

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"

Tailings Management by Reuse as Construction Materials

Manejo de relaves mediante su reutilización como
materiales de construcción

Reza Hedayat, Ph.D.
Associate Professor of Civil and
Environmental Engineering

September 19, 2024

Outline

Introducción

- Reutilización de relaves mineros

Caracterización

- Caracterización Física, Mineralógica y Química

Hormigón geopolímero

- Proceso de producción
- Fuerza y propiedades físicas

Agregados livianos

- Proceso de producción y propiedades físicas
- Utilización en hormigón ligero

Cerámica

- Proceso de producción y propiedades físicas
- Comportamiento de fractura

Relaves



Antamina Mine
Copper/Zinc
Perú

Almacenamiento de relaves mineros



Fallas y peligros de la presa de relaves mineros



Falla de presa de relaves en Brasil en 2019



Polvo de pilas de relaves

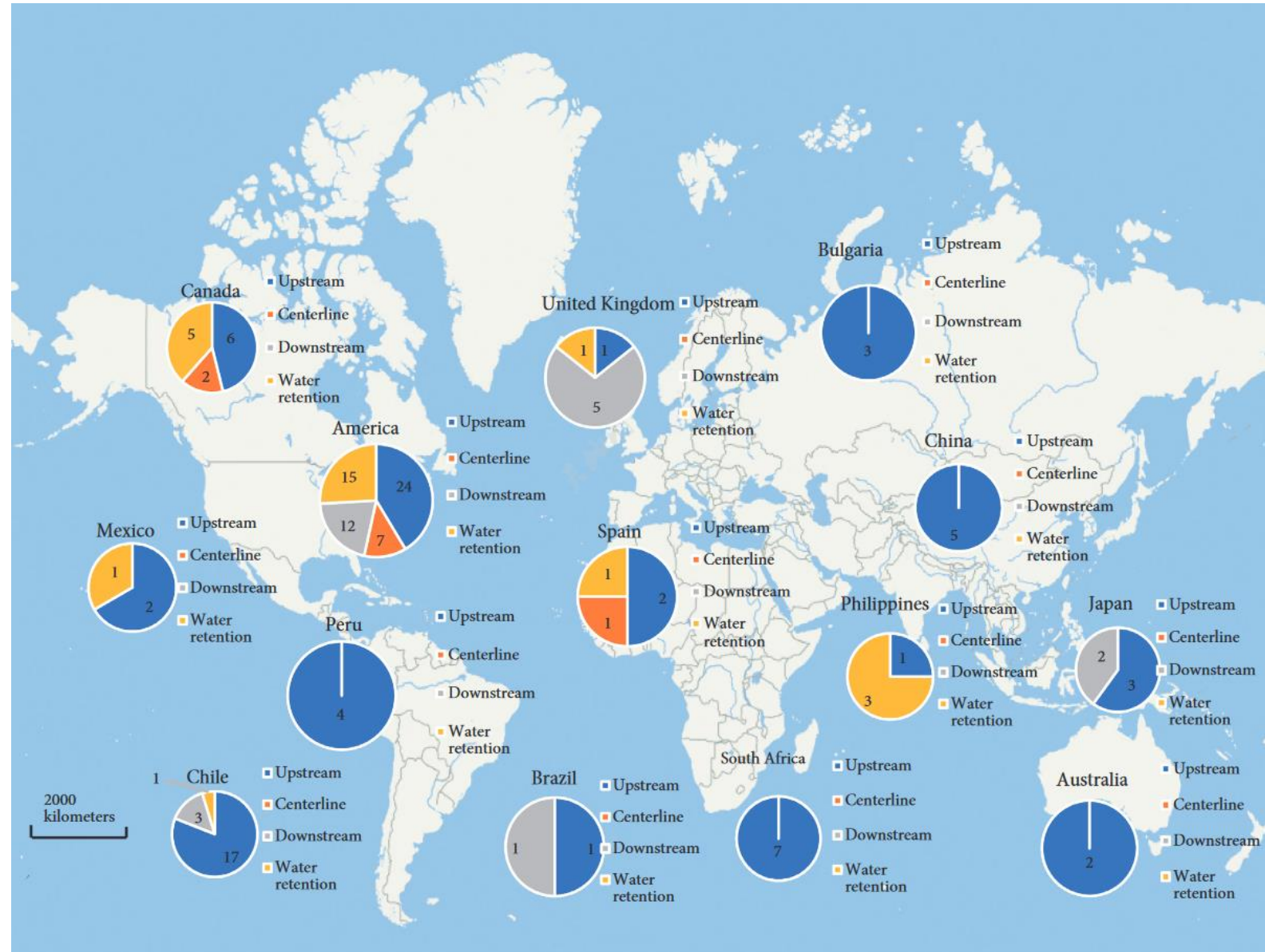


Contaminacion del rio

Fallas en presas de relaves mineros (a nivel mundial)

- río arriba
- Línea central
- río abajo
- Retención de agua

Número y tipos de fallas en presas de relaves
(Zongjie et al., (2019))



Reutilización de relaves mineros



Jerarquía de residuos



Beneficios de reutilización

Reutilización de relaves mineros



Motivación

Objetivo de la investigación: Reutilizar relaves mineros transformándolos en materiales de construcción valiosos y sustentables

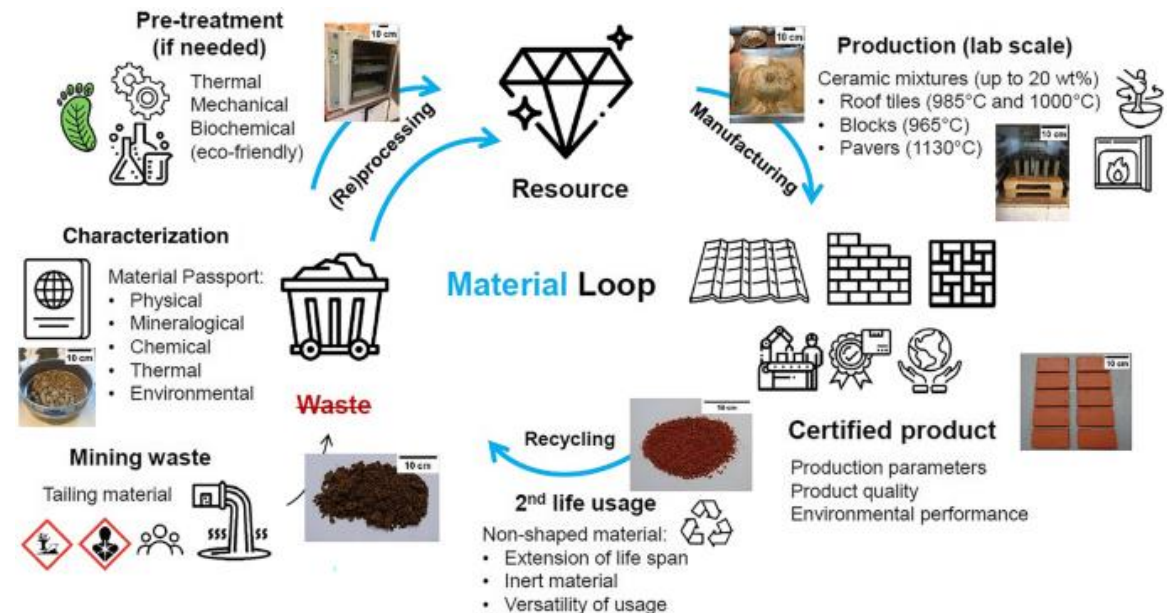
- Ejemplos de reutilización:
- Ladrillos (macizos y huecos)
- Bloques
- Hormigón para construcción y estructuras.



Motivación

Objetivo de la investigación: Reutilizar relaves mineros transformándolos en materiales de construcción valiosos y sustentables

- Ejemplos de reutilización:
- Agregados livianos
- Cerámica



Outline

Introducción

- Reutilización de relaves mineros

Caracterización

- Caracterización Física, Mineralógica y Química

Hormigón geopolímero

- Proceso de producción
- Fuerza y propiedades físicas

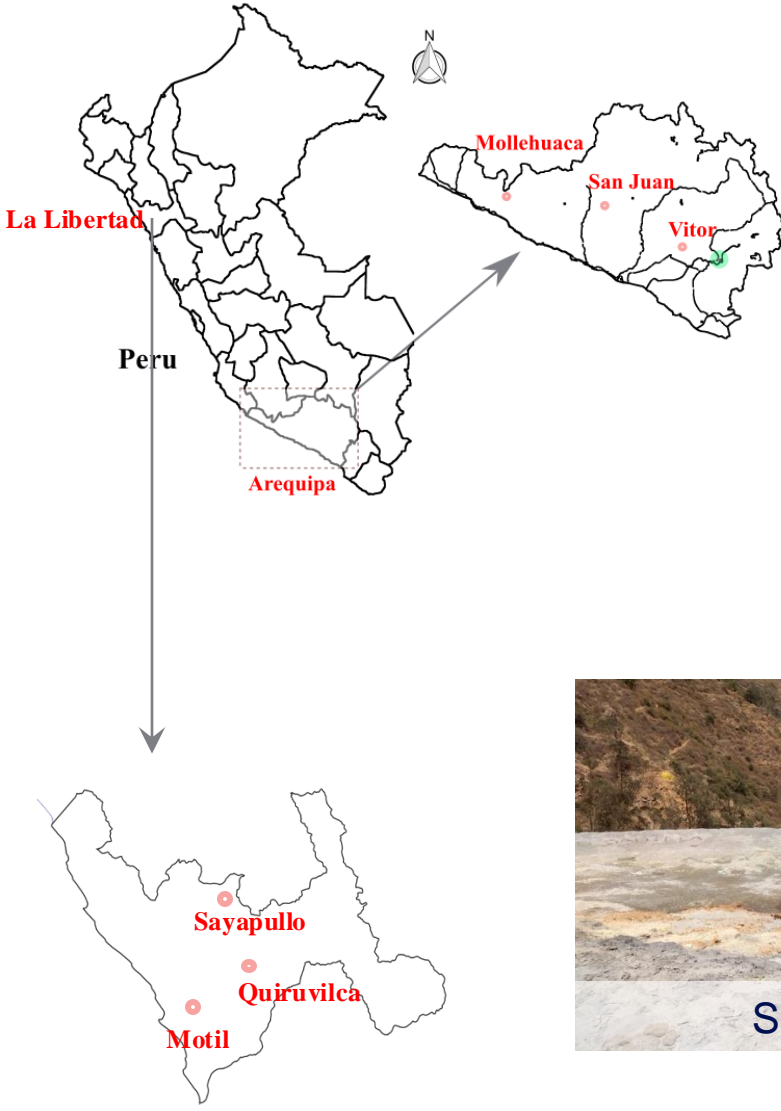
Agregados livianos

- Proceso de producción y propiedades físicas
- Utilización en hormigón ligero

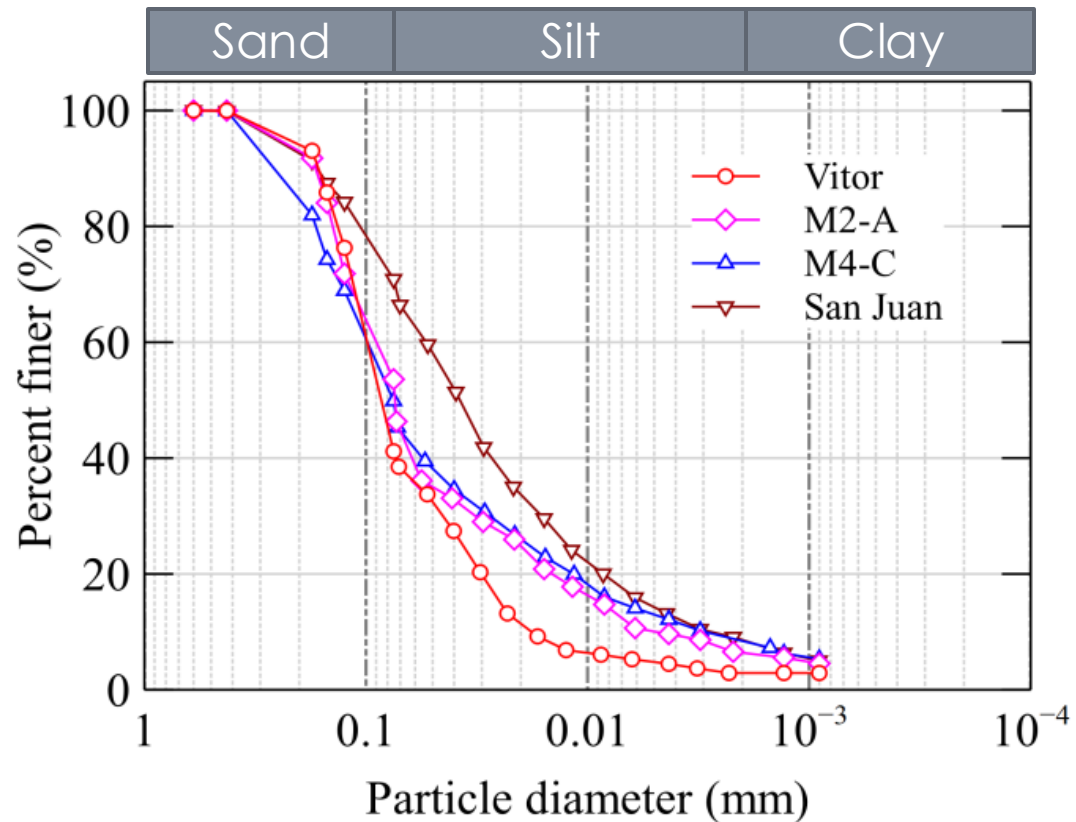
Cerámica

- Proceso de producción y propiedades físicas
- Comportamiento de fractura

Nuestro viaje en la reutilización de relaves mineros



Características físicas de los relaves mineros



Mollehuaca



Vitor

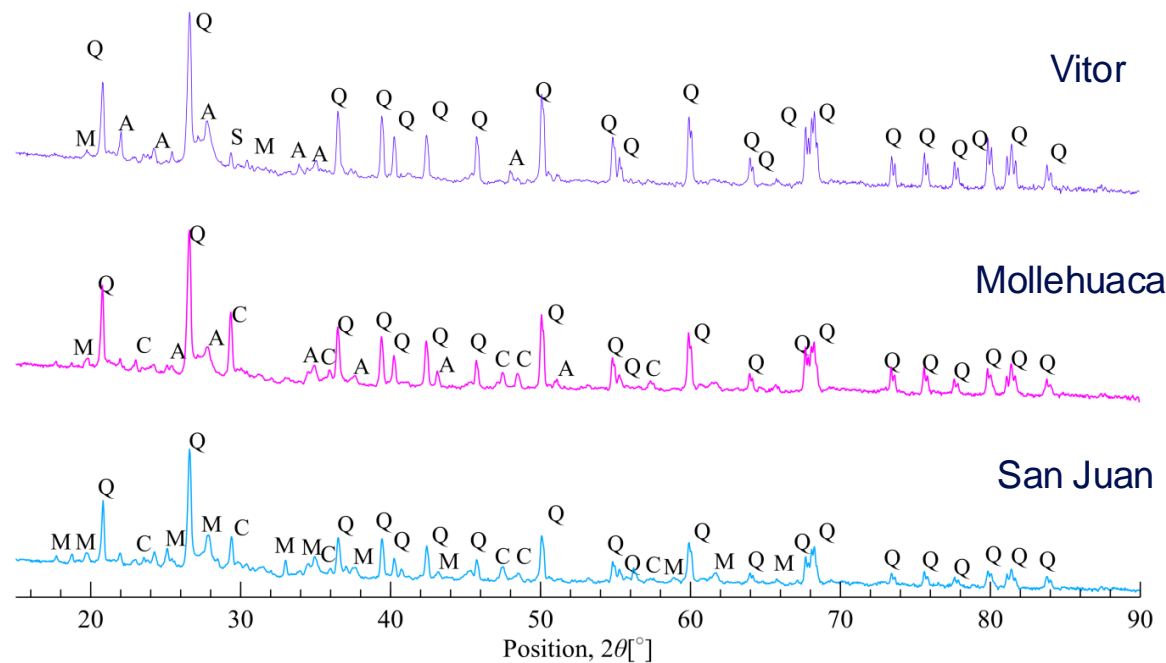


San Juan

Soil Classification

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)

Características mineralógicas de los relaves mineros

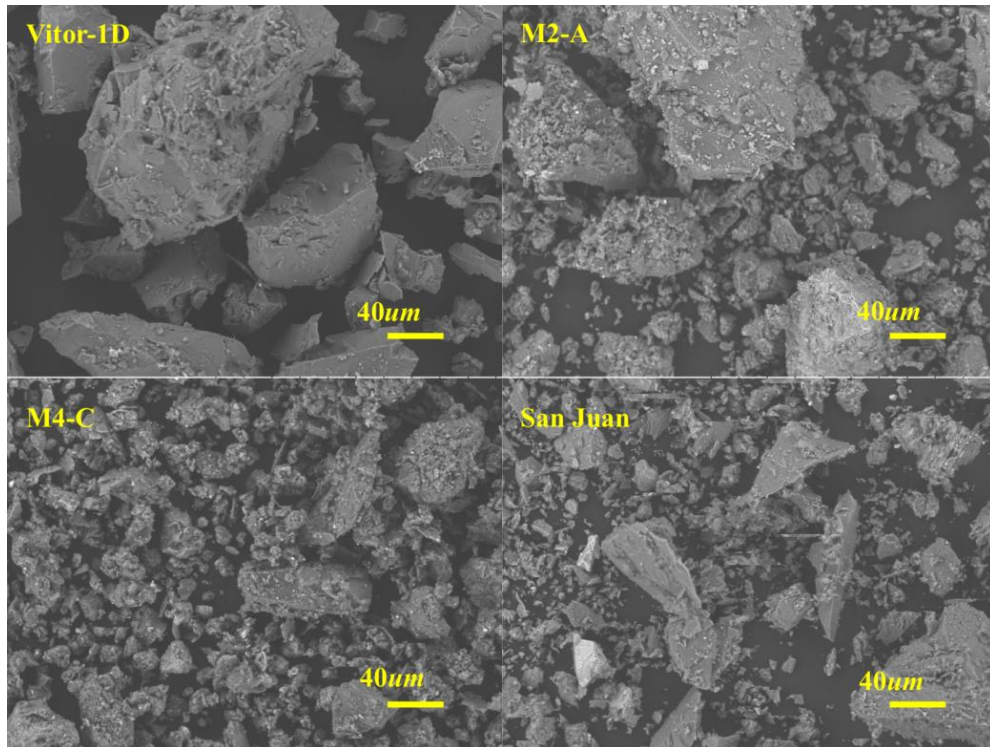


Patrones XRD de Materias Primas

Vitor		
Name	Formula	Percentage (%)
Quartz	SiO ₂	74
Albite	NaAlSi ₃ O ₈	22
Muscovite	(KF) ₂ (Al ₂ O ₃) ₃ (SiO ₂) ₆	4
Mollehuaca		
Name	Formula	Percentage (%)
Quartz	SiO ₂	63
Albite	NaAlSi ₃ O ₈	16
Muscovite	(KF) ₂ (Al ₂ O ₃) ₃ (SiO ₂) ₆	10
Calcite	CaCO ₃	10
San Juan		
Name	Formula	Percentage (%)
Quartz	SiO ₂	54
Muscovite	(KF) ₂ (Al ₂ O ₃) ₃ (SiO ₂) ₆	14
Oligoclase	(Ca,Na)(Al,Si) ₄ O ₈	20
Calcite	CaCO ₃	6

Tipos dominantes de minerales

Características químicas de los relaves mineros



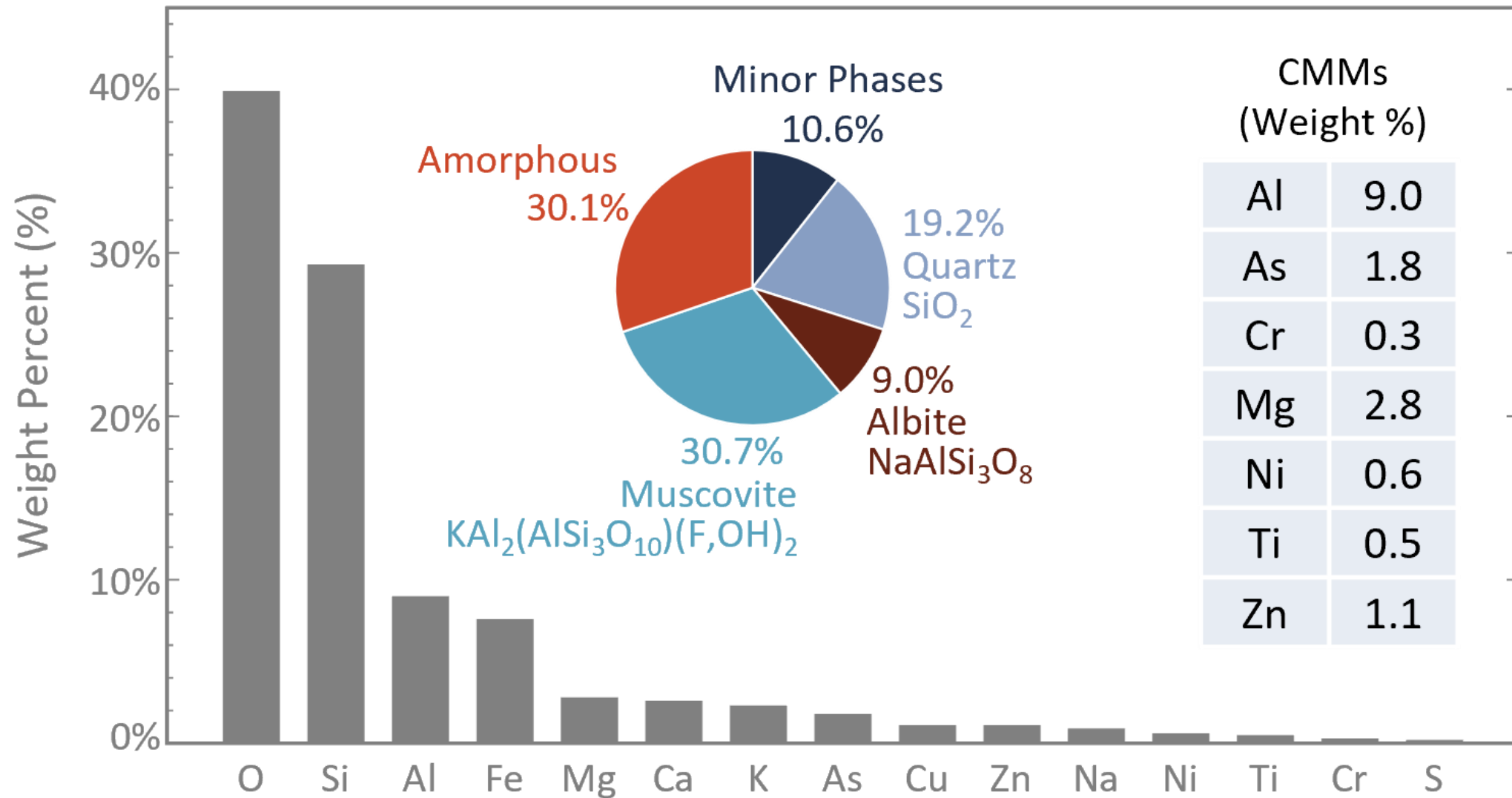
Morfología usando SEM/EDS

Composición química

Element	Weight (%)		
	Vitor	Mollehuaca	San Juan
Si	33	36	32
Al	11	11	16
Fe	10	10	6

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

Características químicas de los relaves mineros



Outline

Introducción

- Reutilización de relaves mineros

Caracterización

- Caracterización Física, Mineralógica y Química

Hormigón geopolímero

- Proceso de producción
- Fuerza y propiedades físicas

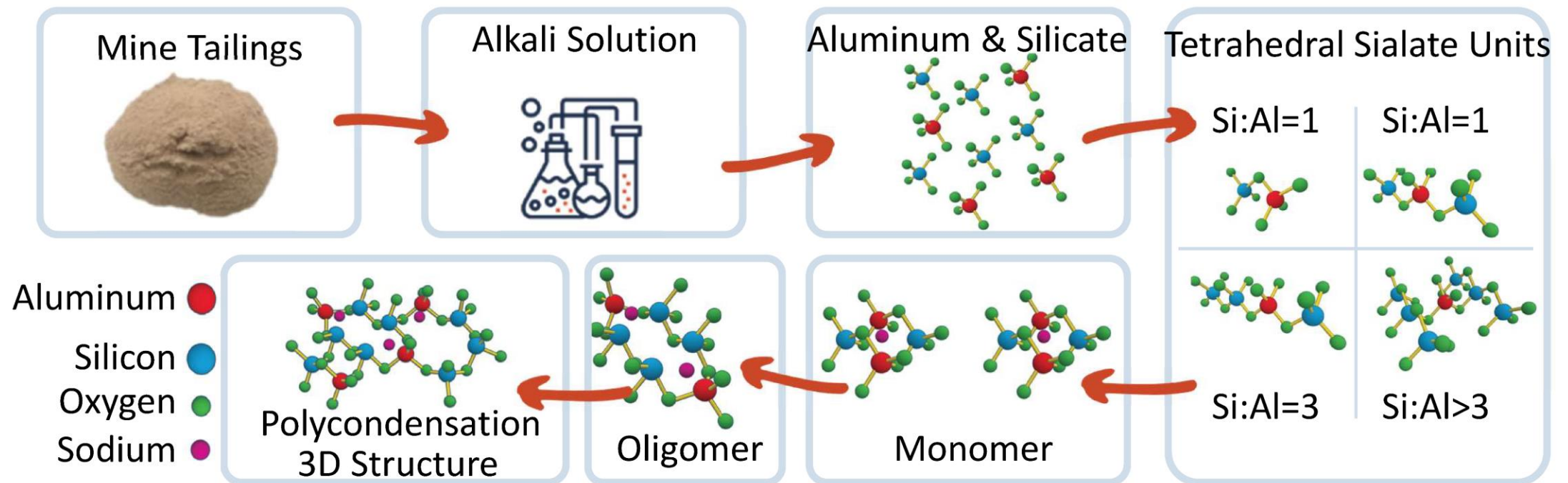
Agregados livianos

- Proceso de producción y propiedades físicas.
- Utilización en hormigón ligero

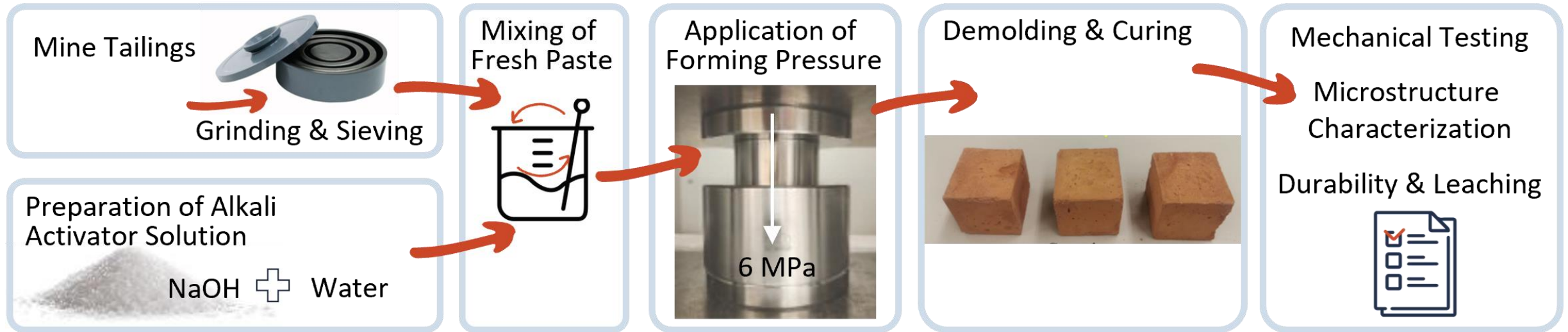
Cerámica

- Proceso de producción y propiedades físicas.
- Comportamiento de fractura

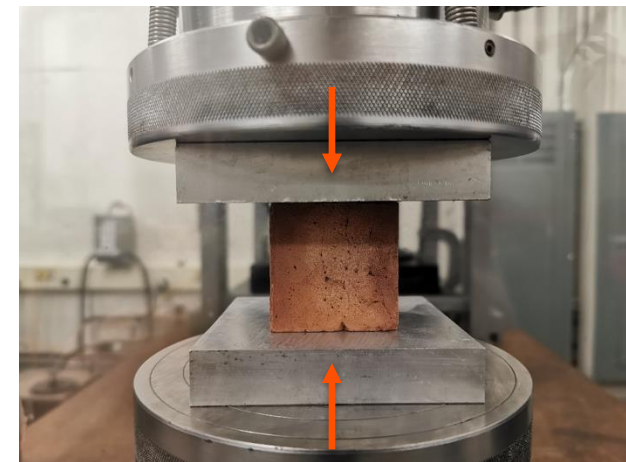
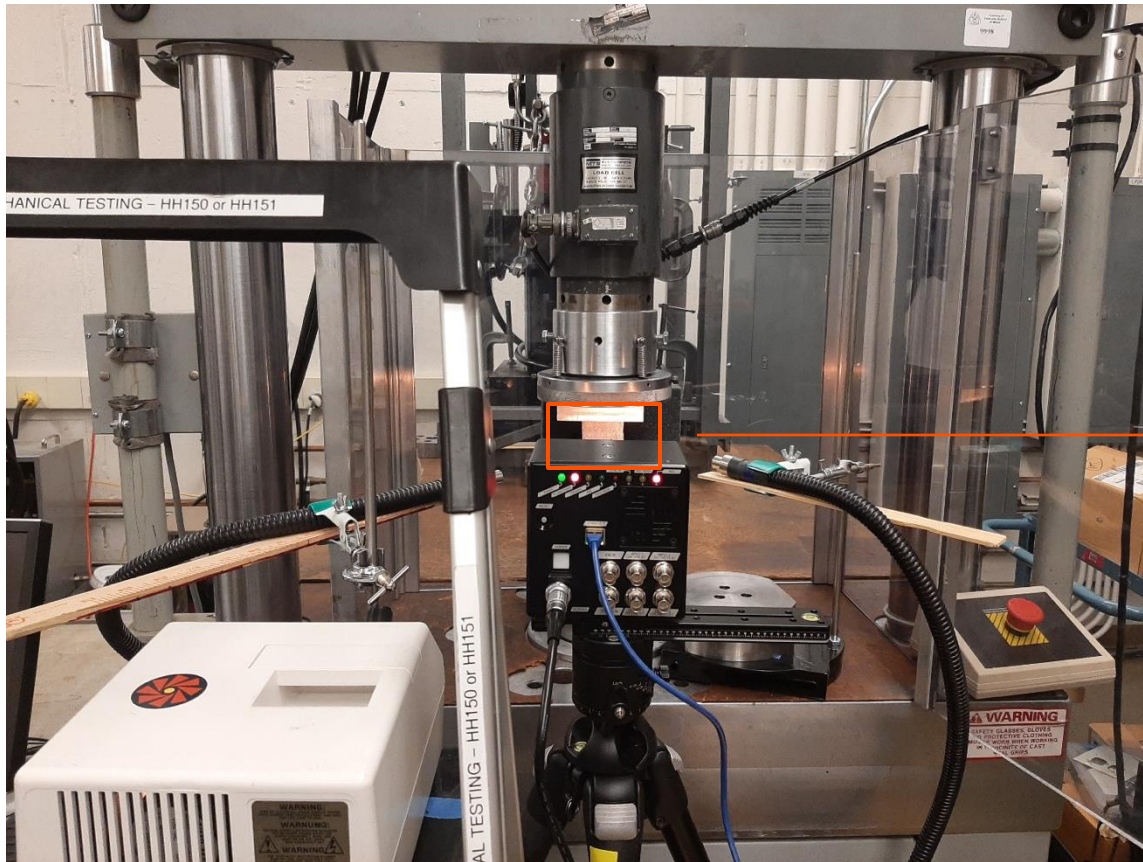
Geopolimerización



Proceso de preparación

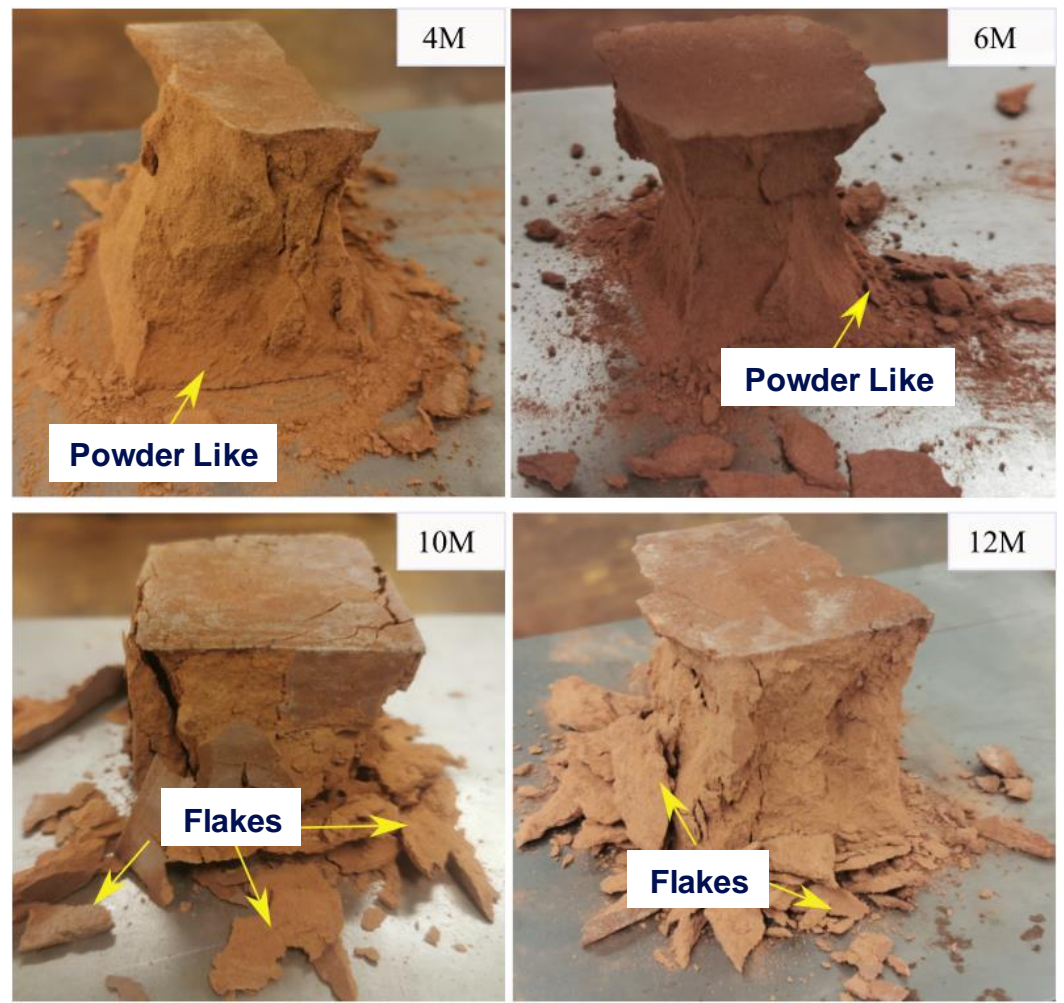
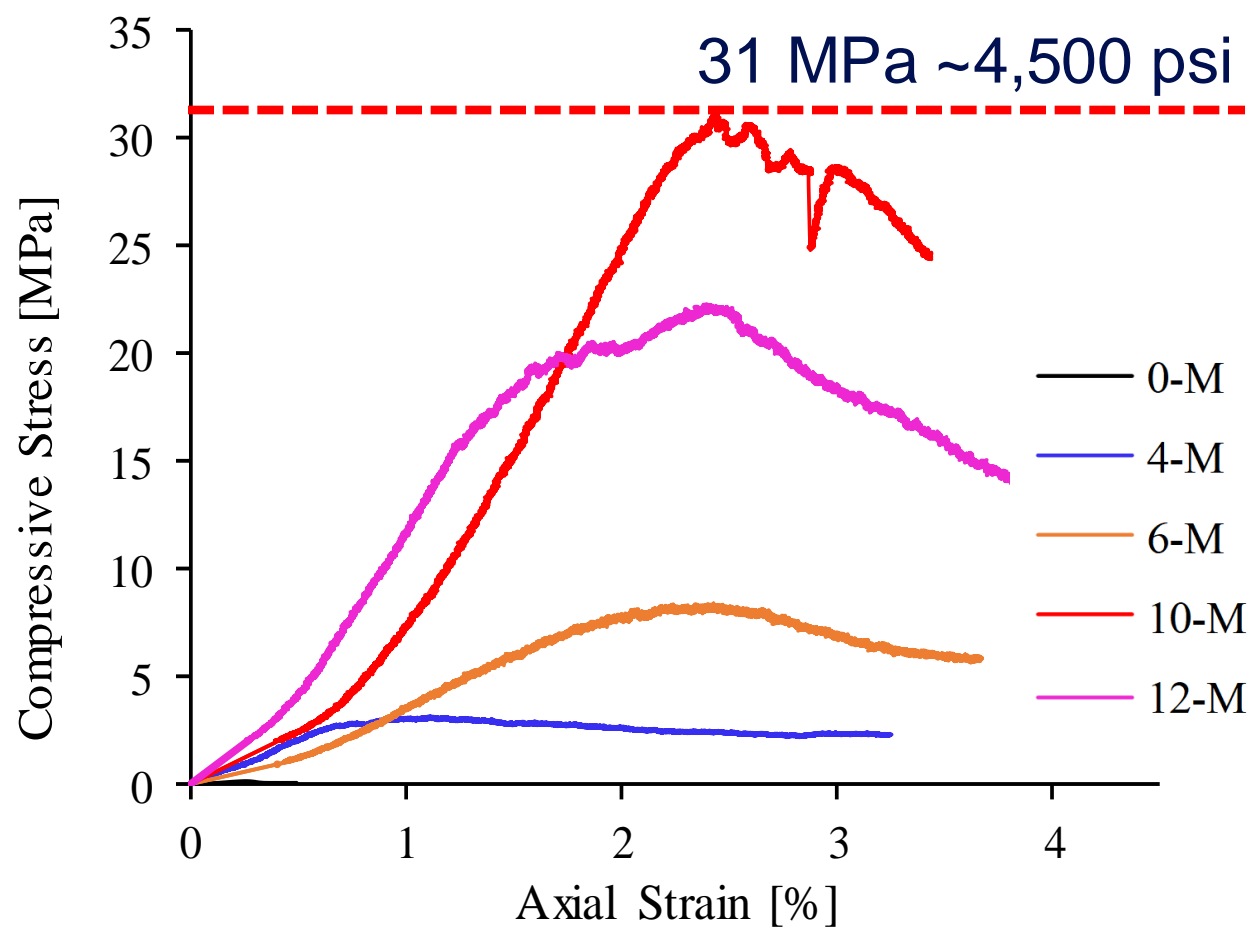


Pruebas de resistencia mecánica

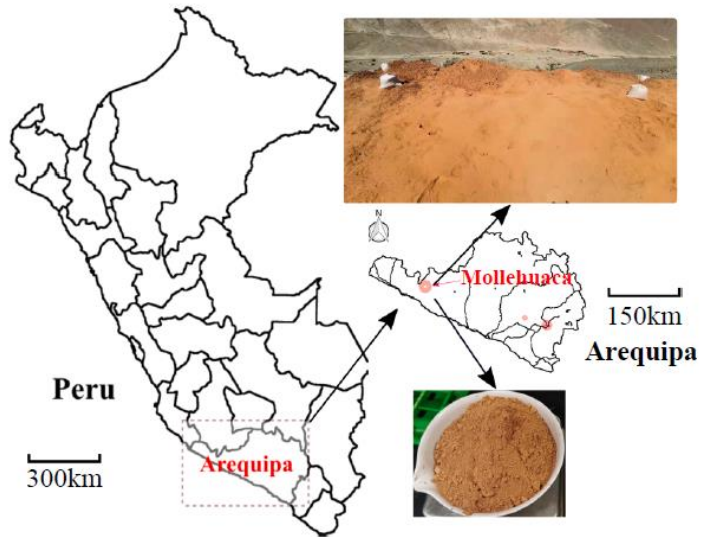


Cubo de 5 cm

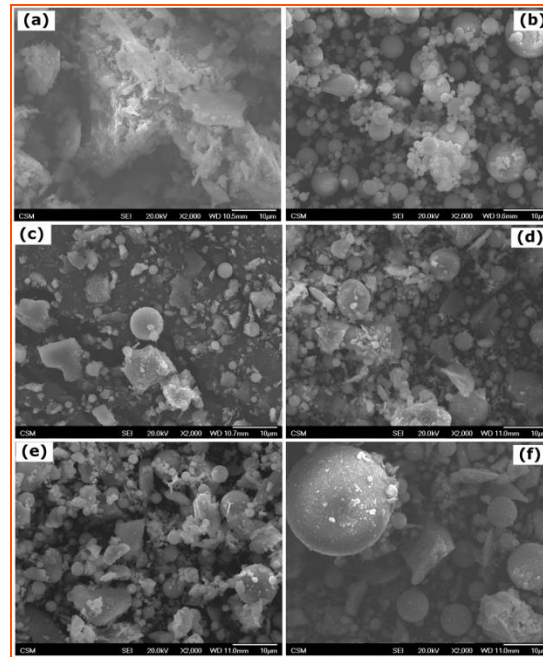
Resistencia de los relaves mineros de geopolímero



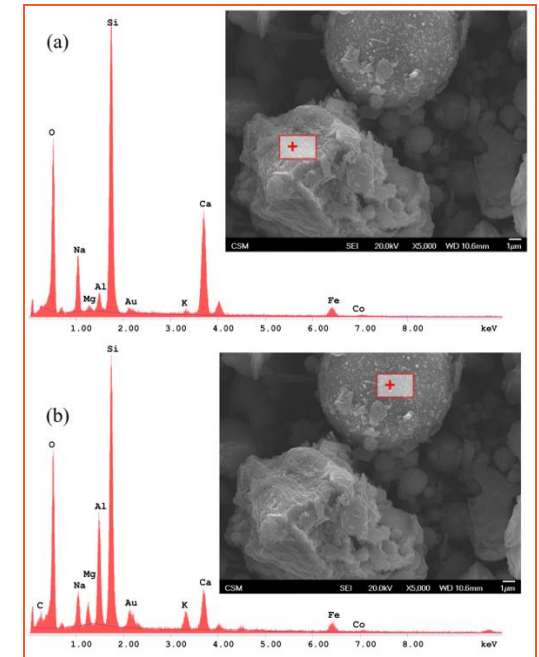
Adición de cenizas volantes a la geopolimerización



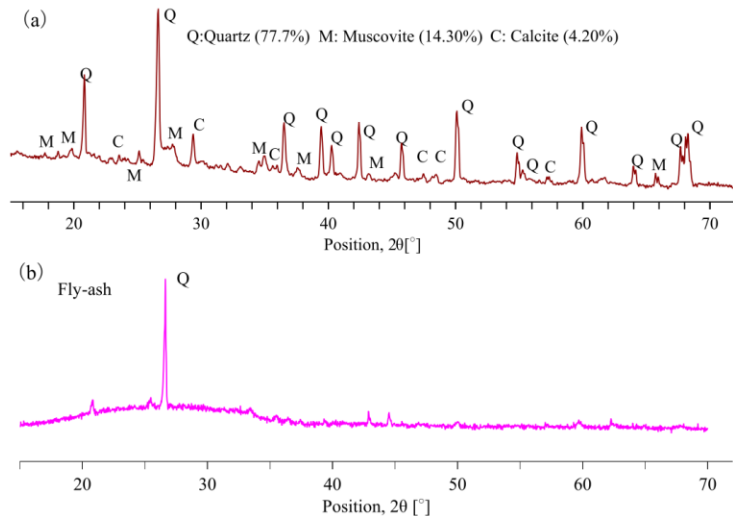
mapa geografico



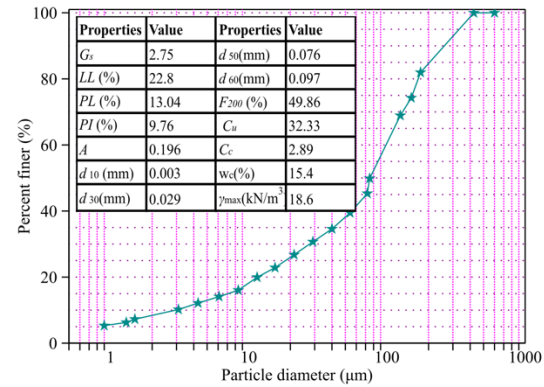
Imágenes SEM



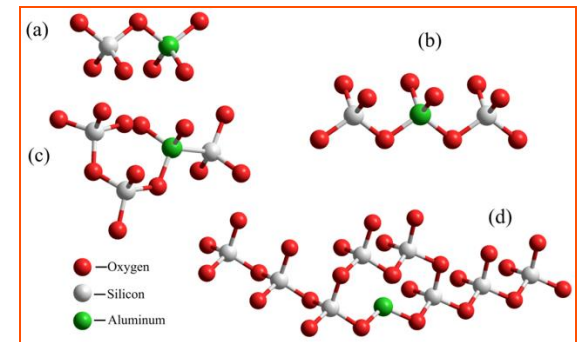
Análisis SEM/EDS



patrones XRD

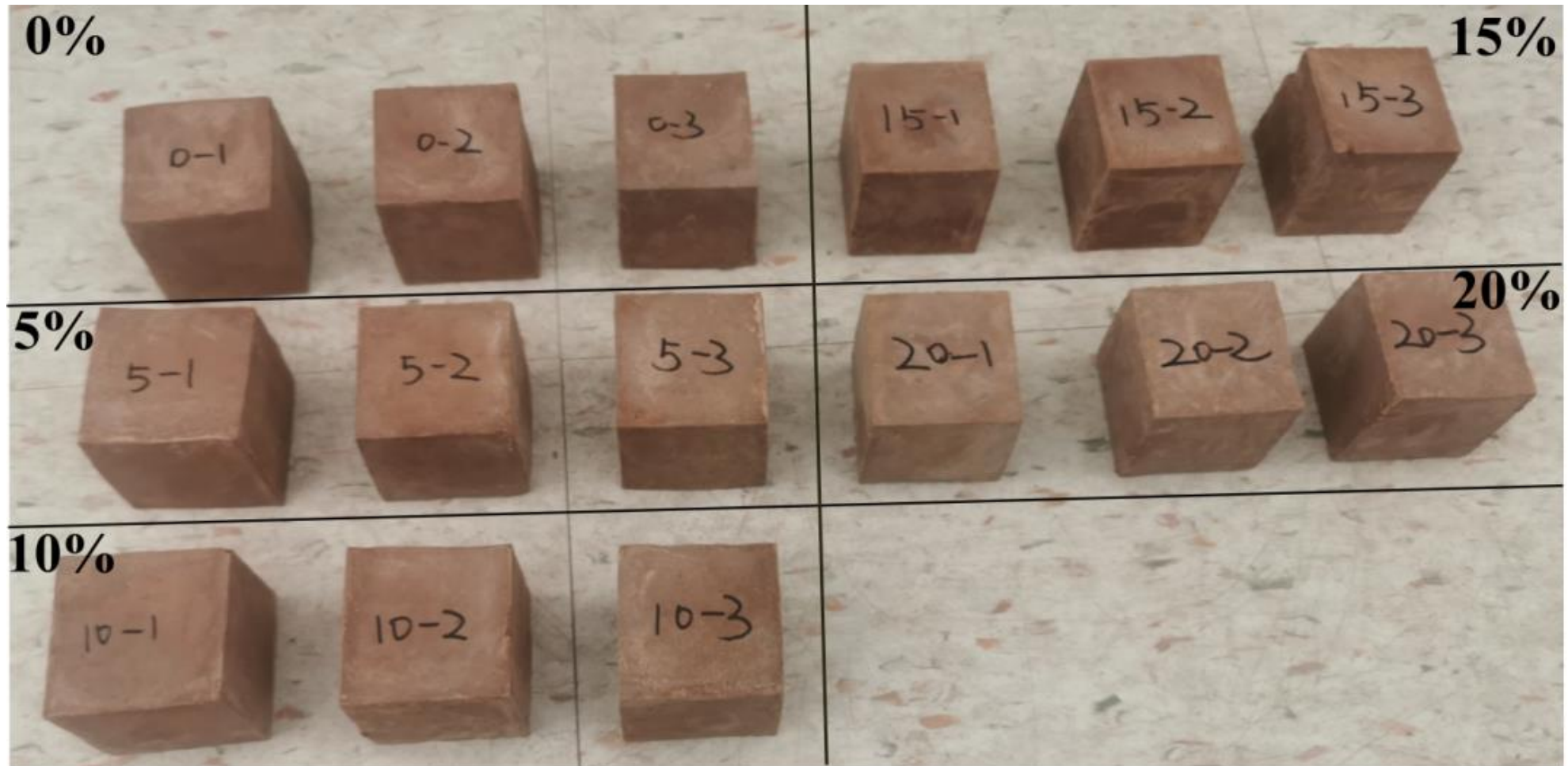


Propiedades geotécnicas



Estructuras celulares de geopolímero

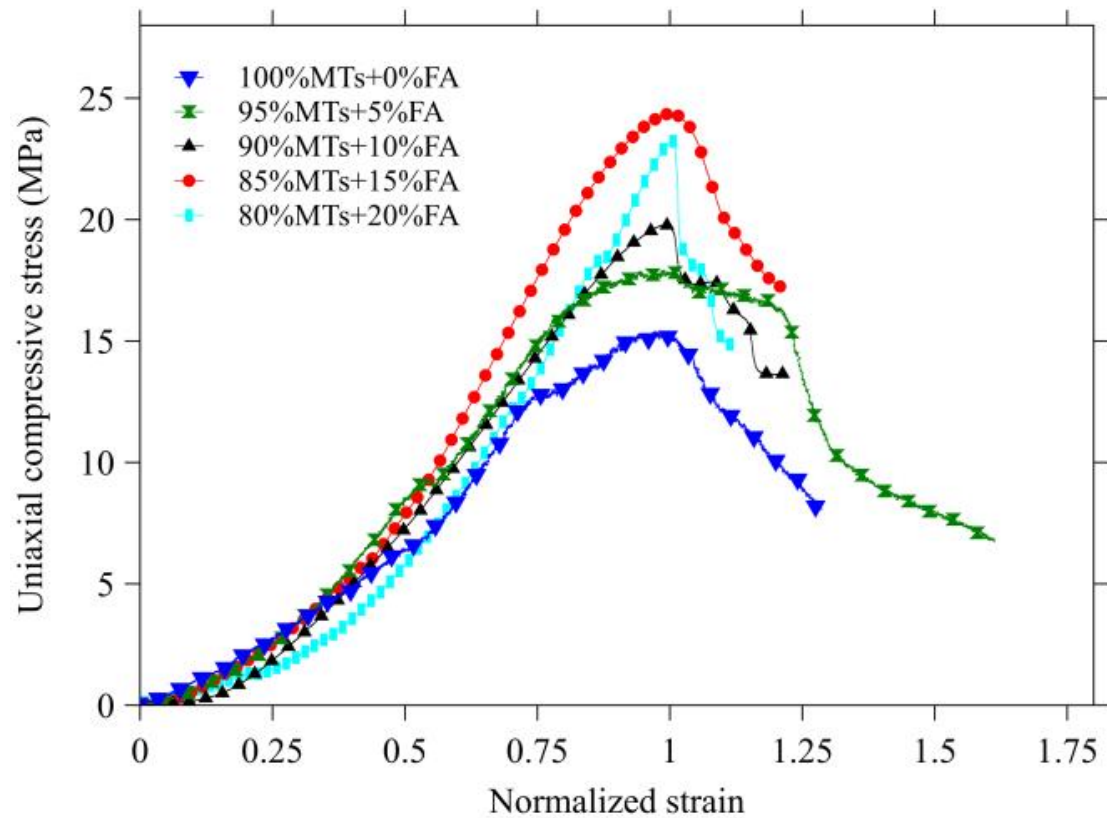
Adición de cenizas volantes a la geopolimerización



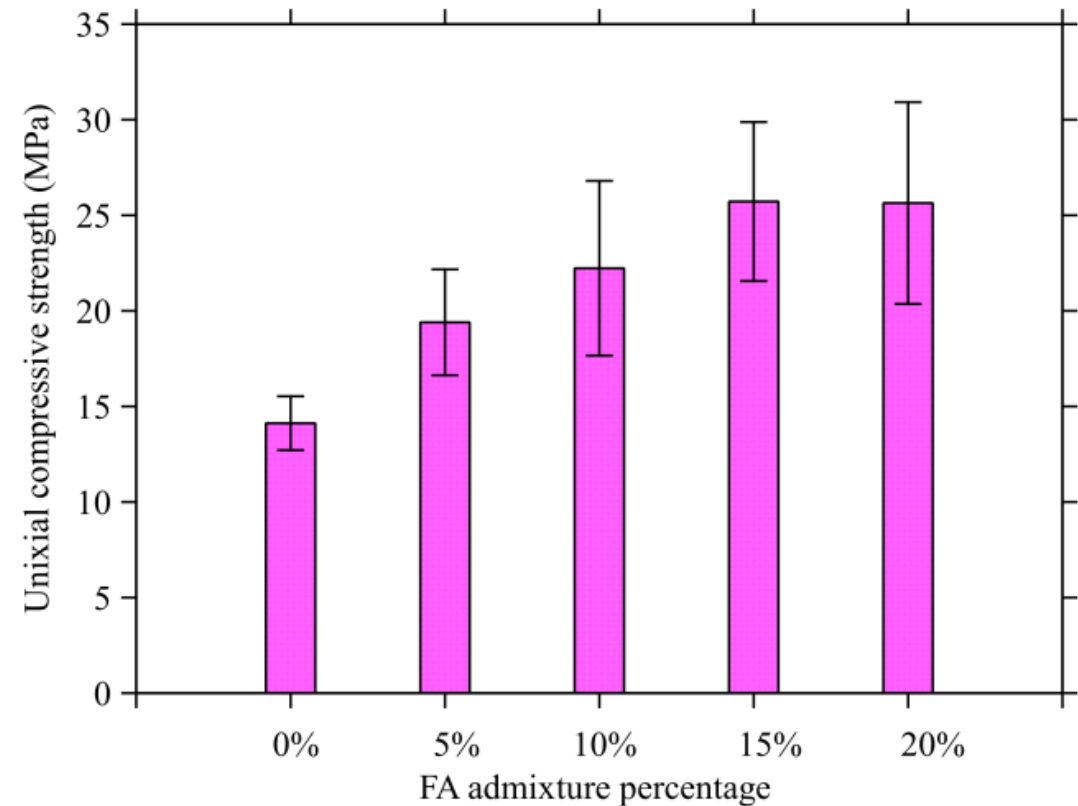
Muestra con diferentes porcentajes de cenizas volantes

Relaves de geopolímero con cenizas volantes

Resistencia a la compresión uniaxial



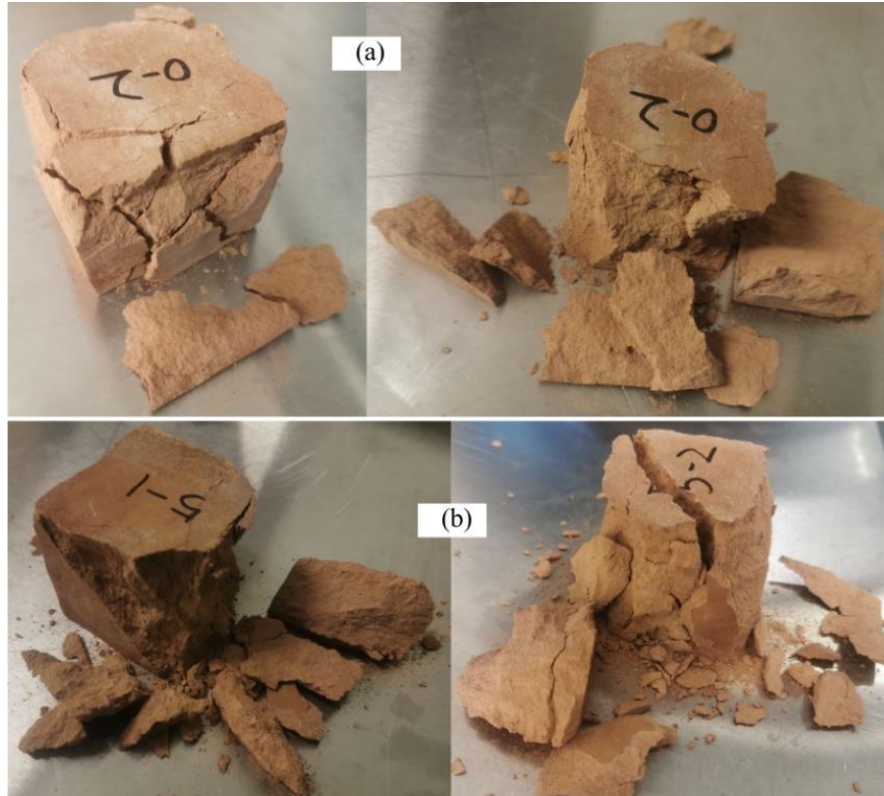
Curvas tensión-deformación



Resistencia a la compresión uniaxial

Relaves de geopolímero con cenizas volantes

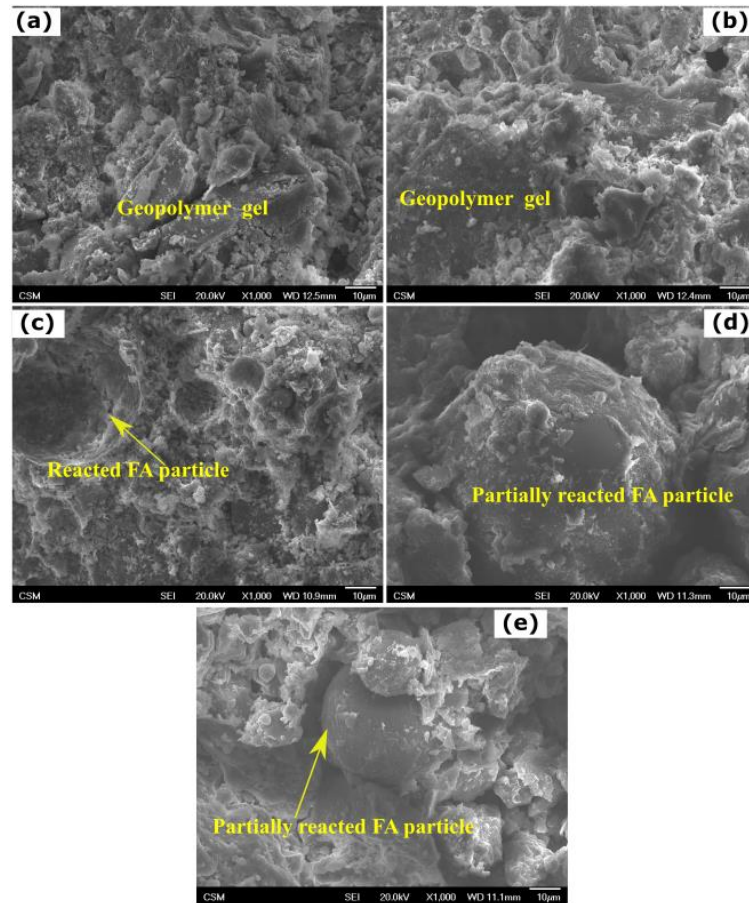
Patrones de falla



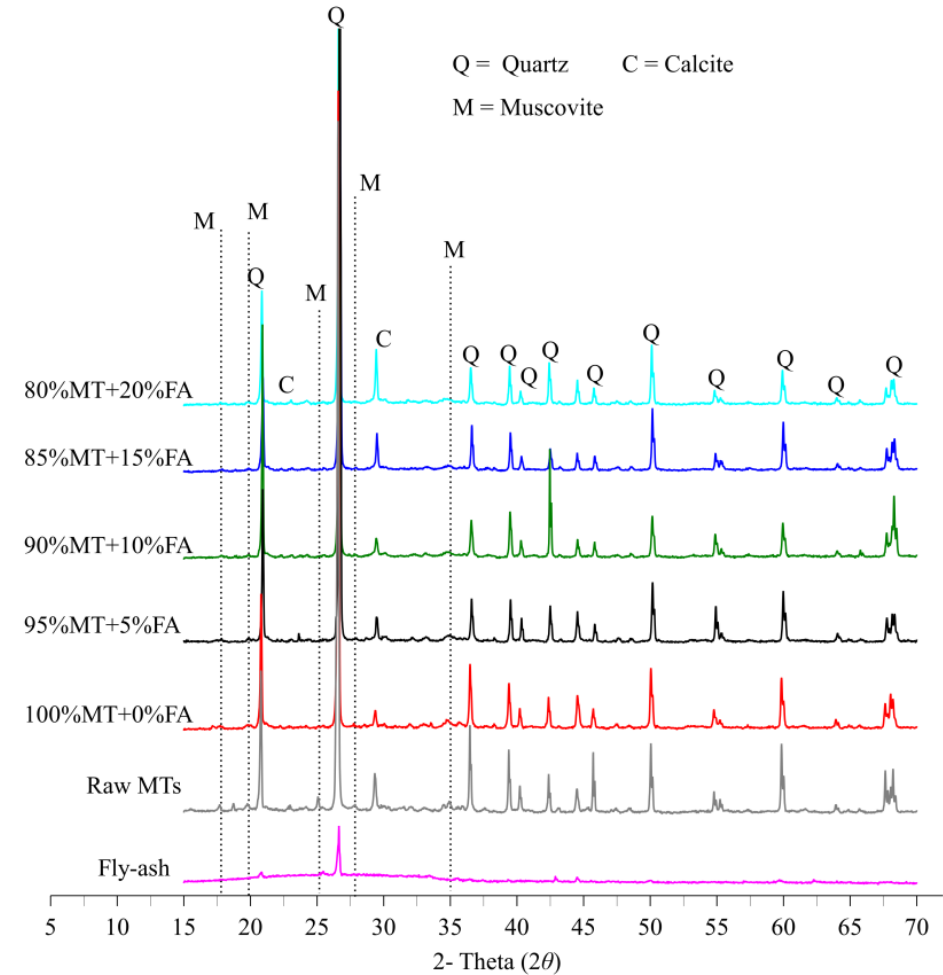
Porcentajes de cenizas volantes (FA):
0%, b) 5%, c) 10%, d) 15%, ye) 20%

Relaves de geopolímero con cenizas volantes

Análisis SEM/EDS



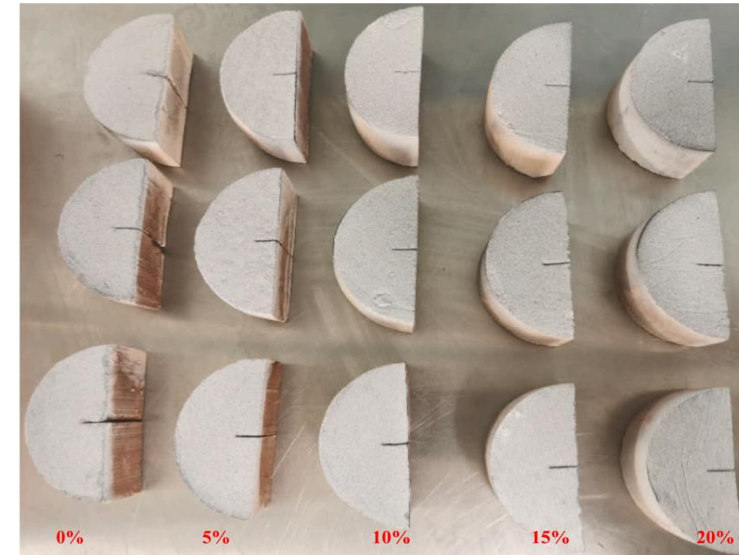
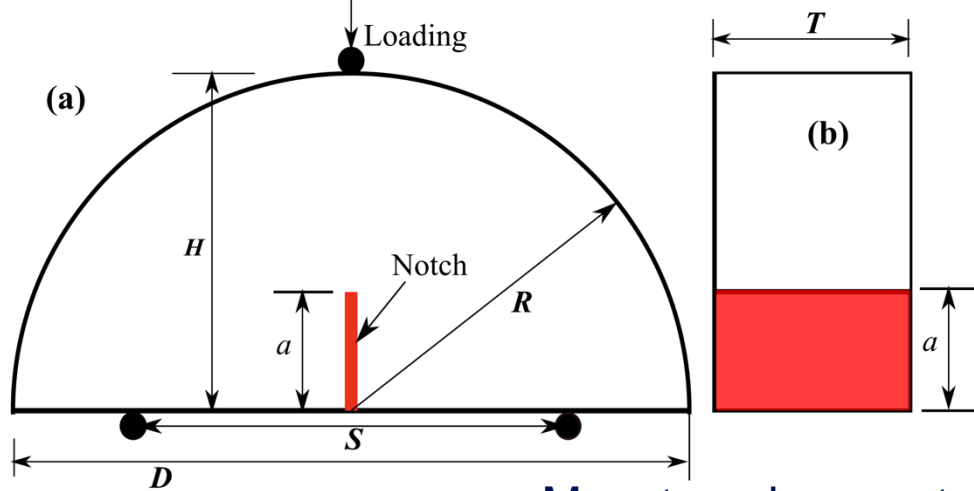
Micrografías SEM de geopolímeros con diferentes porcentajes de FA: a) 0% FA, b) 5% FA, c) 10% FA, d) 15% FA, y e) 20% FA



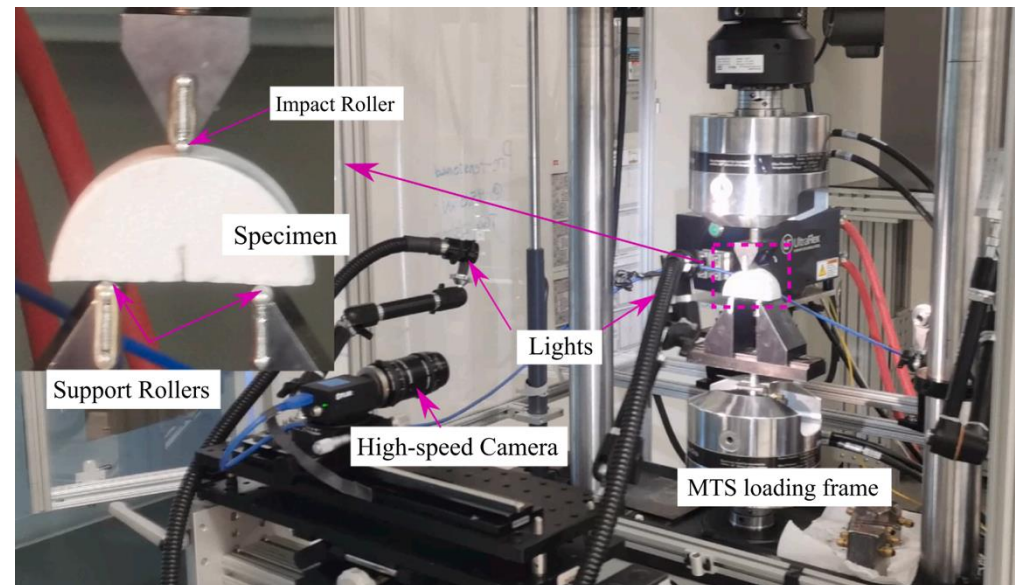
Comparación de los patrones XRD para geopolímeros con diferentes porcentajes de FA

Relaves de geopolímero con cenizas volantes

Pruebas de fractura



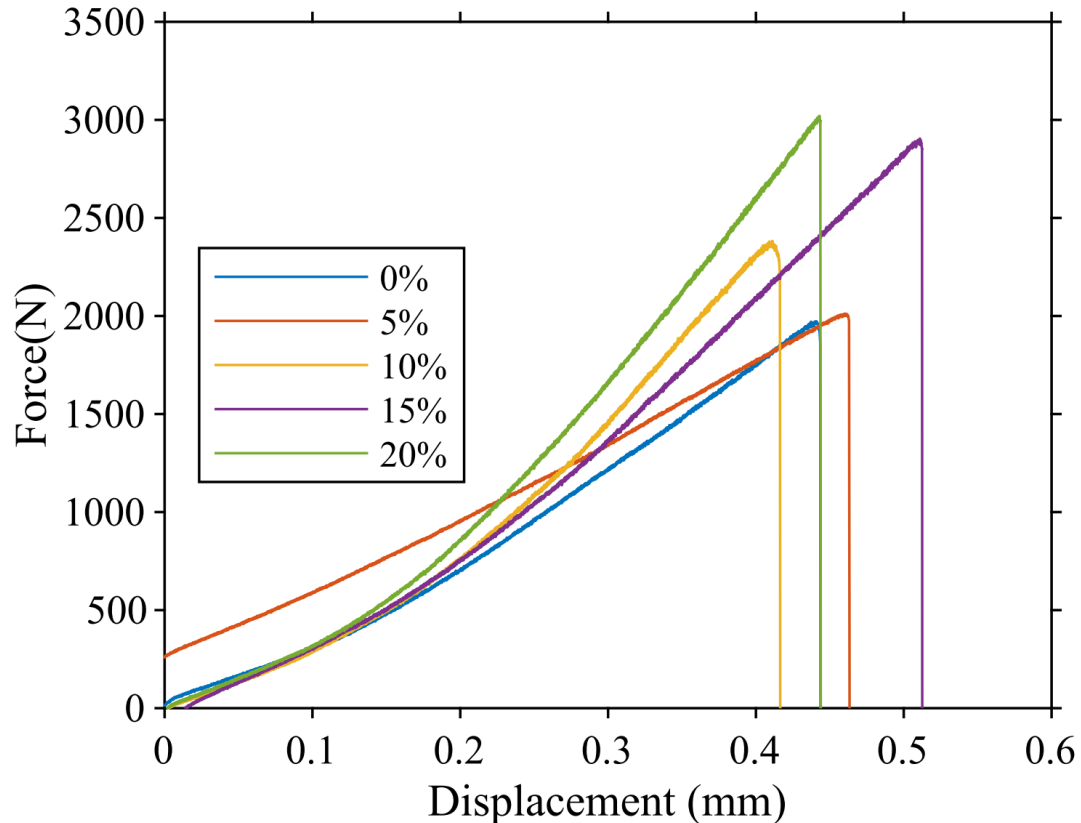
Muestras de curvatura semicircular con muescas



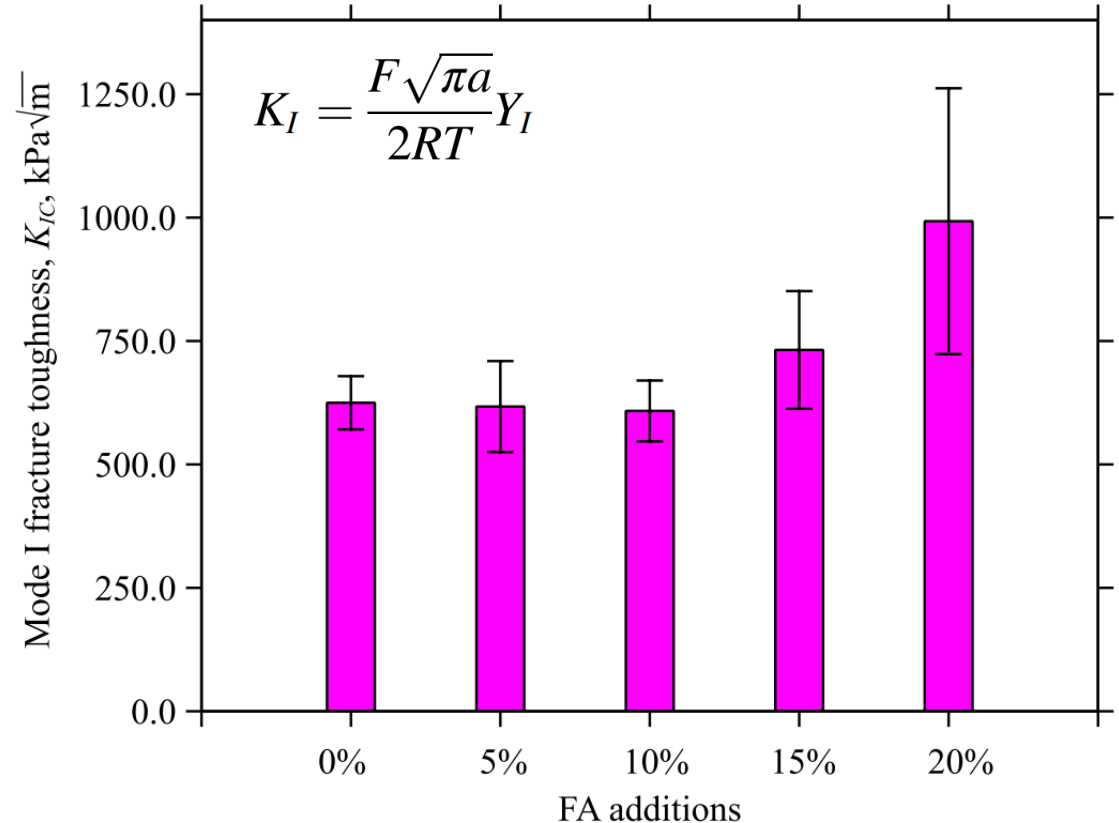
Configuración experimental para pruebas de fractura

Relaves de geopolímero con cenizas volantes

Pruebas de fractura



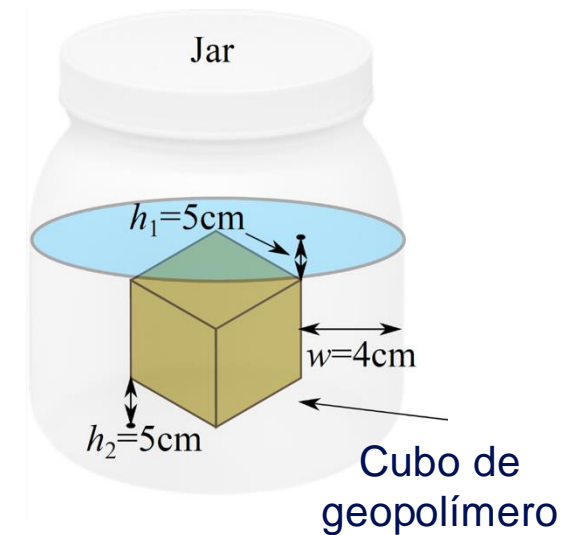
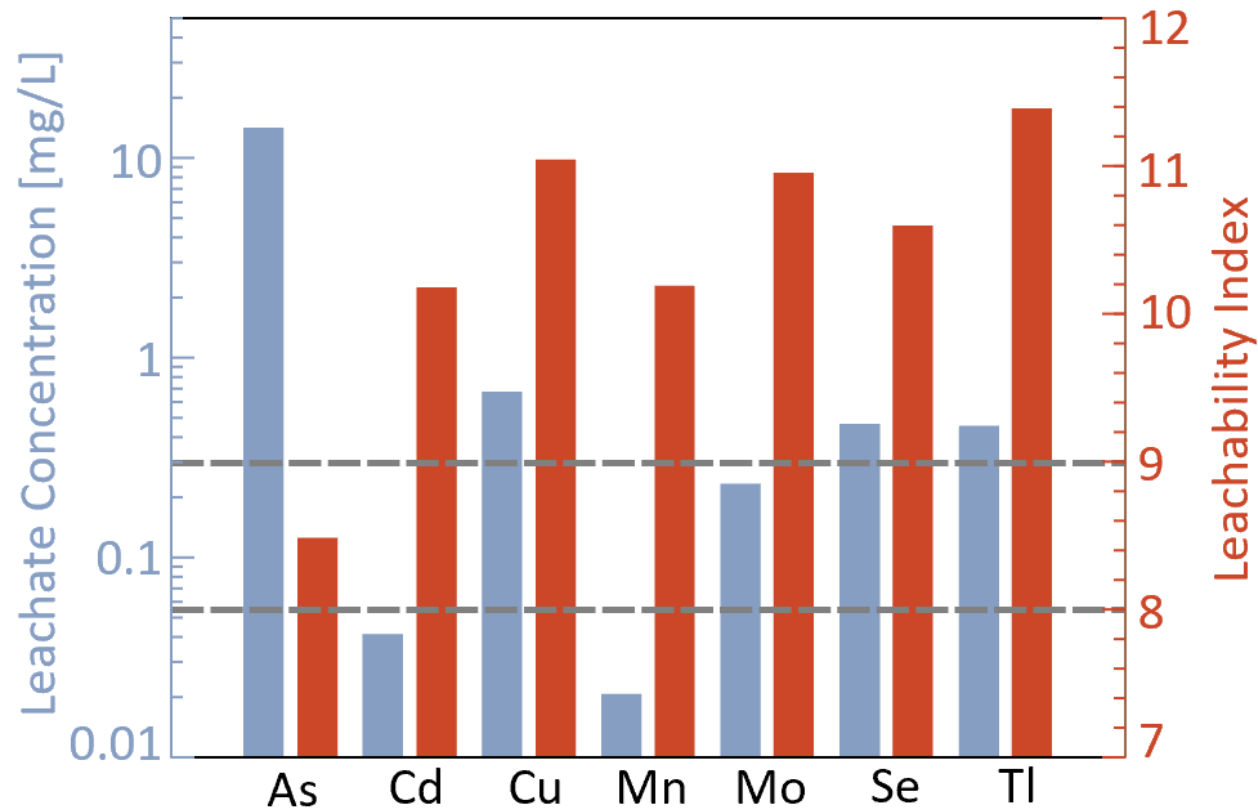
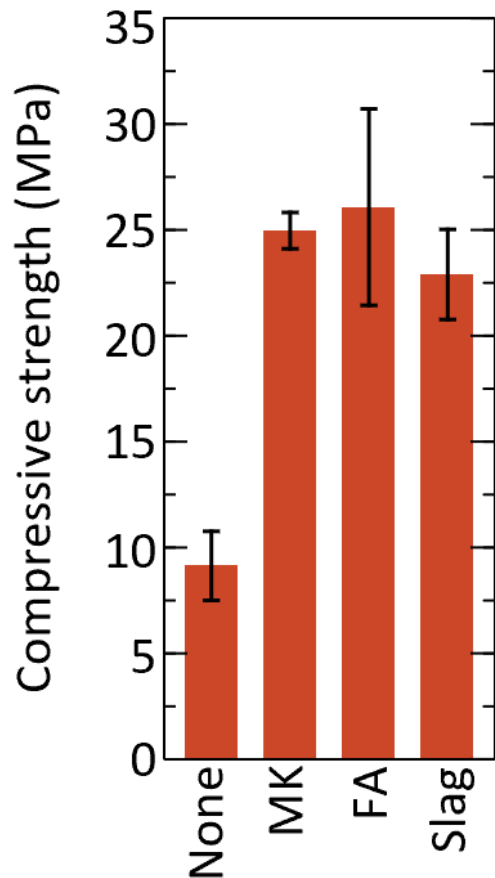
Relación fuerza-desplazamiento
de la muestra SCB



Tenacidad a la fractura modo
I del geopolímero

Relaves de geopolímero con cenizas volantes

Pruebas de lixiviación y durabilidad



Tipos de solución:

- Agua desionizada
- Agua salada
- Agua ácida

Outline

Introducción

- Reutilización de relaves mineros

Caracterización

- Caracterización Física, Mineralógica y Química

Hormigón geopolímero

- Proceso de producción
- Fuerza y propiedades físicas

Agregados livianos

- Proceso de producción y propiedades físicas.
- Utilización en hormigón ligero

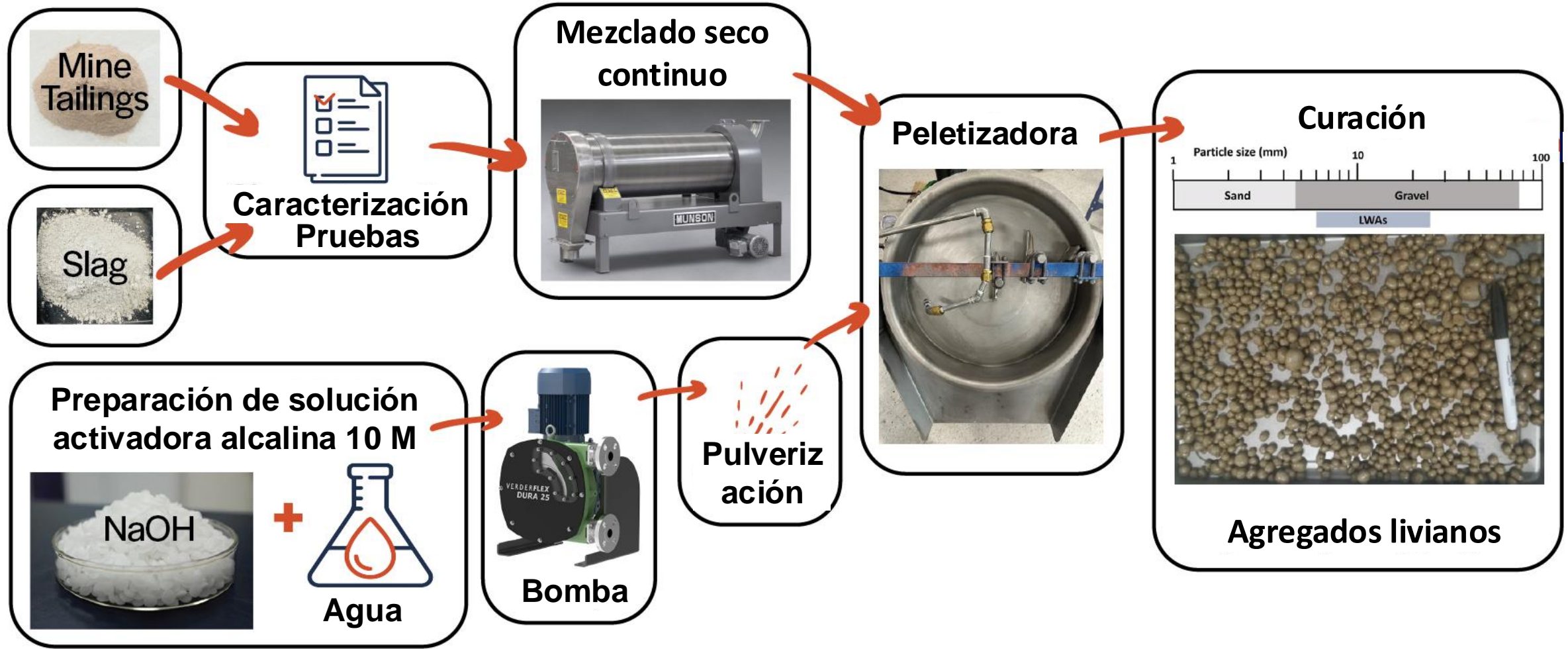
Cerámica

- Proceso de producción y propiedades físicas.
- Comportamiento de fractura

Mercado de agregados livianos



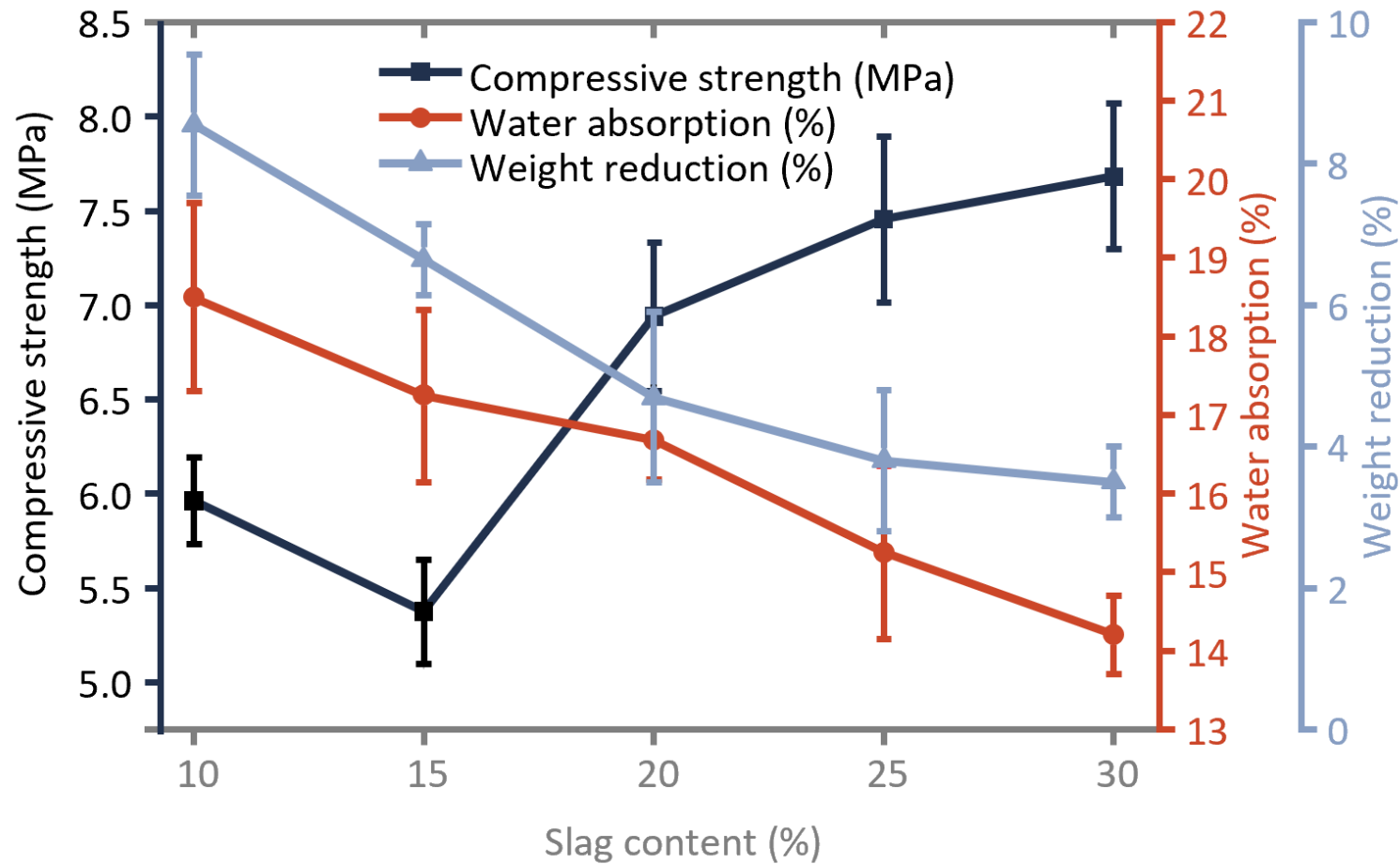
Producción de agregados livianos



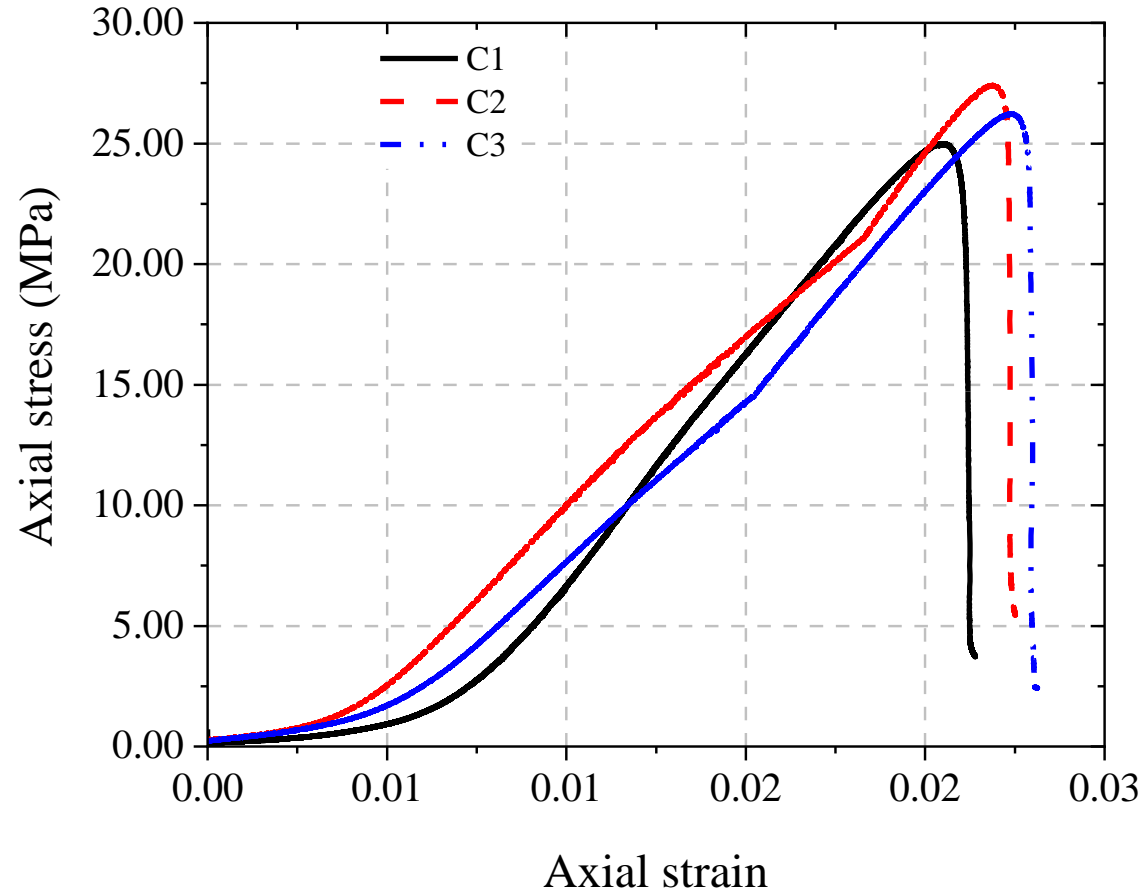
Producción de agregados livianos



Propiedades de agregados livianos



Uso de agregados livianos en concreto



Outline

Introducción

- Reutilización de relaves mineros

Caracterización

- Caracterización Física, Mineralógica y Química

Hormigón geopolímero

- Proceso de producción
- Fuerza y propiedades físicas

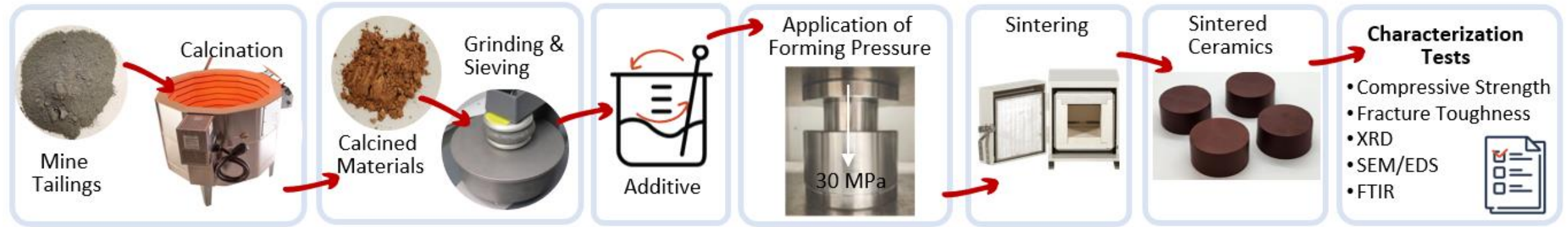
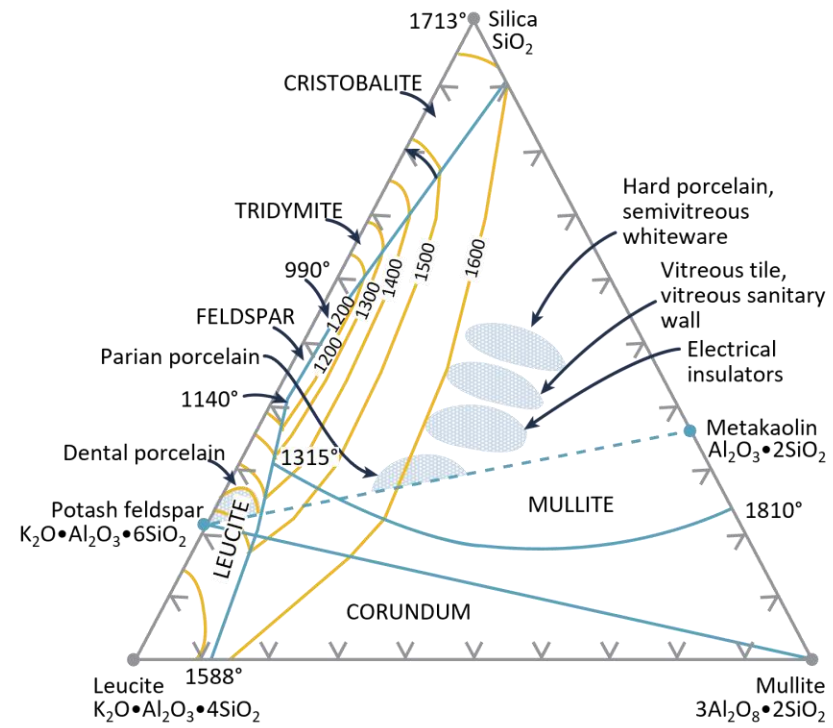
Agregados livianos

- Proceso de producción y propiedades físicas.
- Utilización en hormigón ligero

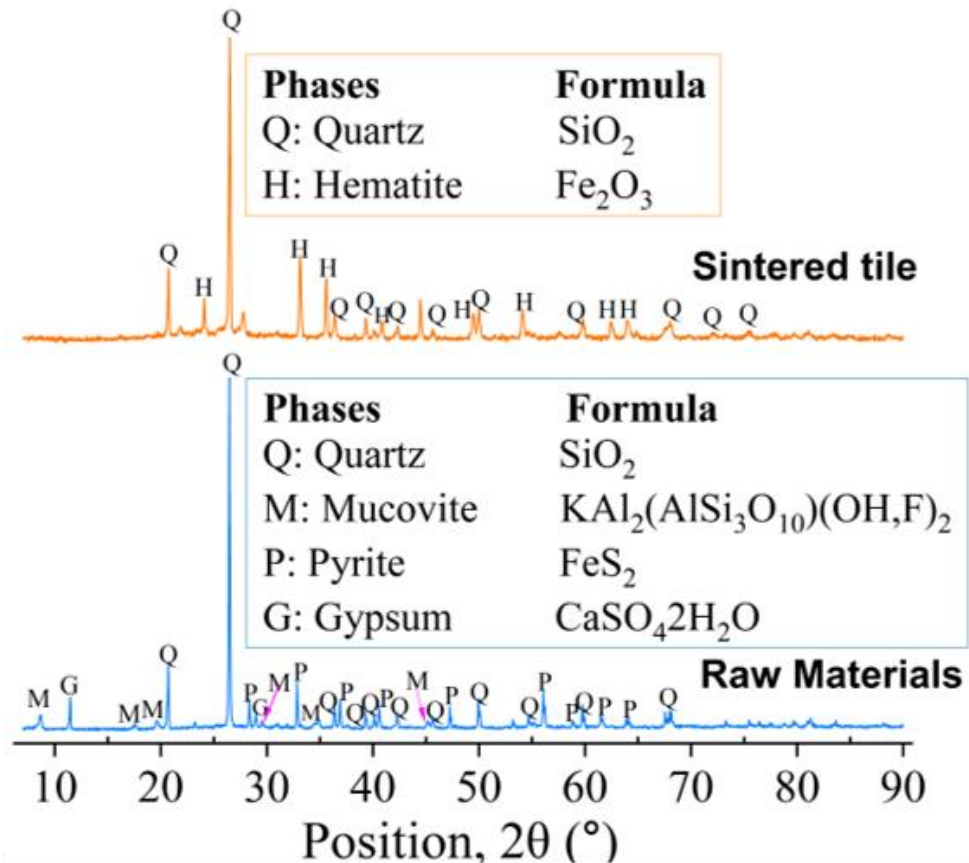
Cerámica

- Proceso de producción y propiedades físicas.
- Comportamiento de fractura

Proceso de producción de cerámica

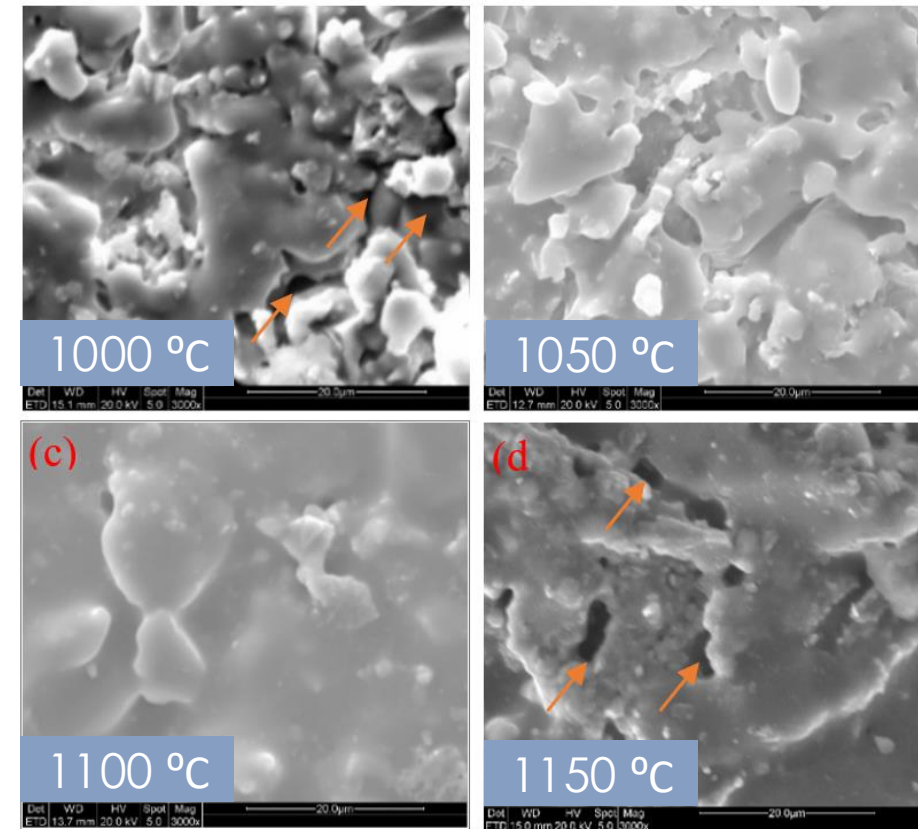


Proceso de producción de cerámica



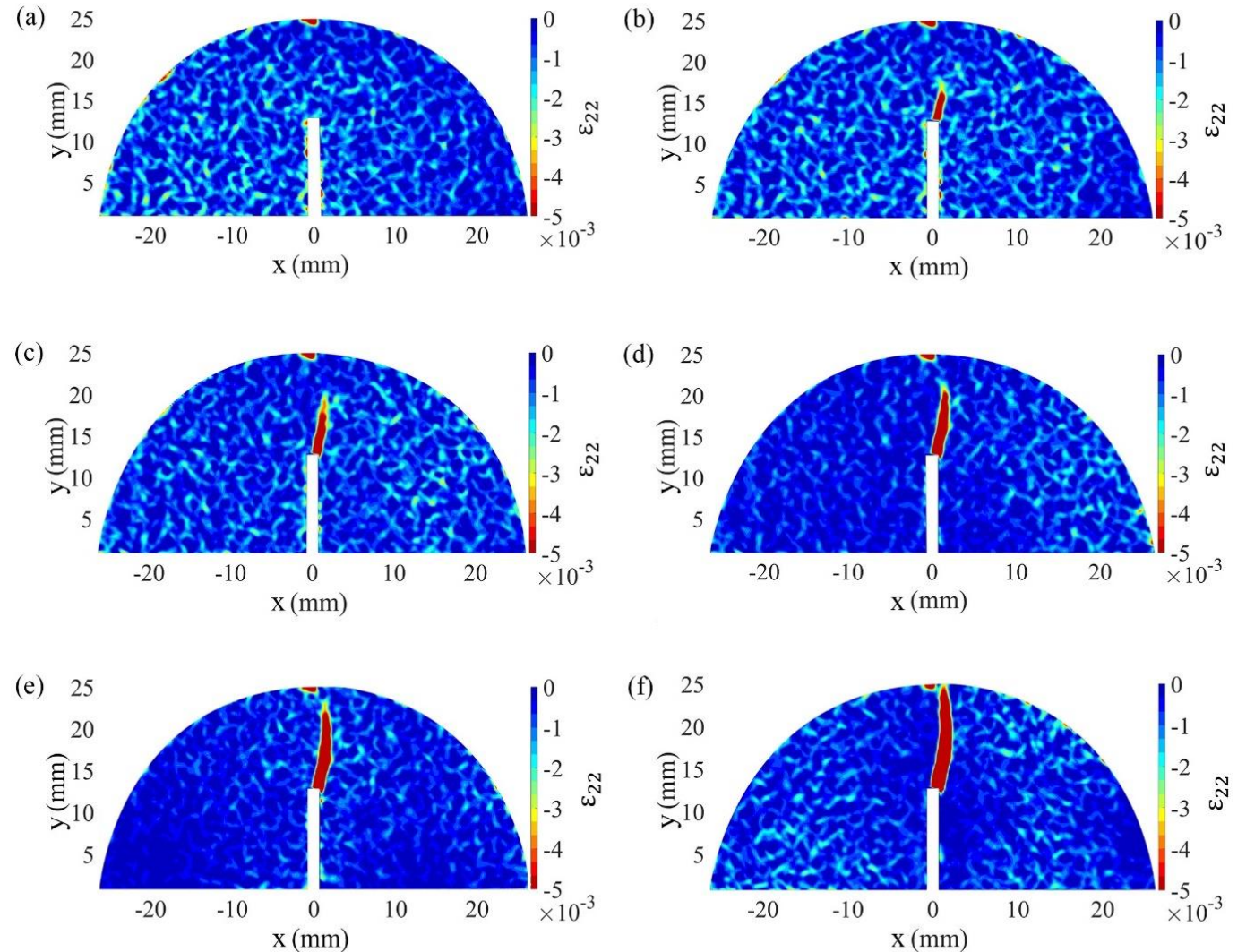
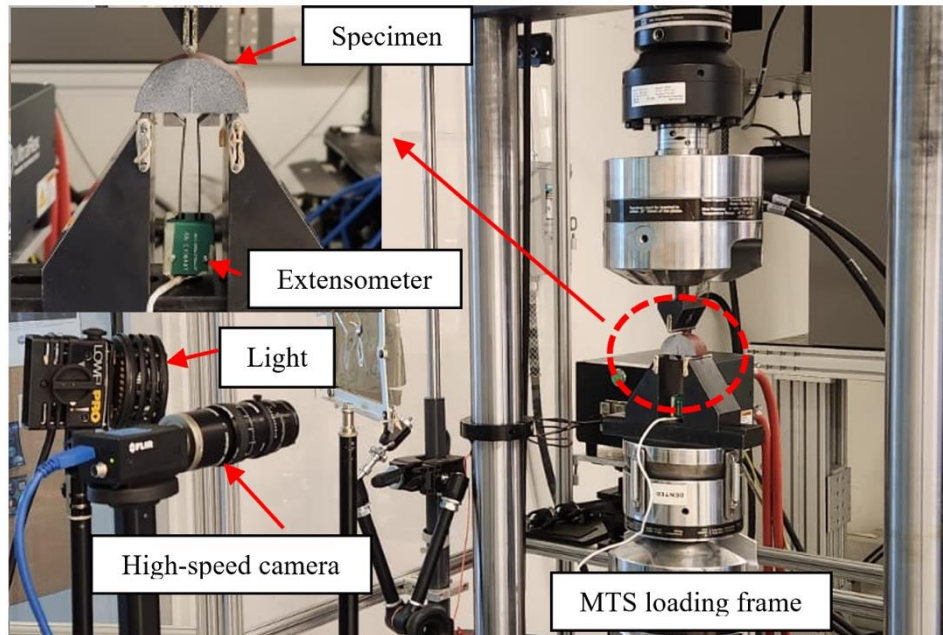
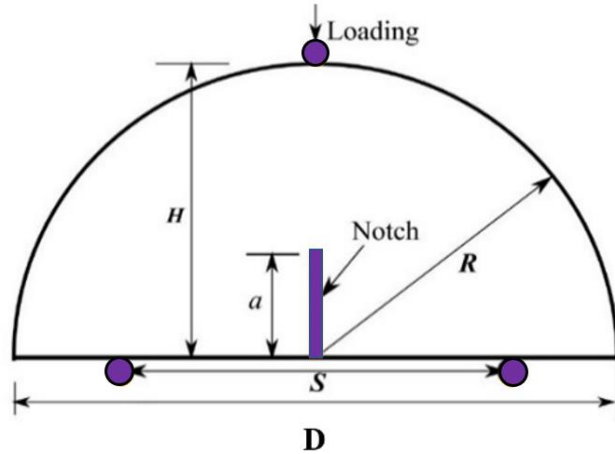
Difracción de rayos X

Propiedades físicas	Temperatura (°C)			
	1000	1050	1100	1150
Densidad (gr/cm ³)	1.91	1.94	2.55	2.09
Porosidad	29.1	27.0	4.6	10.3
Absorción de agua (%)	17.3	15.4	1.9	5.4

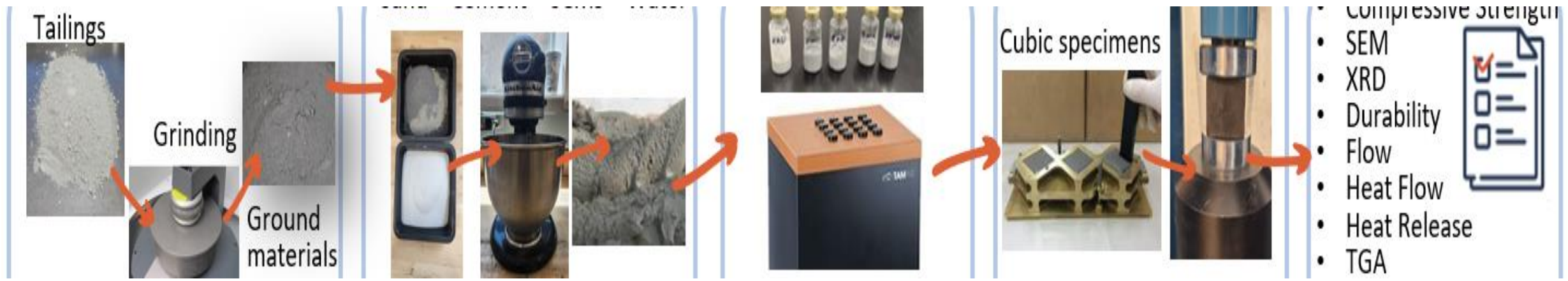


Cerámica de relaves mineros

Pruebas de fractura



Procedimiento de producción y caracterización de SCM



Conclusiones

- El almacenamiento y manejo de relaves mineros plantea importantes problemas económicos y ambientales, por lo que la reutilización de relaves mineros es beneficiosa.
- Los relaves mineros ricos en aluminosilicatos se pueden activar y convertir en hormigón geopolímero, ladrillos y agregados livianos.
- Los geopolímeros producidos mostraron altos niveles de resistencia y la adición de aluminosilicatos amorfos puede ser crucial para ajustar los tipos de estructuras celulares para una mejor geopolimerización.
- Los agregados livianos provenientes de relaves mineros pueden cumplir con los estándares ASTM para uso estructural.
- Los relaves mineros sulfurosos se pueden transformar con éxito en cerámica mediante un proceso que implica calcinación, molienda, conformado y sinterización.

Referencias

- 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.
- 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>
- 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>.
- 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>
- 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>.
- 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>
- 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>.
- 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>
- 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>
- 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>.

Referencias

- 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.
- 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>.
- 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>.
- Asadzadeh, Mostafa, Ahmadrza Hedayat, Lori Tunstall, Juan Antonio Vega Gonzalez, Jorge Wilfredo Vera Alvarado, and Martin Taboada Neira. "The impact of slag on the process of geopolymerization and the mechanical performance of mine-tailings-based alkali-activated lightweight aggregates." *Construction and Building Materials* 411 (2024): 134347.
- Asadzadeh, Mostafa, Cara Clements, Ahmadrza Hedayat, Lori Tunstall, Juan Antonio Vega Gonzalez, Jorge Wilfredo Vera Alvarado, and Martin Taboada Neira. "The effect of class F fly ash on the geopolymerization and compressive strength of lightweight aggregates made from alkali-activated mine tailings." *Construction and Building Materials* 395 (2023): 132275.
- Asadzadeh, M., A. Hedayat, L. Tunstall, M. Taboada Neira, J. A. Vega González, and J. W. Verá Alvarado. "Mechanical properties of lightweight aggregates produced from mine tailings via alkali-activation." In *ARMA US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*, pp. ARMA-2023. ARMA, 2023.
- Asadzadeh, M., A. Hedayat, L. Tunstall, M. Taboada Neira, J. A. Vega González, and J. W. Verá Alvarado. "Investigation of Mode II Fracture Behavior of Alkali-Activated Mine Tailings." In *ARMA US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*, pp. ARMA-2023. ARMA, 2023.
- Asadzadeh, M., A. Hedayat, L. Tunstall, M. Taboada Neira, J. A. Vega González, and J. W. Verá Alvarado. "Mode I fracture behavior of lightweight concrete made of mine-tailings-based aggregates." *The 58th US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium held in Golden, Georgia, USA, 23-26 June 2024*.
- Shabani, F., M. Asadzadeh, A. Hedayat, L. Tunstall, B. P. Gorman, M. Taboada Neira, J. A. Vega González, and J. W. Verá Alvarado. "Production of Ceramic from Sulfidic Mine Tailings and Investigation of Fracture Toughness Under Mode I Loading." In *ARMA US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*, pp. ARMA-2023. ARMA, 2023.

INSTITUTO PARA INICIATIVAS EN LATINO AMERICA

INSTITUTE FOR INITIATIVES IN LATIN AMERICA

Thank You! – ¡Muchas Gracias!

Email: hedayat@mines.edu

Instituto
para Iniciativas
en Latinoamerica



UNIVERSIDAD NACIONAL DE TRUJILLO
UNT



UNIVERSIDAD NACIONAL
DE MOQUEGUA



UNIVERSIDAD NACIONAL
SANTIAGO ANTÚÑEZ DE MAYO
"Una Nueva Universidad para el Desarrollo"