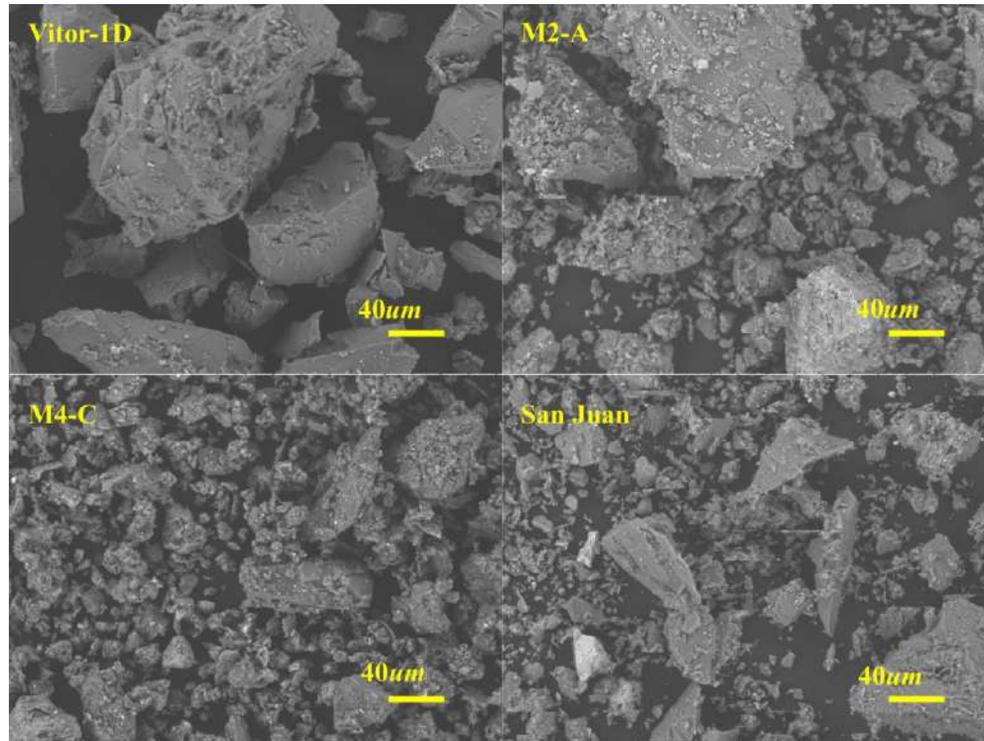
Caracterización mineralógica de relaves



Patrones XRD de Materias Primas

Vitor 1-D		
Name	Formula	Percentage
Quartz	SiO_2	73.70%
Albite	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	22.50%
Muscovite	$(\text{KF})_2(\text{Al}_2\text{O}_3)_3(\text{SiO}_2)_6$	3.50%
Sinnerite	$\text{Cu}_6\text{As}_4\text{S}_9$	0.30%
Mollehuaca (M2-A)		
Name	Formula	Percentage
Quartz	SiO_2	62.60%
Albite	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$	16.40%
Muscovite	$(\text{KF})_2(\text{Al}_2\text{O}_3)_3(\text{SiO}_2)_6$	10.00%
Calcite	CaCO_3	9.80%
San Juan		
Name	Formula	Percentage
Quartz	SiO_2	54.20%
Muscovite	$(\text{KF})_2(\text{Al}_2\text{O}_3)_3(\text{SiO}_2)_6$	13.90%
Oligoclase	$(\text{Ca},\text{Na})(\text{Al},\text{Si})_4\text{O}_8$	20.0%
Calcite	CaCO_3	6.10%
Mollehuaca (M4-C)		
Name	Formula	Percentage
Quartz	SiO_2	77.70%
Muscovite	$(\text{KF})_2(\text{Al}_2\text{O}_3)_3(\text{SiO}_2)_6$	14.30%
Calcite	CaCO_3	4.20%
Silicodititanate	$\text{H}_6\text{O}_9\text{SiTi}_3$	3.20%

Caracterización química de relaves



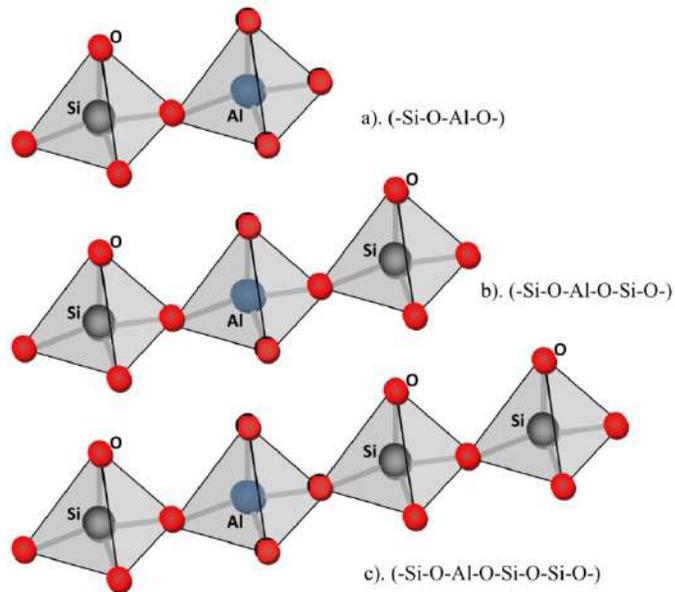
Microscopía electrónica de barrido
Espectroscopía de rayos X de dispersión de
energía (SEM/EDS)

Element	Vitor 1D	M2-A	M4-C	San Juan
	Weight (%)			
Si	33.36	36.26	26.21	32.89
Al	10.63	11.22	10.68	15.42
Fe	10.19	10.30	12.48	6.36

- Si, Al y Fe fueron los tres elementos dominantes dentro de los relaves.
- Los relaves de Arequipa eran ricos en aluminosilicatos y la relación Si:Al era de aproximadamente 2-3

Caracterización química de relaves

Elementos estructurales

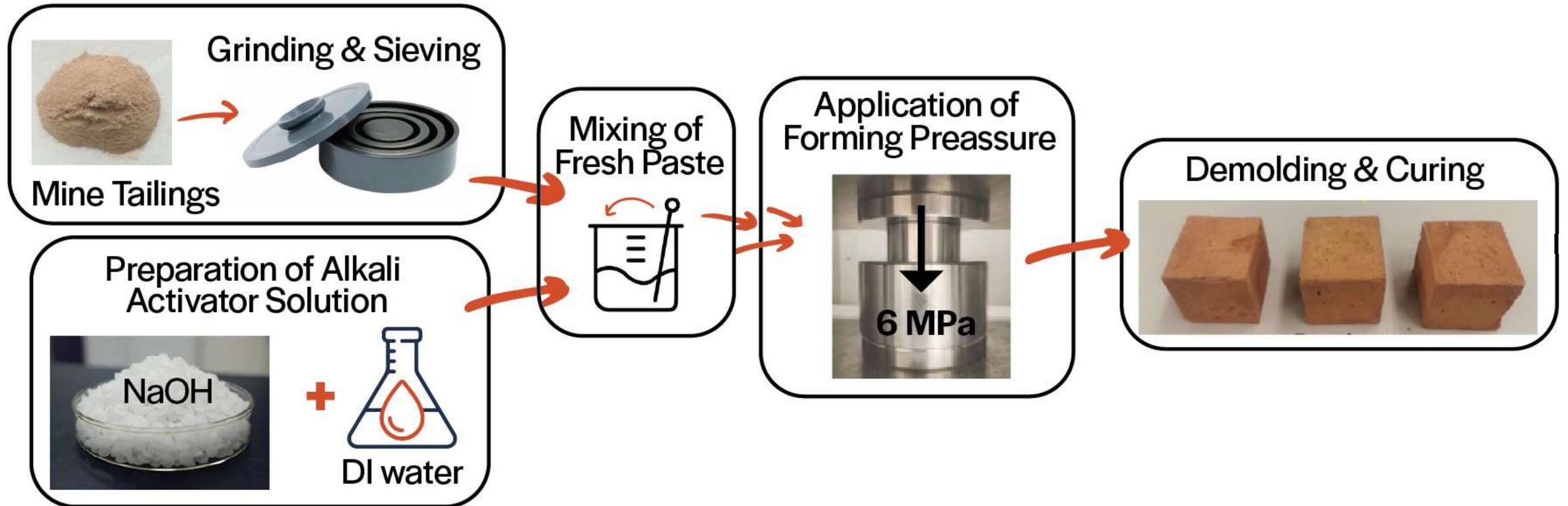


Cadenas poliméricas 3D

- Definición: clase de materiales sólidos sintetizados por la reacción de polvo de aluminosilicato con una solución alcalina.
- Los aluminosilicatos reactivos se pueden disolver y las unidades tetraédricas libres se liberan en la solución en condiciones altamente alcalinas.
- Hay dos activadores alcalinos que se usan comúnmente para activar los relaves: hidróxido de sodio (NaOH) y silicato de sodio.

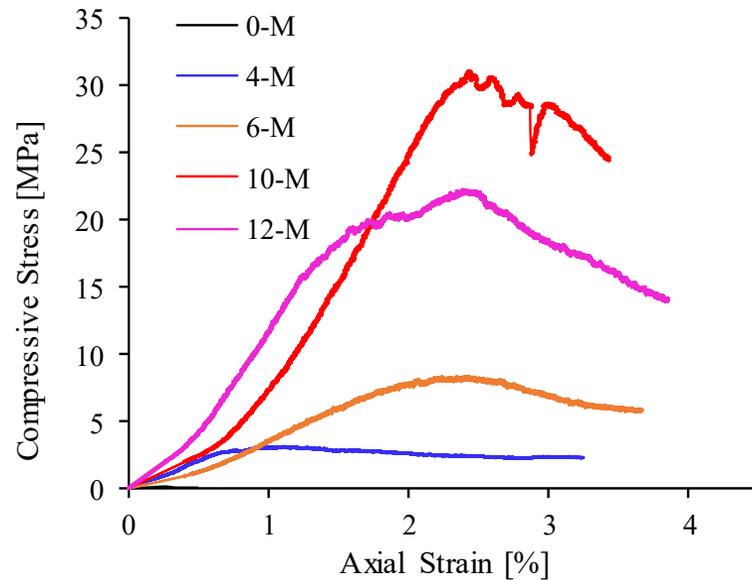
Geopolimerización

Procedimiento de mezcla



Resistencia de los relaves de geopolímero

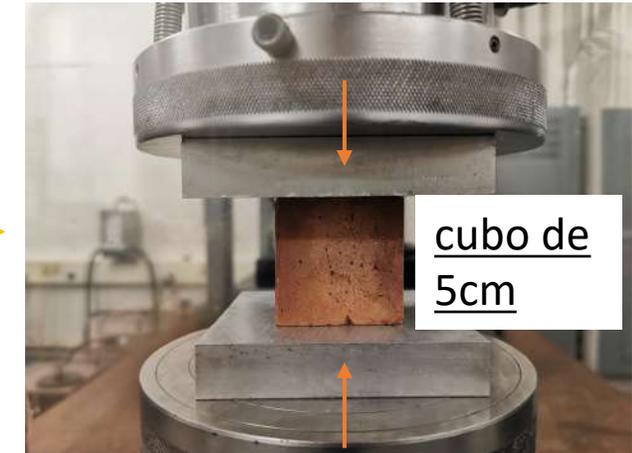
Pruebas de compresión uniaxial



75 kg

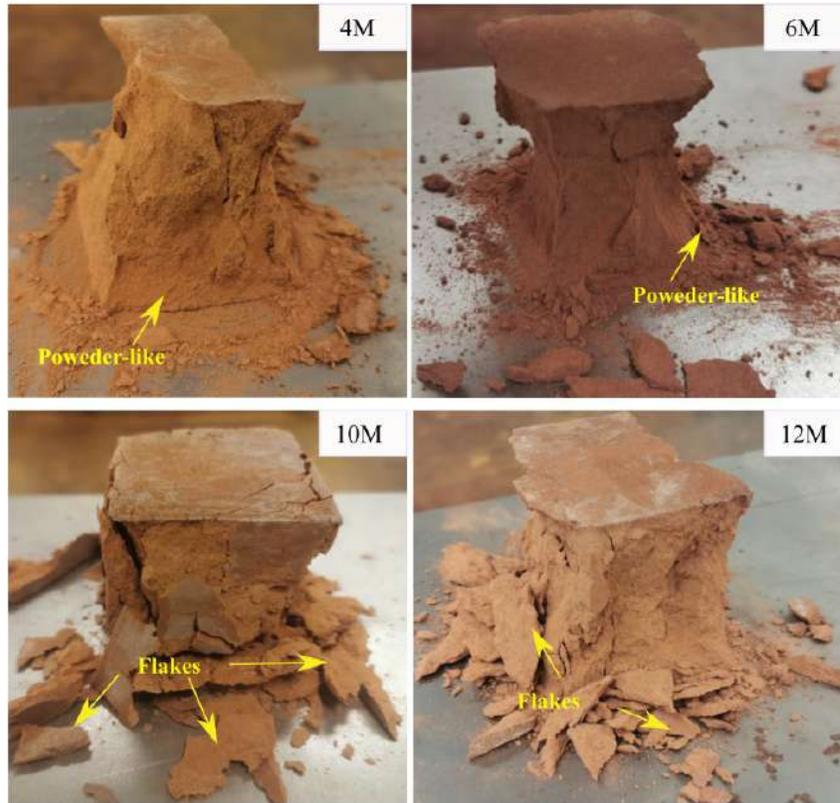


x100



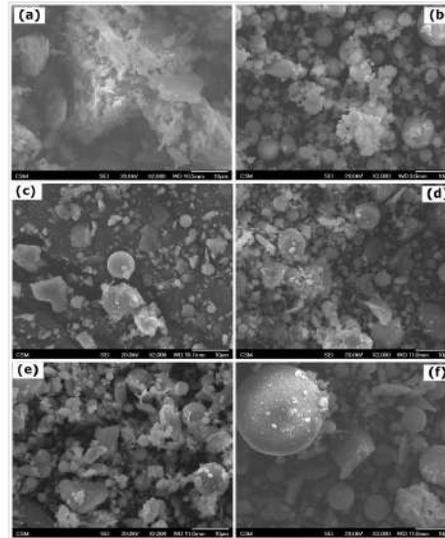
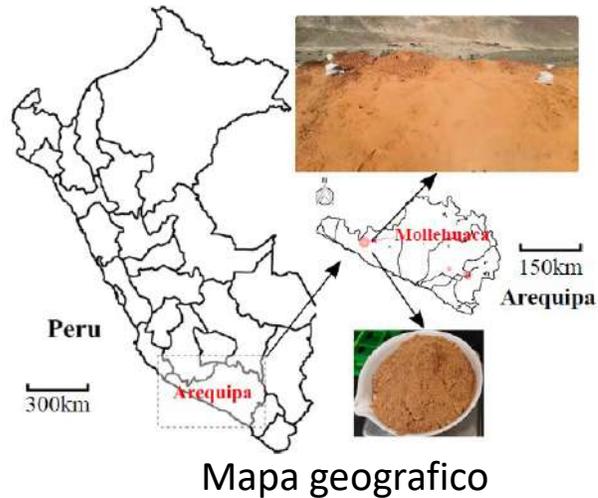
Observación de Daño en Geopolímeros

Patrón de fractura de especímenes

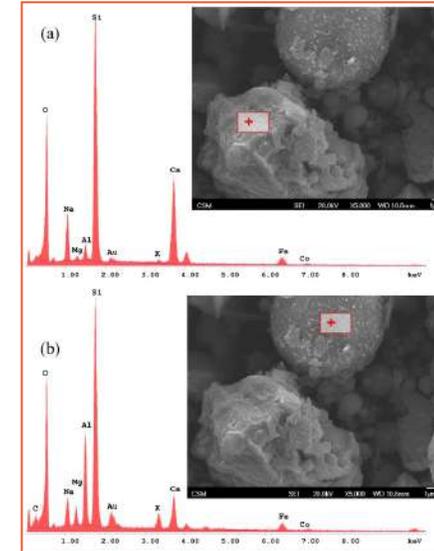


- Los especímenes de geopolímero no están completamente cementados cuando las molaridades de NaOH son iguales a 4M y 6M
- Hay partes en polvo con geopolimerización insuficiente del espécimen de geopolímero cuando las molaridades de NaOH son iguales a 4M y 6M
- No se generan partes similares a polvo para geopolímeros activados con molaridades más altas de NaOH

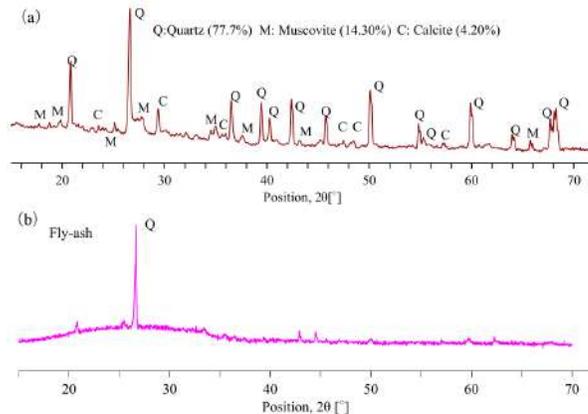
Adición de cenizas volantes



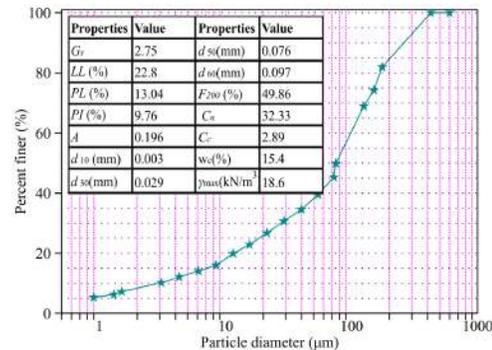
imágenes SEM



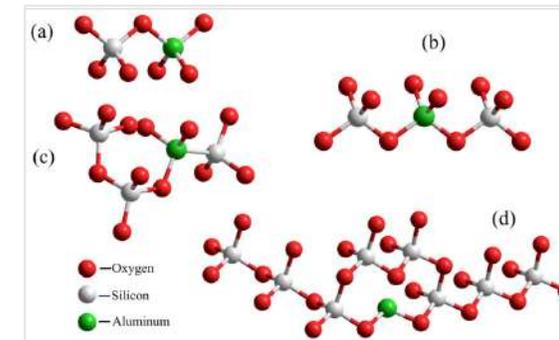
Análisis SEM/EDS



patrones XRD



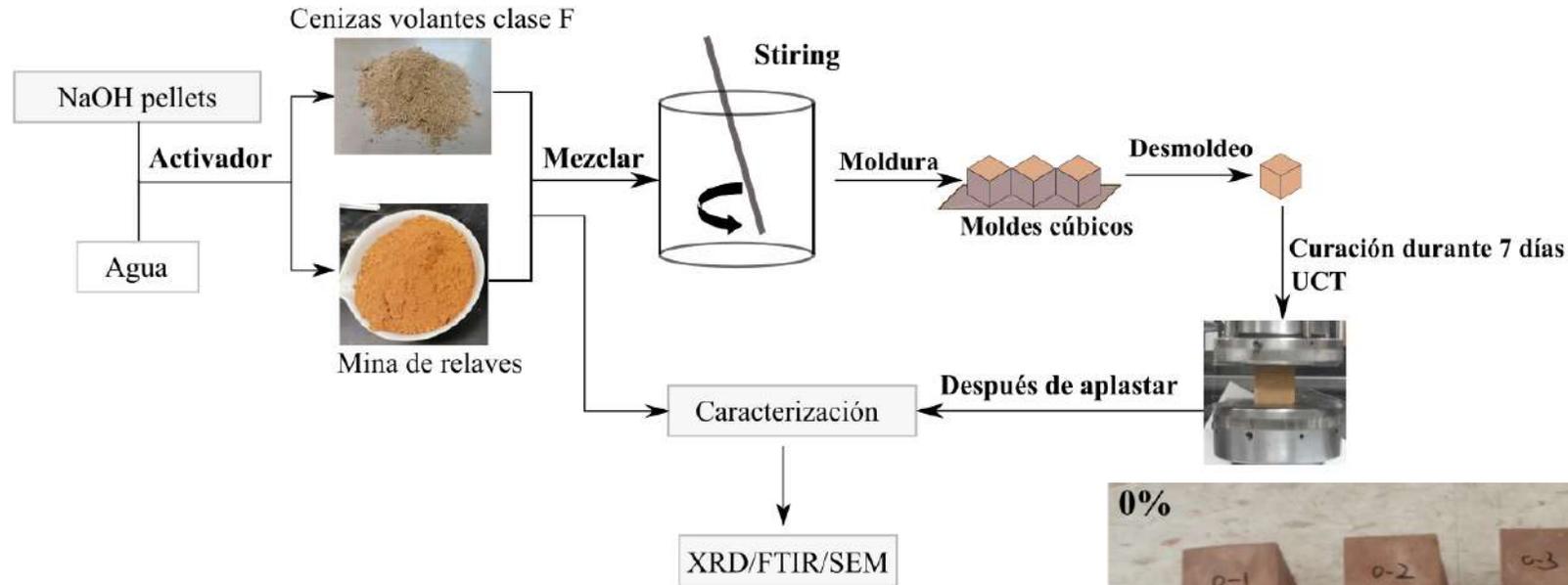
Propiedades geotécnicas



Estructuras celulares de geopolímero

Adición de cenizas volantes

Nuevo procedimiento

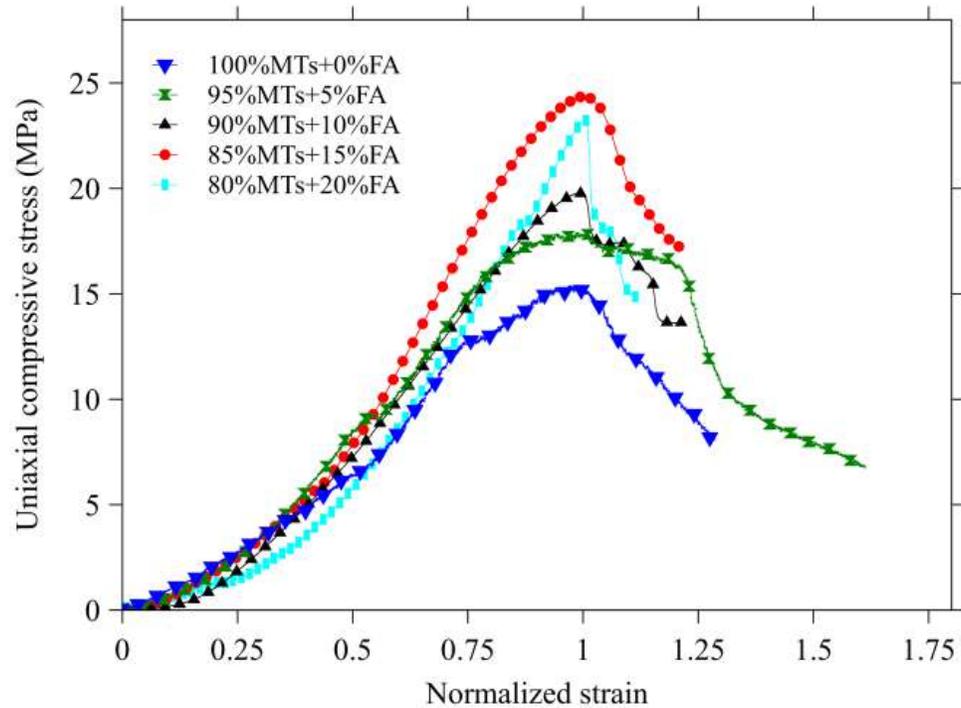


Ejemplar con diferentes porcentajes de cenizas volantes

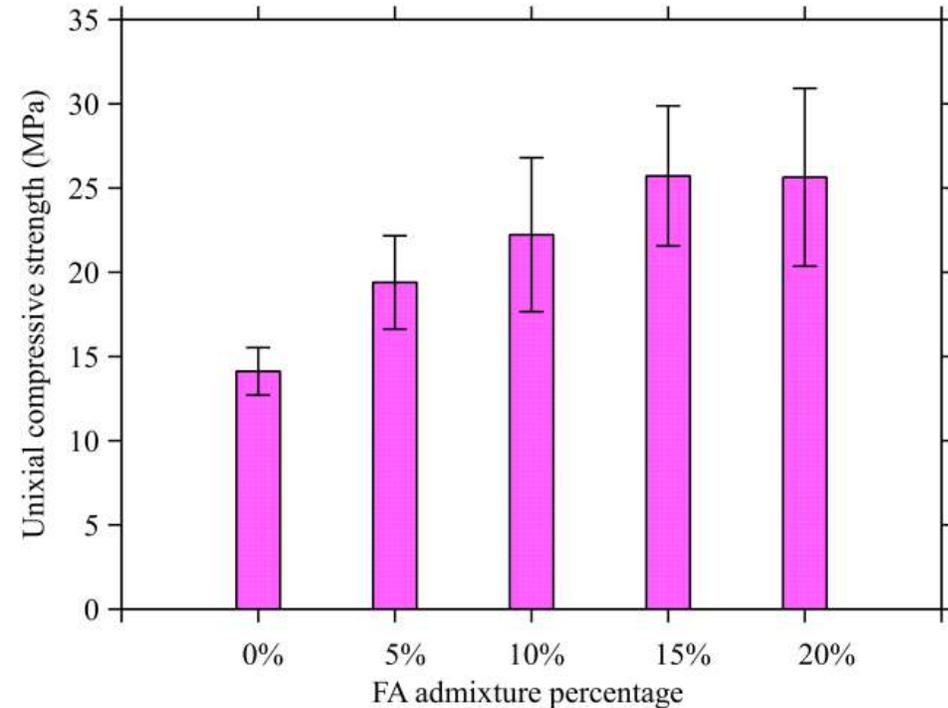


Relaves de geopolímero con cenizas volantes

Resistencia a la compresión uniaxial



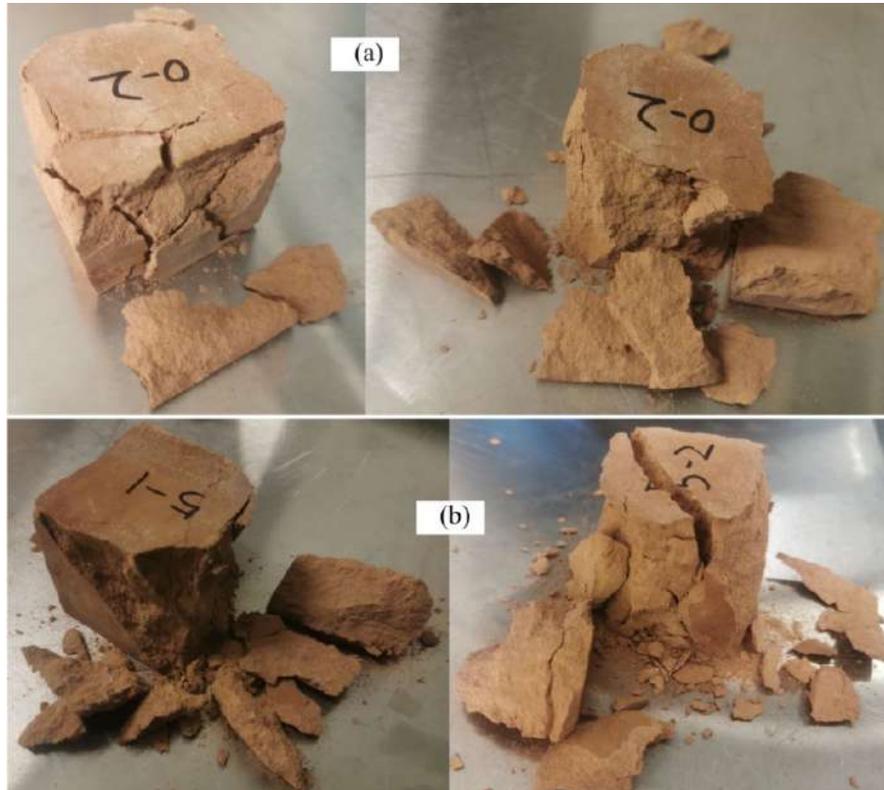
Curvas de esfuerzo-deformación



Resistencia a la compresión uniaxial

Relaves de geopolímero con cenizas volantes

Patrones de falla



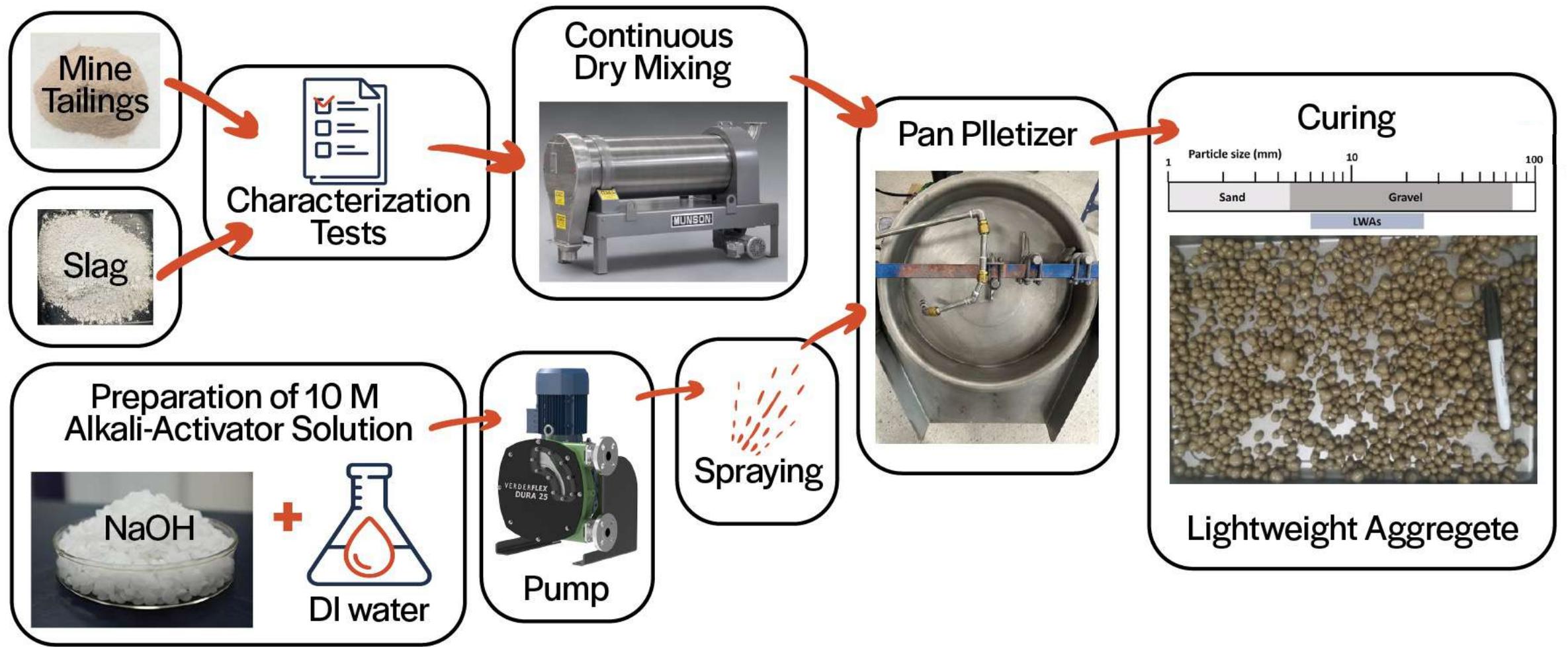
Porcentajes de cenizas volantes (FA):
0%, b) 5%, c) 10%, d) 15%, y e) 20%



Mercado de áridos ligeros



Producción de áridos ligeros



Conclusiones

- El almacenamiento y el manejo de los relaves mineros plantean importantes problemas económicos y ambientales, por lo que la reutilización de los relaves mineros es beneficiosa.
- Los relaves mineros que son ricos en aluminosilicatos se pueden activar y convertir para desarrollar materiales de construcción y construcción, como hormigón geopolimérico y ladrillos.
- Los geopolímeros producidos mostraron altos niveles de resistencia similares a los del hormigón ordinario a base de cemento Portland.
- Agregar aluminosilicatos amorfos puede ser crucial para ajustar los tipos de estructuras celulares para una mejor geopolimerización.
- La resistencia y tenacidad a la fractura de los relaves de geopolímero aumentó con la adición de cenizas volantes.

Publicaciones

1. Zhang, N., Hedayat, A., Sosa, H. G. B., Tupa, N., Morales, I. Y., Loza, R. S. C. (2023). Mixed-mode fracture of compacted tailing soils. I: Fracture toughness. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 124, 103670.
2. Zhang, N., Hedayat, A., Sosa, H. G. B., Tupa, N., Morales, I. Y., Loza, R. S. C. (2023). Mixed-mode fracture of compacted tailing soils. II: Crack properties from full-field displacement fields. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2022.103707>
3. Zhang, N., Hedayat, A., Figueroa, L., Steirer, K.X., Li, H., Sosa, H. G. B., Bernal, R.P.H., Tupa, N., Morales, I.Y., Loza, R.S.C. (2022). Experimental studies on the durability and leaching properties of alkali-activated tailings subjected to different environmental conditions, *Cement and Concrete Composites*, 130, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104531>.
4. Perera-Mercado, Y.; Hedayat, A.; Tunstall, L.; Clements, C.; Hylton, J.; Figueroa, L.; Zhang, N.; Bolaños Sosa, H.G.; Tupa, N.; Yanqui Morales, I.; et al. Effect of the Class C Fly Ash on Low-Reactive Gold Mine Tailing Geopolymers. *Polymers* 2022, 14, 2809. <https://doi.org/10.3390/polym14142809>
5. Zhang, N., Ahmadreza Hedayat, Shaoyang Han, Shuqi Ma, Héctor Gelber Bolaños Sosa, Roberto Pedro Huamani Bernal, Néstor Tupa, Isaac Yanqui Morales, Reynaldo Sabino Canahua Loza (2022). Fracture properties of tailings-based geopolymer incorporated with class F fly ash under mode I loading conditions, *Engineering Fracture Mechanics*, 271, <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2022.108646>.
6. Zhang, N., Hedayat, A., Han, S., Yang, R., Sosa, H. G. B., Cárdenas, J. J. G., & Álvarez, G. E. S. (2021). Isotropic compression behavior of granular assembly with non-spherical particles by X-ray micro-computed tomography and discrete element modeling. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2021.04.005>
7. Zhang, N., Hedayat, A., Sosa, H. G. B., Cárdenas, J. J. G., Álvarez, G. E. S., & Rivera, V. B. A. (2021). Specimen size effects on the mechanical behaviors and failure patterns of the mine tailings-based geopolymer under uniaxial compression. *Construction and Building Materials*, 281, 122525. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122525>.
8. Zhang, N., Hedayat, A., Sosa, H., Tunnah, J., Cárdenas, J., and Álvarez, G. E. S. (2021). Estimation of the mode I fracture toughness and evaluations on the strain behaviors of the compacted mine tailings from full-field displacement fields via digital image correlation. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 114, 103014. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2021.103014>
9. Zhang, N., Hedayat, A., Sosa, H. G. B., Tupa, N., Morales, I. Y., and Loza, R. S. C. (2021). Mechanical and fracture behaviors of compacted gold mine tailings by semi-circular bending tests and digital image correlation. *Construction and Building Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124841>
10. Zhang, N., Hedayat, A., Sosa, H. G. B., Bernal, R.P.H., Tupa, N., Morales, I. Y., and Loza, R. S. C. (2021). Fracture properties of the gold mine tailings-based geopolymer under mode I loading condition through semi-circular bend tests with digital image correlation. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2021.103116>.
11. Zhang, N., Hedayat, A., Sosa, H.G.B., Tupa, N., Morales, I.Y., Loza, R.S.C. (2021). Crack evolution in the Brazilian disks of the mine tailings-based geopolymers measured from digital image correlations: An experimental investigation considering the effects of class F fly ash additions. *Ceramics International*, 47(22), 32382-32396.
12. Zhang, N., Hedayat, A., Sosa, H.G.B., Bernal, R.P.H., Tupa, N., Morales, I.Y., Loza, R.S.C. (2021). On the incorporation of class F fly-ash to enhance the geopolymerization effects and splitting tensile strength of the gold mine tailings-based geopolymer. *Construction and Building Materials*, 308, 125112. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125112>.
13. Zhang, N., Hedayat, A., [Gelber](#) Bolaños Sosa, H., González Cárdenas, J.J., Ascuña Rivera, V.B. (2020). Damage evaluation and deformation behavior of mine tailing-based Geopolymer under uniaxial cyclic compression. *Ceramics International*. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.12.194>.

INSTITUTO PARA INICIATIVAS EN LATINO AMERICA

INSTITUTE FOR INITIATIVES IN LATIN AMERICA

Thank You! – ¡Muchas Gracias!



Instituto
para Iniciativas
en Latinoamerica

