

Universidad Católica de Santa María

Escuela de Postgrado

**Maestría de Proyección, Construcción y Gestión de
Viviendas Colectivas**



EVALUACIÓN DE NUEVOS MATERIALES ALIGANTES ALTERNATIVOS AL CEMENTO PORTLAND TRADICIONAL PARA SU POTENCIAL APLICACIÓN EN LA CONSTRUCCIÓN DE VIVIENDAS

Tesis presentada por el Bachiller:

Mayta Ponce, Denis Leonardo

Para optar el Grado Académico de:

**Maestro en Proyección,
Construcción y Gestión de
Viviendas Colectivas**

Asesor:

**PH.D. Huamán Mamani, Fredy
Alberto**

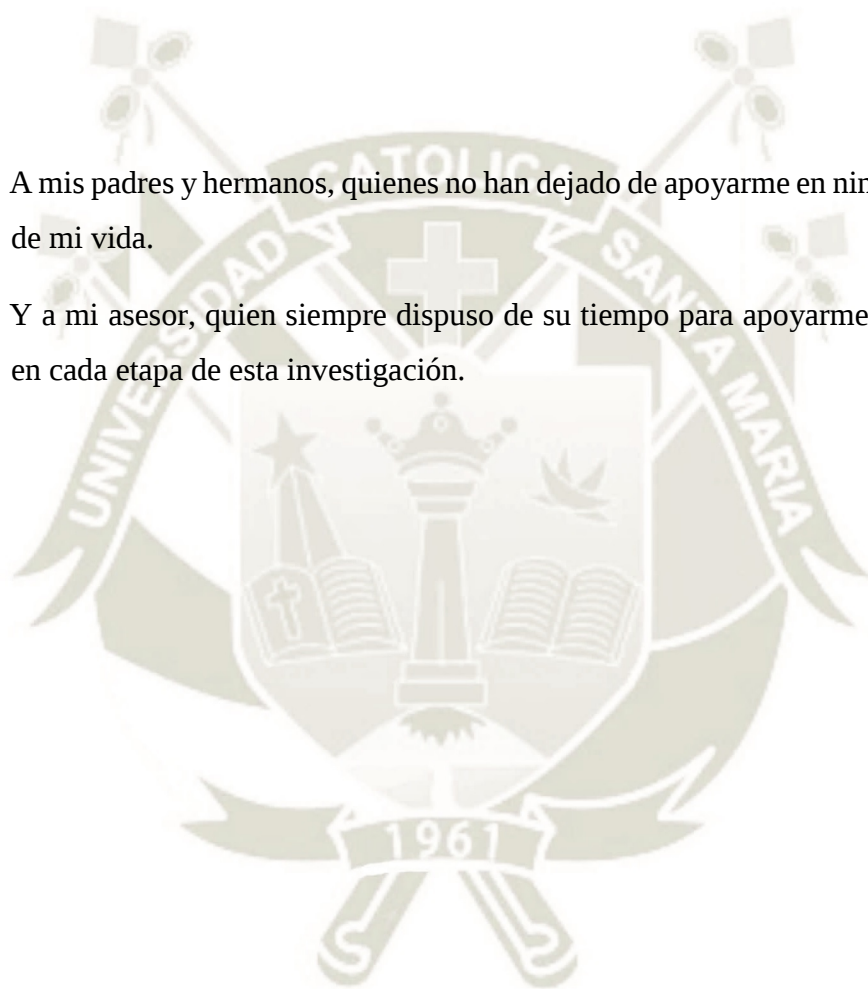
Arequipa – Perú

2019

I. Dedicatoria

A mis padres y hermanos, quienes no han dejado de apoyarme en ningún momento de mi vida.

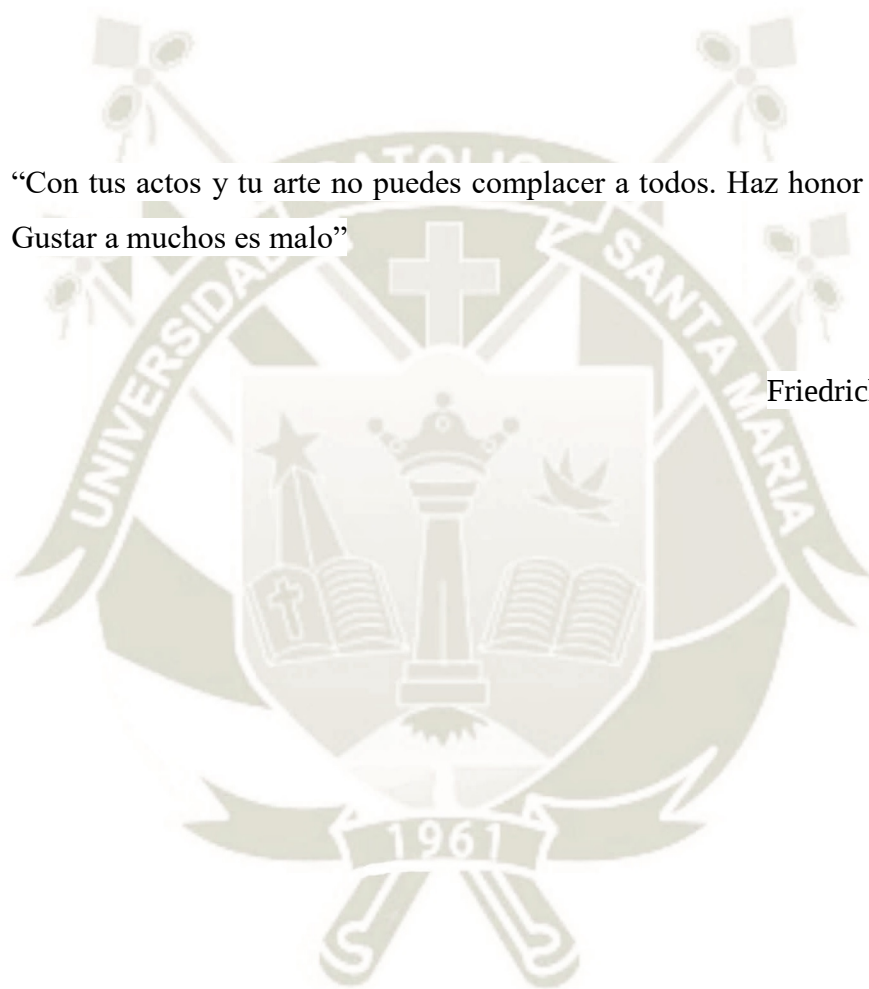
Y a mi asesor, quien siempre dispuso de su tiempo para apoyarme amablemente en cada etapa de esta investigación.



II. Epígrafe

“Con tus actos y tu arte no puedes complacer a todos. Haz honor a unos pocos.
Gustar a muchos es malo”

Friedrich Schiller



Esta investigación es financiada por el proyecto 106-2017-FONDECYT



III. Índice

RESUMEN

ABSTRACT

1	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	Hipótesis	3
1.2	Objetivos.....	3
1.2.1	Objetivo General.....	3
1.2.2	Objetivos específicos.....	3
2	CAPÍTULO i: Marco teórico.....	4
2.1	Vivienda colectiva en el Perú	4
2.1.1	Crecimiento de las viviendas colectivas.....	5
2.2	Conceptos básicos.....	6
2.2.1	Geopolímero:.....	6
2.2.2	Geopolimerización:	6
2.2.3	Mortero geopolimérico:.....	7
2.3	Técnicas usadas para estudio	7
2.3.1	Granulometría por difracción laser de luz:	7
2.3.2	Difracción de rayos x:.....	8
2.3.3	Microscopia óptica:	8
2.3.4	Ensayos mecánicos de compresión:	9
2.3.5	Ensayos termo mecánicos:	9
2.3.6	Ensayo para determinar la resistencia a compresión de morteros según normas peruanas:	9
2.3.7	Ensayo para determinar la resistencia a la compresión de muestras de albañilería según normas peruanas:	9
2.4	Materia prima.....	9
2.4.1	Ignimbrita	9
2.4.2	Desperdicios de demolición.....	10
2.4.3	Arena fina	11

2.5	Normatividad	11
2.5.1	Mortero:	11
2.5.2	NTP 399.610: Especificación normalizada para morteros	11
2.5.3	NTP 334.051: Método de ensayo para determinar la resistencia a compresión de morteros de cemento Portland usando especímenes cúbicos de 50 mm de lado	12
2.5.4	NTP 399.605 2013: Método de ensayo para la determinación de la resistencia en compresión de prismas de albañilería	13
2.5.5	Reglamento Nacional de Edificaciones. E 070 Albañilería. Capítulo 5: Resistencia de prismas de albañilería:	15
3	Capítulo 2: Fabricación de aligante alternativo	16
3.1	Adecuación preliminar de la materia prima:	17
3.2	Fabricación de los compuestos geopoliméricos:	18
4	Capítulo 4: Resultados	22
4.1	Granulometría por difracción laser de luz	22
4.2	Difracción de rayos x	22
4.3	Microscopía óptica	26
4.4	Ensayos mecánicos de compresión	27
4.5	Ensayos termomecánicos	34
4.6	Resultados de ensayos de resistencia a compresión de morteros según normas peruanas	40
4.7	Resultados de ensayos para determinar la resistencia a la compresión de muestras de albañilería según normas peruanas	45
5	capítulo 5: Conclusiones	48

IV. Índice de tablas

Tabla 1. Tipo de vivienda.....	4
Tabla 2. Especificación de mortero por propiedades.....	12
Tabla 3. Factores de corrección altura/espesor para la resistencia en compresión de prismas de albañilería.....	14
Tabla 4. Resistencias características de las muestras de albañilería MPa (kg/cm2).....	15
Tabla 5. Resistencia a la compresión de muestras de albañilería.....	46



V. Índice de figuras

Figura 1. Material de construcción de viviendas colectivas en el Perú.....	5
Figura 2. Crecimiento de viviendas por departamento.....	6
Figura 3. Esquema de medida de tamaño de partícula por difracción láser	8
Figura 4. Montañas de ripios de ignimbrita, producto de falta de gestión de desperdicios.	10
Figura 5. Metodología de fabricación	16
Figura 6. Identificación y recolección de materiales: (a) muestreo de rajadas de ignimbrita en las faldas de la cantera de Añashuayco (Arequipa, Perú), (b) muestreo sistemático en zigzag de las canteras y (c) muestreo de residuos de demolición (mortero y ladrillos de arcilla cocida).....	17
Figura 7. Adecuación preliminar de los materiales precursores: (a) rajadas de Ignimbrita, (b)ladrillo de demolición, (c) mortero de demolición, (d) equipo de trituración, (e) ladrillo triturado, (f) tamizado de ignimbrita a 106 micras (g) ladrillo molido y tamizado, (h) ignimbrita molida y tamizada y (i) mortero molido y tamizado.	18
Figura 8. Etapas de fabricación de geopolímeros (aligantes y morteros): (a) medida de masas, (b) preparación de solución alcalina, (c) formación de pasta geopolimérica, (d) moldeado y (e) geopolimerización/endurecimiento.....	19
Figura 9. Etapas para la obtención de paralelepípedos geopoliméricos: (a) aspecto macroscópico de una probeta cilíndrica geopolimérica, (b) corte paralelo a la sección transversal de los cilindros geopoliméricos y (c) paralelepípedos obtenidos luego de cortes perpendiculares.....	20
Figura 10. Nomenclatura para la identificación de los materiales estudiados.....	21
Figura 11. Curvas de distribución de tamaños de partículas con 03 repeticiones, para ignimbrita, arcilla calcinada, mortero de demolición y arena fina.	22
Figura 12. Difractograma de la muestra de arena fina con los picos de las principales fases identificadas.....	24
Figura 13. Difractograma de la muestra de arcilla calcinada con los picos de las principales fases identificadas.	24
Figura 14. Difractograma de la muestra de sillar blanco con los picos de las principales fases identificadas.....	25
Figura 15. Difractograma de la muestra de mortero de demolición con los picos de las principales fases identificadas.	25

Figura 16. Micrografías por microscopia óptica de superficies pulidas de morteros geopoliméricos derivados de arcilla calcinada (a,b), mortero de demolición (c,d) y polvo de Ignimbrita (e,f).....	26
Figura 17. Configuración típica de un ensayo de compresión uniaxial a temperatura ambiente.	27
Figura 18. Curvas esfuerzo vs. deformación para paralelepípedos de aligantes geopoliméricos obtenidos de polvo de Ignimbrita y una solución endurecedora de Na(OH) 15 M	28
Figura 19. Curvas esfuerzo vs. deformación para paralelepípedos de aligantes geopoliméricos obtenidos de polvo de arcilla calcinada (ladrillos de demolición) y una solución endurecedora de Na(OH) con concentración de (a) 10M y (b-d) 15M.	29
Figura 20. Curvas esfuerzo vs. deformación para paralelepípedos de aligantes geopoliméricos obtenidos de polvo de mortero reciclado y una solución endurecedora de Na(OH) con concentración de (a-c) 10M y (d-f) 15M.....	30
Figura 21. Curvas esfuerzo vs. deformación para paralelepípedos de morteros geopoliméricos obtenidos de polvo de mortero reciclado y una solución endurecedora de Na(OH) con concentración de (a-c) 12M, (d-f) 15M y (g-i) 18M.	32
Figura 22. Curvas esfuerzo vs. deformación para la validación de la metodología final de fabricación de morteros geopoliméricos derivados de (a) arcilla calcinada, (b) mortero de demolición y (c) polvo de ignimbrita.....	34
Figura 23. Curvas esfuerzo vs. deformación de mortero geopolimérico fabricado a partir de ignimbrita frente a esfuerzos de compresión a temperaturas de (a) -20 °C, (b) -10°C, (c) temperatura ambiente, (d) 200°C, (e) 300°C, (f) 400°C, (g) 450°C y (h) 500°C.....	35
Figura 24. Curvas representativas de esfuerzo vs. deformación de mortero geopolimérico fabricado a partir de ignimbrita a temperaturas variables.	35
Figura 25. Curvas esfuerzo vs. deformación de mortero geopolimérico fabricado a partir de arcilla calcinada de demolición frente a esfuerzos de compresión a temperaturas de (a) -20 °C, (b) -10°C, (c) temperatura ambiente, (d) 200°C, (e) 300°C, (f) 400°C y (h) 500°C.	37
Figura 26. Curvas representativas de esfuerzo vs. deformación de mortero geopolimérico fabricado a partir de arcilla calcinada a temperaturas variables....	37

Figura 28. Curvas representativas de esfuerzo vs. deformación de mortero geopolimérico fabricado a partir de mortero de demolición a temperaturas variables.....	39
Figura 27. Curvas esfuerzo vs. deformación de mortero geopolimérico fabricado a partir de mortero de demolición frente a esfuerzos de compresión a temperaturas de (a) - 20 °C, (b) -10°C, (c) temperatura ambiente, (d) 200°C, (e) 300°C, (f) 400°C, (g) 500°C y 600°C.....	39
Figura 29. (a) Arena de construcción e ignimbrita tamizado por malla ASTM N°100, (b) moldeado de probetas de ignimbrita, mortero y arcilla calcinada de demolición, (c) probeta cúbica ignimbrita, (d) probeta cúbica de arcilla calcinada de demolición y (e) probeta cúbica de mortero de demolición	41
Figura 30. (a) muestras cúbicas por triplicado de cada materia prima, (b) probeta cúbica de sillar ensayada, (c) probeta cúbica de mortero de demolición ensayada y (d) probeta cúbica de arcilla calcinada de demolición ensayada.	42
Figura 32. Curvas de esfuerzo vs. deformación representativas de los ensayos de mortero geopolimérico de ignimbrita, arcilla calcinada y mortero de demolición.	44
Figura 31. Curvas esfuerzo vs. deformación de morteros geopoliméricos a escala real de (a) polvo de ignimbrita, (b) arcilla calcinada y (c) mortero de demolición.....	44
Figura 33. Muestras de albañilería sin recubrimientos superior e inferior de cada materia prima: (a) ignimbrita, (b) arcilla calcinada de demolición (c) mortero de demolición.	45
Figura 34. Ejecución de ensayo de compresión a muestras de albañilería.....	46
Figura 35. Muestras de albañilería de ensayadas de (a) ignimbrita, (b) arcilla calcinada de demolición (c) mortero de demolición.....	47

VI. Resumen

La construcción es la industria con el mayor impacto ambiental en el mundo, debido a la producción de cemento, agregados, transporte, desperdicios de demolición, entre otros. El principal factor contaminante en esta industria es la producción de cemento Portland tradicional (CPT), el cual representa el 7% de emisiones de CO₂ a nivel mundial, principalmente debido a (1) la calcinación de piedra caliza y arcilla que da lugar a la obtención del clínker (ingrediente principal del CPT) y (2) el uso excesivo de combustibles derivados del petróleo, para llegar a la temperatura óptima de calcinación (aprox. 1450 °C). Sin embargo, a pesar de estas desventajas el CPT es en la actualidad, el material aligante más usado en esta industria.

La reducción de emisiones de CO₂ es una prioridad global, por lo tanto, se han propuesto diversas alternativas a los materiales de construcción convencionales. Una de las más prometedoras es la aplicación de tecnología geopolimérica, porque está basada en una reacción química que no requiere procesos de calcinación, la activación alcalina de una matriz amorfa de aluminosilicatos de diversa procedencia. Por lo tanto, la presente investigación buscó fabricar un nuevo material aligante a partir de polvo de Ignimbrita (residuo de proporciones importantes en las Canteras de Añashuayco al norte de Arequipa-Perú), polvo de ladrillo calcinado y mortero reciclado de demolición.

Para fabricar este nuevo material de construcción se consideraron los criterios de: (1) resistencia mecánica para su aplicación como mortero estructural (de acuerdo al Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE)), (2) trabajabilidad de la pasta geopolimérica, (3) costo / beneficio del activante alcalino (Na(OH)) resistencia máxima a la compresión de aligantes y morteros fabricados.

Los resultados iniciales mostraron que la resistencia máxima a la compresión uniaxial a temperatura ambiente varían entre 20 y 50 MPa para los aligantes obtenidos de las materias primas propuestas. Haciendo uso de estos aligantes geopoliméricos se prepararon muestras de morteros (de relación volumétrica aligante:arena fina de 37.5:62.5) que obtuvieron resultados de resistencia a la compresión de hasta 68MPa, resultados que superan ampliamente los requeridos para mortero estructural según el RNE.

La siguiente etapa de la investigación buscó comprender los principales mecanismos microscópicos que determinan la resistencia mecánica de los morteros fabricados en función de temperatura variable (entre -20 y 600 °C), se pudo notar que a temperaturas superiores a los 450 °C existe una transición de frágil a semi-dúctil, por lo que el mortero geopolimérico de viviendas a esta temperatura no tendría una falla catastrófica.

Palabras clave: vivienda colectiva, mortero geopolimérico, tecnología geopolimérica y activación alcalina.



VII. Abstract:

Construction is the industry with the greatest environmental impact in the world, due to the production of cement, aggregates, transport, demolition waste, among others. The main polluting factor in this industry is the production of ordinary Portland cement (OPC), which represents 7% of the CO₂ emissions worldwide, mainly due to (1) calcination of limestone and clay to produce the clinker (main ingredient of the OPC) and (2) the excessive use of fuels derived from petroleum to reach the optimum calcination temperature (approximately 1450 °C). Despite of these disadvantages, the OPC is currently the most used material in this industry.

The reduction of CO₂ emissions is a global priority, therefore various alternatives to conventional construction materials have been proposed. One of the most promising is the application of geopolymeric technology, because it is based on a chemical reaction that does not require calcination processes, but the alkaline activation of an amorphous matrix of aluminosilicates of diverse origins. Therefore, the present research seeks to manufacture a new binder from ignimbrite powder (heritage local material of Arequipa-Peru), calcined brick powder and recycled demolition mortar.

To manufacture this new construction material were considered criteria of: (1) mechanical resistance for its application as structural mortar (according to the National Building Regulations of Peru (RNE)), (2) workability of the geopolymeric paste, (3) Cost / benefit of the alkaline activator (Na (OH)) and (4) maximum resistance to compression

Preliminary results indicated that the maximum resistance to uniaxial compression at room temperature ranged from 20 and 50 MPa for the binders obtained from the raw materials proposed. Using these geopolymeric binders, samples of mortars (of volumetric ratio binder: fine sand of 37.5: 62.5) were prepared, which obtained results of compressive resistance up to 68MPa, results that far exceed the required for structural mortar according to the RNE.

The next stage of our research sought to understand the main microscopic factors that determine the mechanical strength of mortars manufactured based on variable temperature (between -20 and 600 ° C), it was noted that at temperatures above

450 ° C there is a transition from fragile to semi-ductile, so the geopolymeric housing mortar at this temperature would not have a catastrophic failure.

Keywords clave: collective housing, geopolymeric mortar, geopolymeric technology and alkaline activation.



INTRODUCCIÓN

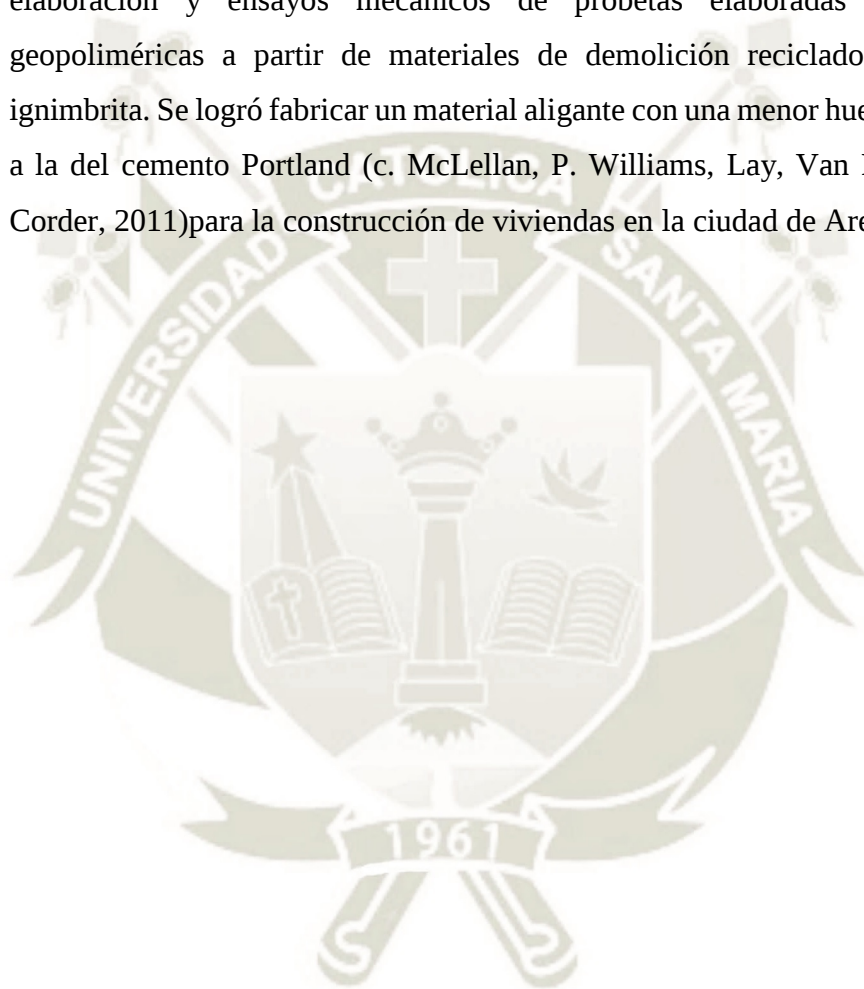
La industria de la construcción en el Perú mantiene un crecimiento constante desde el año 2002 (INEI, Construcción, 2003) (INEI, Construcción, 2009), a excepción de un periodo de crisis inmobiliaria entre los años 2015 y 2016 (INEI, Construcción, 2017), a partir del cual continuó con una curva de crecimiento (INEI, Informe Técnico de Producción Nacional, 2018); esto debido al incremento de las actividades de desarrollo y reconstrucción en el país.

La construcción es una de las industrias con mayor impacto ambiental en el mundo debido a la producción de cemento, agregados, transporte, escombros de demolición, entre otros. El principal factor contaminante de esta industria es la producción del cemento, de la cual aproximadamente el 50% se debe a la calcinación de piedra caliza, 40% a la combustión de combustibles en hornos y 10% debido a procesos de manufactura y transporte de productos (Chithambaram, Kumar, & Prasad, 2019). La industria del cemento representa el 7% de las emisiones de CO₂ a nivel mundial (Oh, Noguchi, Kitagaki, & Park, 2014), siendo la segunda industria que más genera gases de efecto invernadero, luego del sector energético. El cemento es el material más consumido en el mundo, la industria cementera puede producir más de 4 billones de toneladas cada año, es decir hasta 560 kg por cada persona viva (Shanks, y otros, 2019) y se proyecta que la demanda de este material se incrementará gradualmente (Agency, 2018) incrementando sus emisiones hasta un 100% para el año 2020 (Naik, 2008). Sin embargo, el cemento Portland es, en la actualidad, el material aligante más usado en esta industria, incluyendo, claro está, la construcción residencial.

La presente investigación evaluó materiales aligantes alternativos al cemento Portland tradicional para su potencial aplicación en la construcción de viviendas. Se propone fabricar estos nuevos aligantes a partir de escombros de demolición como arcilla calcinada (ladrillo) y mortero de demolición, adicionalmente se plantea el uso de ripios de ignimbrita de las canteras de Añashuayco de Arequipa, a fin de resolver la exorbitante acumulación generada por la desordenada extracción de ignimbrita, que dificulta la consolidación de proyectos culturales como *“La Ruta del Sillar”* (Ruta del sillar web site, 2015) y perjudican la imagen de este entorno de alta riqueza natural para la ciudad de Arequipa (Tua, 2015),

con esta investigación también se busca revalorar la ignimbrita como material de construcción histórico de los principales edificios patrimoniales de la ciudad de Arequipa.

Luego de identificar el problema se definieron muestras de ripios de ignimbrita, arcilla calcinada de demolición y mortero de demolición, para luego realizar trabajo de laboratorio como caracterización estructural, microestructural, elaboración y ensayos mecánicos de probetas elaboradas con técnicas geopoliméricas a partir de materiales de demolición reciclados y ripios de ignimbrita. Se logró fabricar un material aligante con una menor huella de carbono a la del cemento Portland (c. McLellan, P. Williams, Lay, Van Riessen, & D. Corder, 2011) para la construcción de viviendas en la ciudad de Arequipa.



1.1 Hipótesis

A partir de una búsqueda bibliográfica sobre la fabricación de materiales aligantes a partir de materiales reciclados, planteo la siguiente hipótesis:

Es posible desarrollar y evaluar un material aligante alternativo al cemento Portland a partir de escombros de demolición y ripios de ignimbrita, para su potencial uso en la construcción de viviendas en la ciudad de Arequipa.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Desarrollar y evaluar un material aligante alternativo al cemento Portland a partir de escombros de demolición y ripios de ignimbrita, para su potencial uso en la construcción de viviendas en la ciudad de Arequipa.

1.2.2 Objetivos específicos

- Evaluar la necesidad de nuevos materiales alternativos ecoamigables alternativos al cemento Portland para uso en la construcción de viviendas colectivas.
- Determinar a través de los ensayos de caracterización estructural si las materias primas propuestas (ignimbrita y desperdicios de demolición: arcilla calcinada y mortero de demolición) pueden ser usados para fabricación de morteros geopoliméricos.
- Determinar si los morteros alternativos al cemento Portland propuestos pueden ser usados en la industria de la construcción peruana según normativas vigentes.
- Evaluar el comportamiento termo mecánico a temperatura variable de los morteros alternativos al cemento Portland propuestos.

CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO

2.1 Vivienda colectiva en el Perú

Se considera a la vivienda colectiva, en oposición a la noción de vivienda individual, como un conjunto habitacional destinado a albergar a varias familias. Estas unidades de vivienda no son percibidas o analizadas como viviendas independientes, sino que forman parte de un todo y pertenecen a una sola estructura más amplia. Una característica común de este tipo de vivienda es la existencia de un solo ingreso, así como de espacios comunes a todas las unidades (Serrano, 2005).

Bajo estos conceptos, en el Perú, es posible considerar como viviendas colectivas a las distribuidas de forma vertical y horizontal, es decir principalmente unidades vecinales, edificios multifamiliares y quintas.

Los resultados del Censo Nacional de Población y Vivienda 2017 realizados por el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) – Perú clasifican 8 tipos de vivienda en el país y se muestran en la Tabla 6, casa independiente, departamento en edificio, vivienda en quinta, vivienda en casa de vecindad (callejón, solar o corralón), choza o cabaña, vivienda improvisada, local destinado para habitación humana, otro tipo de vivienda particular y viviendas colectivas. De los tipos de vivienda clasificados por el INEI, y según la definición de vivienda colectiva, es posible considerar como viviendas colectivas a departamento en edificio, vivienda en quinta y vivienda en vecindad.

Tabla 6. Tipo de vivienda

Tipo de vivienda	Casos	Porcentaje
Casa independiente	8 763 360	86.70%
Departamento en edificio	820 605	8.10%
Vivienda en quinta	126 308	1.30%
Vivienda en casa de vecindad (Callejón, solar o corralón)	85 780	0.80%
Choza o cabaña	166 374	1.60%
Vivienda improvisada	130 932	1.30%
Local no destinado para habitación humana	9 474	0.10%

Otro tipo de vivienda particular	16	0.00%
----------------------------------	----	-------

Fuente: INEI - Perú: Perfil Sociodemográfico

En el país los tipos de viviendas considerados como vivienda colectiva suman un total de 844 570, del cual el 91.65 % son construidas con ladrillos o bloques de cemento como se puede notar en la *Figura 1*, la construcción de viviendas con estas unidades de albañilería requiere de un material aligante, siendo el cemento Portland el material aligante más usado en el país, se puede afirmar que más del 90% de las viviendas colectivas del país fueron construidas usando cemento Portland.

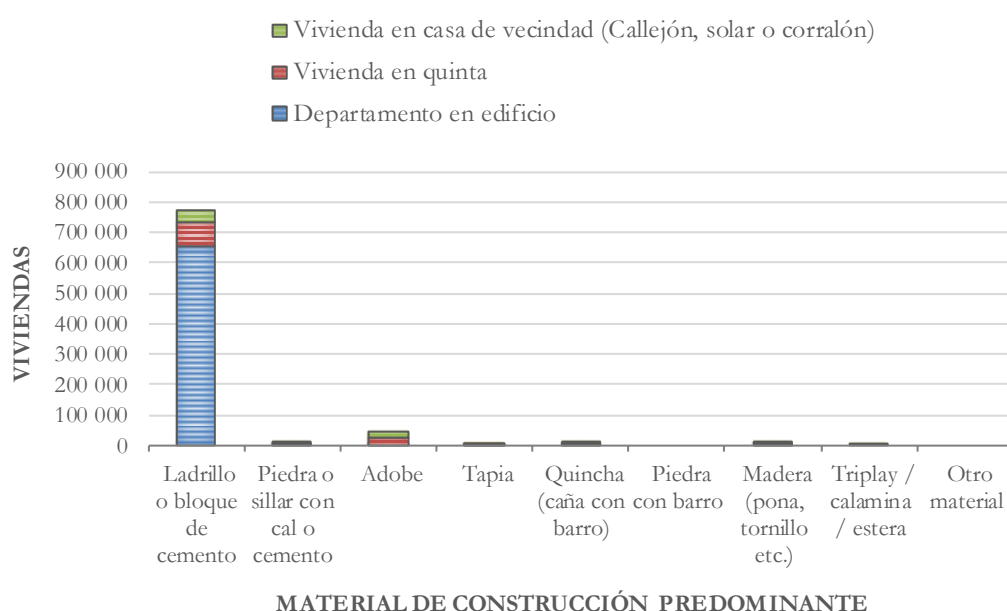


Figura 1. Material de construcción de viviendas colectivas en el Perú.

Fuente: INEI - Perú: Perfil Sociodemográfico

2.1.1 Crecimiento de las viviendas colectivas

Entre las consideradas viviendas colectivas, la que mayor crecimiento tuvo fue la de tipo departamento en edificio, entre 1993 y 2007 se registró un crecimiento de 78.1% y entre 2007 y 2017 se registró un crecimiento de 116.6%, creciendo desde 212 731 unidades en 1993 hasta 820 605 en 2017; demostrando un constante y notorio crecimiento; por otro lado la vivienda quinta entre 1993 y 2007 registro un crecimiento de 91.2% desde 70 720 hasta 135 245 y entre 2007 y 2017 tuvo un decrecimiento de -6.6% quedando un total de 126 308 viviendas en quinta para el

2017 (INEI, Perú: Perfil Sociodemográfico, 2017) (INEI, Perfil Sociodemográfico, 2007).

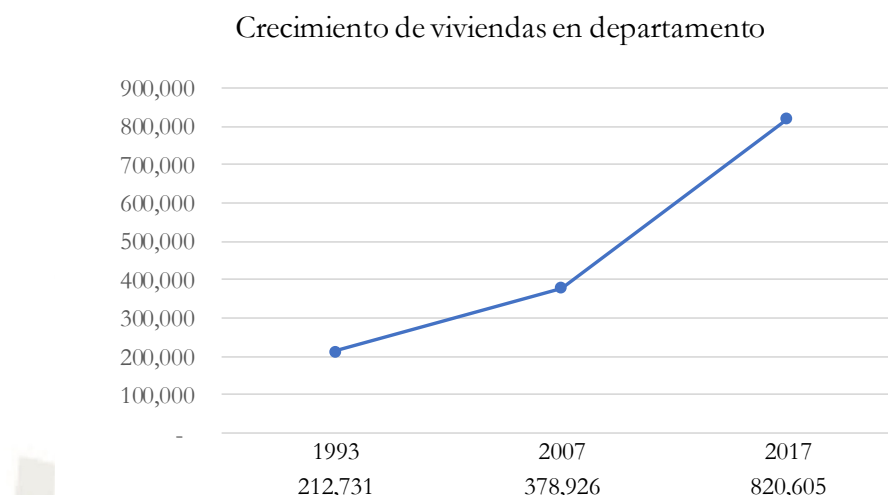


Figura 2. Crecimiento de viviendas por departamento.

Fuente: INEI - Perú: Perfil Sociodemográfico

2.2 Conceptos básicos

2.2.1 Geopolímero:

Término acuñado por Joseph Davidovits en 1978 para referirse a polímeros inorgánicos formados por policondensación de aluminosilicatos a baja temperatura. Esta tecnología permite producir materiales en base a diversos tipos de materia prima incluyendo desperdicios industriales (Lemougna, Wang, U., Melo, & Cui, 2016).

Desde su descubrimiento, las propiedades de los geopolímeros vienen siendo estudiadas por destacados centros de investigación, asimismo su aplicación en la química inorgánica moderna, mineralogía, geología y en múltiples industrias como material resistente al fuego, en aplicaciones en la biotecnología, como alternativo a azulejos, en la industria aeroespacial y automovilística, en la restauración, entre otros (Davidovits, 2015).

2.2.2 Geopolimerización:

Es la reacción química entre: (1) una solución alcalina que usualmente son silicatos o hidróxidos de metales alcalinos y (2) materiales con alto contenido de aluminosilicatos que pueden ser minerales naturales, sintéticos o aluminosilicatos

de desperdicios industriales como ceniza volante, escorias, residuos de vidrio y metakaolin, siendo este último el más usado en el desarrollo de materiales geopoliméricos (Lemougna, Wang, U., Melo, & Cui, 2016) (Gholampour, Ho, & Ozbakkaloglu, 2019).

Aunque el proceso de geopolimerización es complejo principalmente incluye tres etapas: (1) disolución de materias primas en solución alcalina, (2) reorientación de especies disueltas y (3) policondensación para formar estructuras geopoliméricas en red (Kani, Allahverdi, & John L. Provis, 2012).

2.2.3 Mortero geopolimérico:

Es un material álcali activado resultado de la mezcla de arena fina, agua y un aligante geopolimérico. Es elaborado con una notable reducción en emisiones dióxido de carbono con respecto al cemento portland, ya que no depende de procesos de calcinación. En su fabricación se puede usar diversos materiales reciclados de diferentes industrias (Pouhet & Cyr, 2016).

Hasta el momento se han construido proyectos de gran envergadura usando este tipo mortero como aeropuertos, edificios universitarios, entre otros (Bligh & Tom, 2014) (Glasby, Day, Genrich, & Aldred, 2015).

2.3 Técnicas usadas para estudio

Para poder diseñar una ruta de fabricación de un nuevo material se debe estudiar a los diversos componentes del mismo, para ello se usaron diversas técnicas especializadas para el análisis de partículas de los materiales precursores.

2.3.1 Granulometría por difracción laser de luz:

Conocida también por sus siglas en inglés LALLS (Low Angle Laser Scattering), esta técnica nos permite determinar el tamaño y distribución de tamaños de

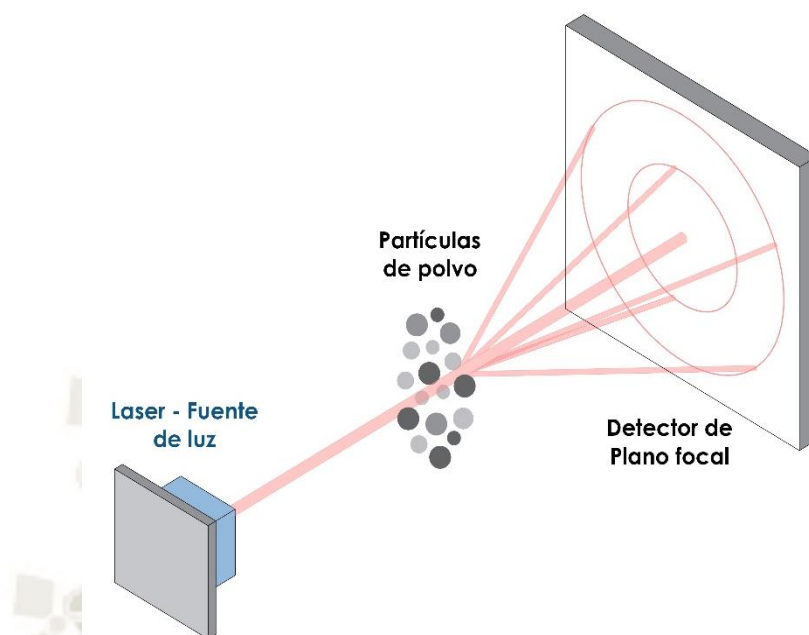


Figura 3. Esquema de medida de tamaño de partícula por difracción láser.

Fuente: Elaboración propia.

partículas de muestras en polvo a través de la intensidad y el ángulo de salida de los haces de laser dispersados por las partículas en suspensión en un medio dado, se basa en el factor inversamente proporcional entre el ángulo de difracción y al tamaño de partícula (Rawle, 2018).

2.3.2 Difracción de rayos x:

Técnica de caracterización estructural de alta precisión no destructiva de las propiedades de materiales, sirve para identificar las fases cristalinas presentes en las muestras, también permite calcular indirectamente el porcentaje de la estructura amorfa de materiales.

2.3.3 Microscopia óptica:

Técnica que permite ver las partículas directamente para estudiar su forma, lo que nos permite juzgar si se realizó una correcta dispersión sin aglomeraciones; para su desarrollo se debe tomar especial cuidado en la preparación de muestras (Rawle, 2018).

2.3.4 Ensayos mecánicos de compresión:

Consiste en pruebas resistencia a la compresión uniaxial a temperatura ambiente a una velocidad constante.

2.3.5 Ensayos termo mecánicos:

Consiste en pruebas de resistencia a la compresión uniaxial a temperaturas variables a una velocidad constante.

2.3.6 Ensayo para determinar la resistencia a compresión de morteros según normas peruanas:

Ensayo de compresión uniaxial según norma técnica peruana NTP 334.051 para determinar la resistencia frente a esfuerzos de compresión en especímenes cúbicos de 50mm de lado.

2.3.7 Ensayo para determinar la resistencia a la compresión de muestras de albañilería según normas peruanas:

Ensayo de compresión uniaxial según norma técnica peruana NTP 399.605 2013 para determinar la resistencia frente a esfuerzos de compresión de muestras de albañilería de diferentes alturas.

2.4 Materia prima

2.4.1 Ignimbrita

Es una roca ígnea y depósito volcánico, predominantemente hecho de material pómez que muestra evidencia de haber sido colocado como un caliente y concentrado flujo piro clástico; estos materiales suelen ser el resultado de la erupción de magma silícico (Moon, 1993). Este material tiene una textura heterogénea y tiene un alto valor patrimonial para diferentes ciudades alrededor del mundo, como la ciudad de Arequipa, debido a su uso en la construcción de sus principales edificios durante la época colonial, aún hasta la actualidad se usa como mampostería para edificios contemporáneos; la principal fuente de este material proviene de las canteras de Añashuayco ubicadas dentro de la ciudad (Tua, 2015).

En la actualidad este material se continua extrayendo de forma artesanal, lo que genera una considerable cantidad de ripios; antiguamente estos ripios, llamados “ratas” por los artesanos extractores de sillar, se usaba como relleno de los muros dobles de sillar, en la actualidad no se usan, con el tiempo la acumulación y la falta de gestión de desperdicios ha generado montañas de ripios de ignimbrita, lo que contamina visualmente el paisaje natural de la zona e impide la consolidación de proyectos turísticos, como la ruta del sillar.



Figura 4. Montañas de ripios de ignimbrita, producto de falta de gestión de desperdicios.

Fuente: Elaboración propia.

2.4.2 Desperdicios de demolición

La industria de la construcción de la Unión Europea genera alrededor de 860 millones de toneladas de desperdicios cada año, que representa el 34% de todos sus desperdicios; por lo tanto, la Comisión Europea identifica como una prioridad el reciclaje de los desperdicios de demolición y construcción (Rossi, y otros, 2019). Algunos de los principales elementos de estos desperdicios son el mortero y la arcilla calcinada de demolición.

2.4.2.1 Mortero de demolición

El mortero reciclado está formado por residuos de mortero y concreto de estructuras demolidas, así como de concreto fresco y endurecido que ha sido

rechazado por los productores de concreto premezclado o mezclado en el sitio o por los fabricantes de productos de concreto (RILEM, 2005).

2.4.2.2 Arcilla calcinada de demolición

La arcilla calcinada de demolición está formada por residuos de las diferentes unidades de albañilería demolidas de elementos estructurales y no estructurales de una edificación.

2.4.3 Arena fina

Es un conjunto de partículas resultado de la desintegración natural o artificial de rocas, se utiliza en la preparación de mezcla para tarrajeo de muros, para cielos rasos y asentado de unidades de albañilería.

2.5 Normatividad

2.5.1 Mortero:

Conglomerado o masa constituida por arena, conglomerante y agua, que puede contener además algún aditivo (Real Academia Española, 2017).

Es un material empleado para adherir horizontal y verticalmente unidades de albañilería, estará constituido por una mezcla de aglomerantes y agregado fino a los cuales se les agregará la cantidad máxima de agua para elaborar una mezcla trabajable, adhesiva y sin segregación del agregado. Los campos de aplicación de morteros aplican a obras de albañilería reforzada y no reforzada (INACAL, 2013) (Ministerio de vivienda, construcción y saneamiento, 2018).

2.5.2 NTP 399.610: Especificación normalizada para morteros

- Objeto:

Esta Norma Técnica Peruana establece especificaciones para morteros utilizados en la construcción de estructuras de albañilería reforzada y no reforzada.

Tabla 7. Especificación de mortero por propiedades

Mortero	Tipo	Resistencia a la compresión promedio a
		los 28 días, MPa (lb/pulg ²)
Cemento-cal	M	17.2(2500)
	S	12.4(1800)
	N	5.2(750)
	O	2.4(350)
Mortero cemento	M	17.2(2500)
	S	12.4(1800)
	N	5.2(750)
	O	2.4(350)
Cemento de albañilería	M	17.2(2500)
	S	12.4(1800)
	N	5.2(750)
	O	2.4(350)

Fuente: NTP 399.610: Especificación normalizada para morteros

- **Resistencia a la compresión:**

Las pruebas de resistencia a compresión deben realizarse de acuerdo a la NTP 334.051. Método de ensayo para determinar la resistencia a compresión de morteros de cemento Portland usando especímenes cúbicos de 50 mm de lado (INACAL, 2013).

2.5.3 NTP 334.051: Método de ensayo para determinar la resistencia a compresión de morteros de cemento Portland usando especímenes cúbicos de 50 mm de lado

- **Campo de aplicación:**

Esta Norma Técnica Peruana se aplica determinar la resistencia a la compresión de cementos Portland y otros morteros y los resultados pueden ser usados para verificar el cumplimiento de requisitos.

Este método es utilizado como referencia por otras normas de requisitos y métodos de ensayo. Se debe tener cuidado de utilizar los resultados de este método para predecir la resistencia de concreto.

- **Determinación de la resistencia a la compresión:**

Se deben ensayar los especímenes después de retirarlos de la cámara húmeda, en el caso de ensayarlos a 24 h. de edad; y los del agua de almacenamiento, en el caso de todos los demás especímenes.

2.5.4 NTP 399.605 2013: Método de ensayo para la determinación de la resistencia en compresión de prismas de albañilería

- **Objeto:**

Esta norma técnica establece los procedimientos para la fabricación y ensayo de prismas de albañilería, y los cálculos para determinar la resistencia a la compresión, f_{mt} , utilizada para determinar el cumplimiento con la resistencia a la compresión especificada para la albañilería, f_m . Cuando este ensayo es usado con propósitos de investigación, los procesos de investigación y ensayos contenidos, servirán como referencia y para proporcionar parámetros de control. Este método también cubre los procedimientos para determinar la resistencia a la compresión de prismas obtenidos a partir de muestras eliminadas en obras de albañilería.

- **Condiciones generales:**

Esta Norma Técnica Peruana proporciona una manera de verificar que los materiales constituyentes de la albañilería garanticen que ésta cumpla con la resistencia a la compresión especificada.

Este método de ensayo proporciona un medio para evaluar las características de resistencia a la compresión de la construcción en albañilería en campo, a través de pruebas de los prismas obtenidos a partir de aquella construcción cuando es

muestreada de acuerdo con la práctica de la ASTM C1532. Las decisiones tomadas en la preparación de tales prismas extraídos en obra para la prueba, la determinación de la superficie neta, y la interpretación de los resultados de las pruebas de compresión requiere el juicio profesional.

- **Medición de los prismas y determinación del área neta:**

Se deben realizar al menos dos mediciones de cada cara, para determinar una dimensión se obtendrá a partir del promedio de sus 4 mediciones.

Para el área neta de la sección transversal será considerada el área de la sección transversal de las unidades de albañilería.

- **Resistencia de prisma de albañilería:**

Calcular la resistencia de cada prisma de albañilería dividiendo compresión máxima soportada entre el área neta de sección transversal.

- **Resistencia a la compresión de albañilería:**

Se calculará para cada prisma la relación h_p/t_p , considerando la altura (h_p) y la menor distancia lateral (t_p). Se determinará el factor de corrección de la Tabla 7, para valores intermedios el factor de corrección se determinará mediante interpolación lineal.

Tabla 8. Factores de corrección altura/espesor para la resistencia en compresión de prismas de albañilería

h_p/t_p	1.3	1.5	2	2.5	3.0	4.0	5.0
Factor de corrección	0.75	0.86	1.0	1.04	1.07	1.15	1.22

Fuente: NTP 399.605 2013: Método de ensayo para la determinación de la resistencia en compresión de prismas de albañilería

Multiplicar la resistencia del prisma de albañilería por el factor de corrección del prisma correspondiente.

2.5.5 Reglamento Nacional de Edificaciones. E 070 Albañilería. Capítulo 5: Resistencia de prismas de albañilería:

- Artículo 13 Especificaciones Generales:

La resistencia de la albañilería a compresión axial (f'_m) y a corte (v'_m) se determinará de manera empírica (recurriendo a tablas o registros históricos de resistencia de unidades) o mediante ensayos de prismas, de acuerdo a la importancia de la edificación y a la zona sísmica donde se encuentre.

Los prismas tendrán un refrentado de cemento-yeso con un espesor que permita corregir la irregularidad superficial de la albañilería.

En el caso de no realizarse ensayos de prismas, podrá emplearse los valores mostrados en la Tabla 9, correspondientes a pilas y muretes construidos con mortero 1:4 (cuando la unidad es de arcilla) y 1:1/2:4 (cuando la materia prima es sílice-cal o concreto), para otras unidades u otro tipo de mortero se tendrá que realizar los ensayos respectivos.

Tabla 9. Resistencias características de las muestras de albañilería MPa (kg/cm^2)

Materia prima	Denominación	Unidad (f'_b)	Pilas (f'_m)	Muretes (v'_m)
Arcilla	King kong artesanal	5.4(55)	3.4(35)	0.5(5.1)
	King kong industrial	14.2(145)	6.4(65)	0.8(8.1)
	Rejilla industrial	21.1(215)	8.3(85)	0.9(9.2)
Sílice-cal	King kong normal	15.7(160)	10.8(110)	1.0(9.7)
	Dédalo	14.2(145)	9.3(95)	1.0(9.7)
	Estándar y mecano	14.2(145)	10.8(110)	0.9(9.2)
Concreto	Bloque tipo P	4.9(50)	7.3(74)	0.8(8.6)
		6.4(65)	8.3(85)	0.9(9.2)
		7.4(75)	9.3(95)	1.0(9.7)
		8.3(85)	11.8(120)	1.1(10.9)

Fuente: Reglamento Nacional de Edificaciones. E 070 Albañilería. Capítulo 5

CAPÍTULO 2: FABRICACIÓN DE ALIGANTE ALTERNATIVO

El presente capítulo describe el proceso de validación de la metodología final (Figura 5) de fabricación de nuevos materiales aligantes a partir de la materia

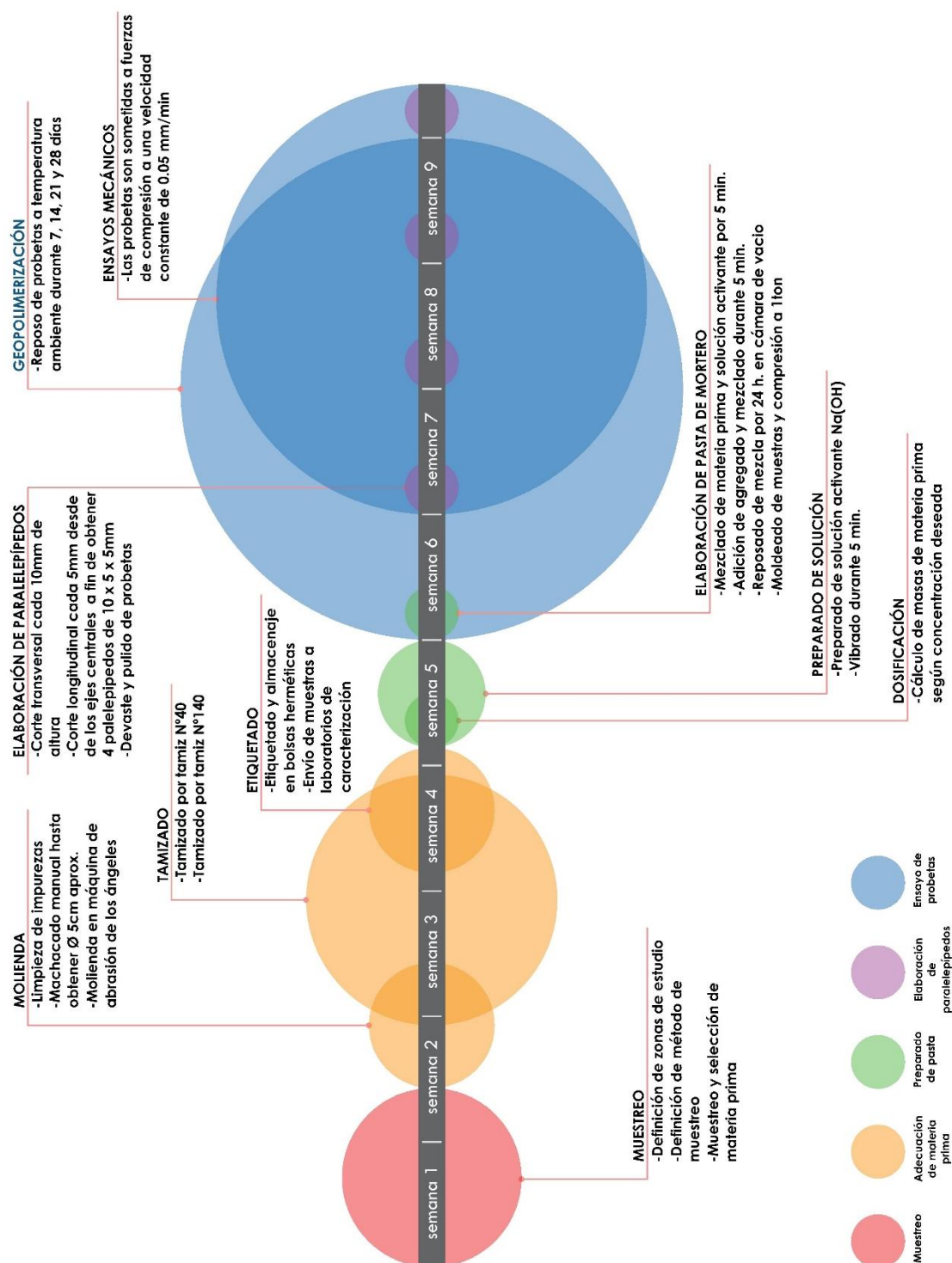


Figura 5. Metodología de fabricación.

Fuente: Elaboración propia.

prima propuesta, residuos de demolición (arcilla calcinada y mortero reciclado) y polvo de ignimbrita; además de su caracterización mecánica y morfológica por microscopía óptica.

3.1 Adecuación preliminar de la materia prima:

La investigación partió de la identificación y recolección de dos tipos de materiales precursores, que fueron: rajas de ignimbrita y residuos de demolición (morteros y ladrillos); para los primeros se realizó un muestreo sistemático en zigzag de las faldas de las canteras de Añashuayco ubicadas en el cono norte, a 1 hora aproximadamente del centro de la ciudad de Arequipa (Perú), y los segundos de una zona de desmonte de residuos de demolición, ubicada en la Cooperativa Universitaria, en el distrito de Paucarpata, en la ciudad de Arequipa (Figura 6) . Los materiales recolectados fueron llevados al laboratorio donde fueron triturados, molidos y luego tamizados por malla n° 140 (106 micras), tal como se observa en la Figura 7.

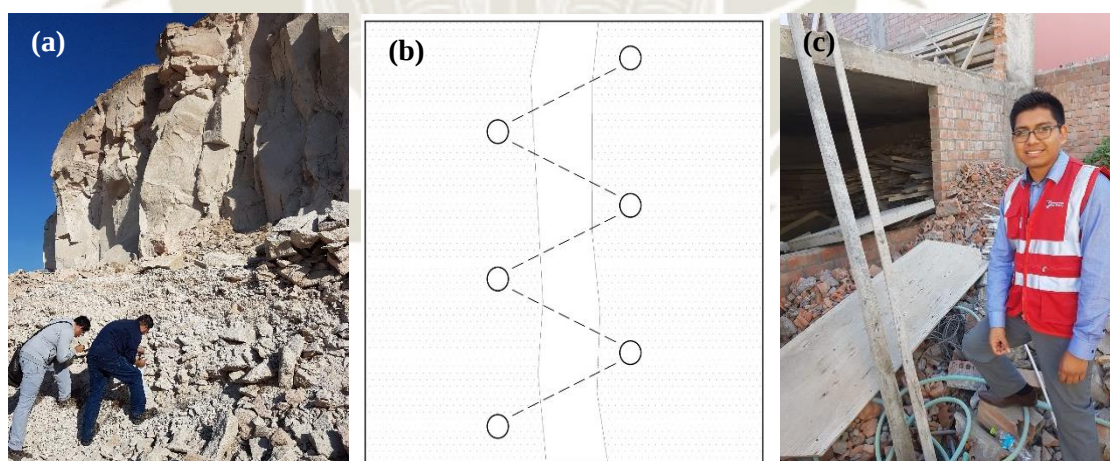


Figura 6. Identificación y recolección de materiales: (a) muestreo de rajas de ignimbrita en las faldas de la cantera de Añashuayco (Arequipa, Perú), (b) muestreo sistemático en zigzag de las canteras y (c) muestreo de residuos de demolición (mortero y ladrillos de arcilla cocida)

Fuente: Elaboración propia.



Figura 7. Adecuación preliminar de los materiales precursores: (a) rajas de Ignimbrita, (b) ladrillo de demolición, (c) mortero de demolición, (d) equipo de trituración, (e) ladrillo triturado, (f) tamizado de ignimbrita a 106 micras (g) ladrillo molido y tamizado, (h) ignimbrita molido y tamizado y (i) mortero molido y tamizado.

Fuente: Elaboración propia.

3.2 Fabricación de los compuestos geopoliméricos:

Se prepararon dos tipos de materiales geopoliméricos: (1) aligantes geopoliméricos a partir de la mezcla de polvo de materia prima (Ignimbrita, mortero de demolición o arcilla calcinada) y una solución alcalina endurecedora de hidróxido de sodio con concentraciones de 5, 10 y 15 molar y (2) morteros geopoliméricos a partir de la mezcla de polvo de materia prima aligante (Ignimbrita, mortero de demolición o arcilla calcinada), arena fina y una solución alcalina endurecedora de hidróxido de sodio con concentraciones de 12, 15 y 18 molar. Para el caso de los morteros geopoliméricos se usó una relación volumétrica arena/materia prima aligante de 62.5:37.5, además en todos los casos se usó una relación solución endurecedora/materia prima aligante de 0.5.

El procedimiento que se siguió para la elaboración de los geopolímeros incluyó las siguientes etapas: (1) medida de cantidades adecuadas de polvos de materia prima aligante y de arena fina (en el caso de morteros geopoliméricos) (Figura 8(a)), (2) preparación de la solución alcalina endurecedora (Figura 8(b)), (3) mezcla de polvo de materia prima aligante y solución alcalina para la formación de la pasta geopolimérica (Figura 8(c)), (4) adición de arena fina en proporción adecuada (sólo en el caso de morteros geopoliméricos), (5) prensado en molde cilíndrico (Figura 8 (d)) y (6) geopolimerización en bolsas herméticas (Figura 8(e)), obteniendo finalmente muestras de geopolímero como la mostrada en la Figura 8(a).

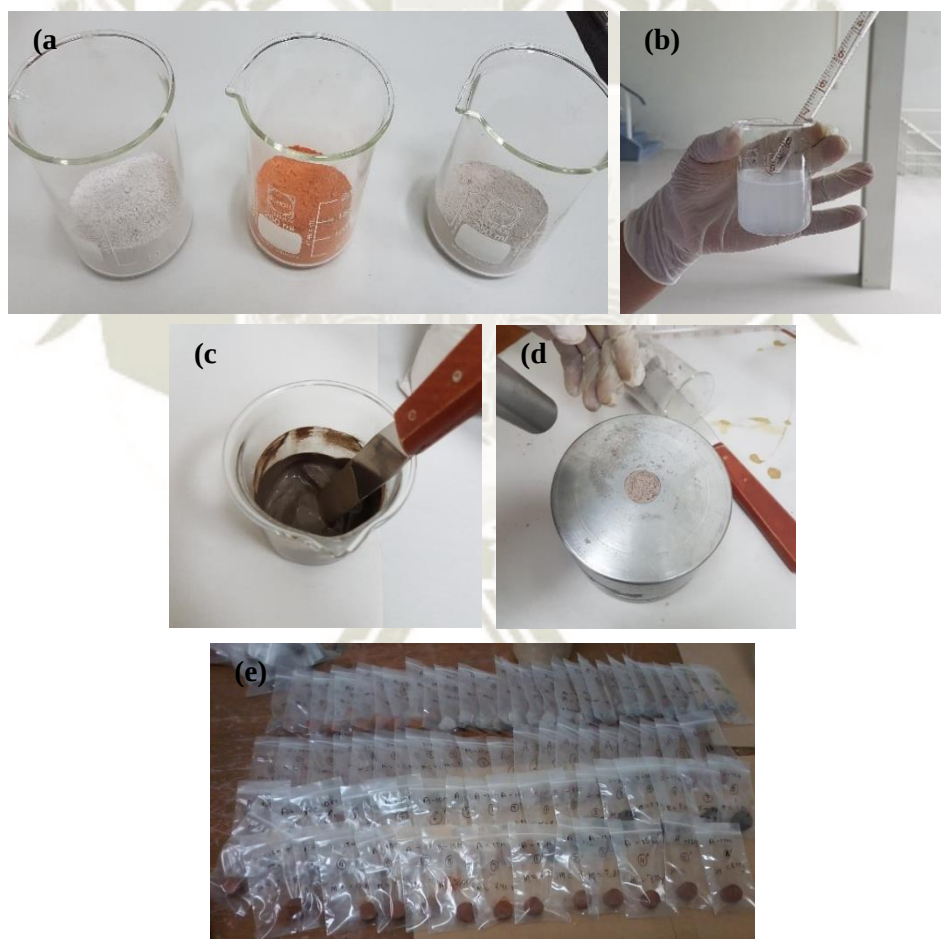


Figura 8. Etapas de fabricación de geopolímeros (aligantes y morteros): (a) medida de masas, (b) preparación de solución alcalina, (c) formación de pasta geopolimérica, (d) moldeado y (e) geopolimerización/endurecimiento.

Fuente: Elaboración propia.

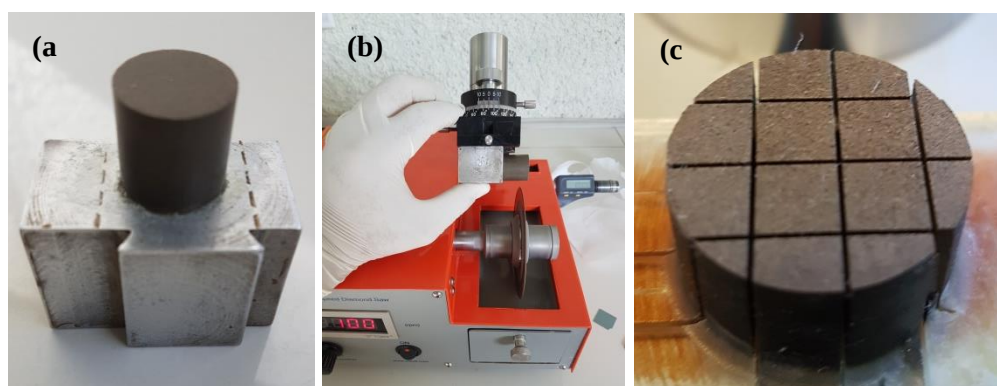


Figura 9. Etapas para la obtención de paralelepípedos geopoliméricos: (a) aspecto macroscópico de una probeta cilíndrica geopolimérica, (b) corte paralelo a la sección transversal de los cilindros geopoliméricos y (c) paralelepípedos obtenidos luego de cortes perpendiculares.

Fuente: Elaboración propia.

Cada muestra cilíndrica de geopolímero fabricado fue cortada en muestras paralelepípedicas de tamaño 5x5x10 mm aproximadamente. Para el corte de los paralelepípedos se utilizó una cortadora de precisión de baja velocidad provista de un disco de corte de borde adiamantado (Figura 9 (b)). Se empezó con dos cortes paralelos (Figura 9 (b)) para obtener discos de 10 mm de altura, luego se realizaron cortes perpendiculares a la sección transversal de los cilindros para la obtención de paralelepípedos como los mostrados en la Figura 9(c).

Los paralelepípedos geopoliméricos fueron utilizados para la caracterización física, mecánica y morfológica.

Es importante mencionar la necesidad de determinar las condiciones y parámetros más adecuados para la obtención de materiales geopoliméricos a partir de residuos de Ignimbrita y de demolición (ladrillos y mortero), para esto se consideró 04 criterios básicos, que finalmente nos permitieron acotar progresivamente la metodología final de fabricación, estos criterios fueron:

- Trabajabilidad de la pasta geopolimérica,
- Resistencia mecánica mínima necesaria para su uso como morteros estructurales (según el Reglamento Nacional de Edificaciones de Perú (RNE)),
- Costo/beneficio mecánico del precursor alcalino (Na(OH)), y
- Resistencia máxima a la compresión de aligantes y morteros fabricados.

Por otro lado, la nomenclatura utilizada para la identificación de las muestras estudiadas sigue el orden del esquema de la Figura 10.

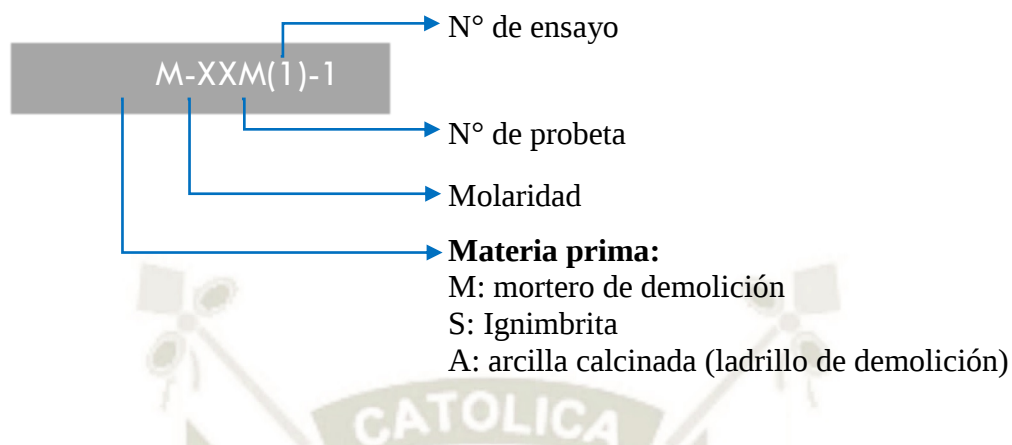


Figura 10. Nomenclatura para la identificación de los materiales estudiados.

Fuente: Elaboración propia.



CAPÍTULO 4: RESULTADOS

4.1 Granulometría por difracción laser de luz

Para la presente investigación estos ensayos se desarrollaron en el laboratorio de rayos x de la Universidad de Sevilla, España. Se evaluaron (04) tipos de materiales: ignimbrita (Ignimbrite), arcilla calcinada de demolición (calcined clay), mortero de demolición (demolition mortar) y arena fina (fine sand). Antes de su caracterización granulométrica, todas las muestras han sido trituradas en molino de laboratorio y tamizadas por malla ASTM N° 140 (106 micras de paso). La *Figura 11* presenta los resultados del análisis, en la cual se puede evidenciar que los tamaños promedios de partículas de ignimbrita, arcilla calcinada, mortero de demolición y arena fina de construcción son 61, 68, 64 y 83 micras respectivamente.

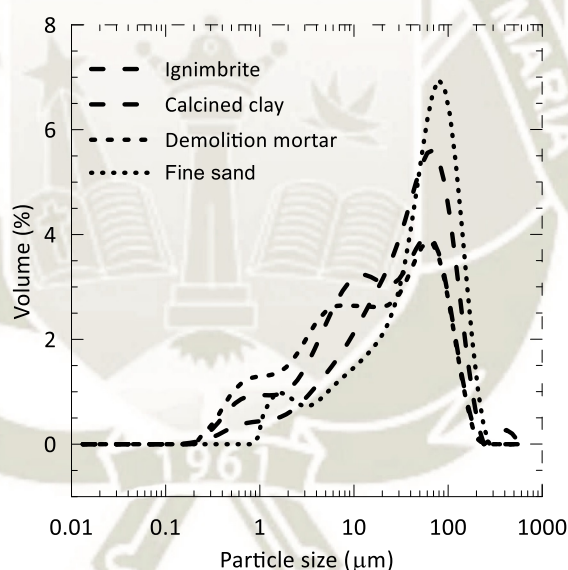


Figura 11. Curvas de distribución de tamaños de partículas con 03 repeticiones, para ignimbrita, arcilla calcinada, mortero de demolición y arena fina.

Fuente: Elaboración propia.

4.2 Difracción de rayos x

Las muestras analizadas fueron: arcilla calcinada, arena fina, mortero de demolición e ignimbrita y se realizaron en el Laboratorio de Difracción de Rayos X de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, las condiciones de la medición para todas las muestras fueron:

- Difractómetro marca BRUKER, modelo D8-FOCUS.
- Se empleó un tubo de Cu cuya longitud de onda, correspondiente a $K_{\alpha 1}$ -Cu, es $\lambda=1.5406\text{\AA}$.
- Rango angular de análisis (2θ):
- Inicio: 5°
- Final: 100°
- Paso: 0.02°
- Tiempo por paso: 0.5 seg.

Las muestras analizadas tuvieron que ser pulverizadas usando un mortero de agatha, para luego ser tamizadas usando una malla de tamiz N° 340 con el fin de reducir su textura granulosa.

Los difractogramas obtenidos en las cuatro muestras analizadas se presentan en *Figura 13*, *Figura 12*, *Figura 15* y *Figura 14*, en las cuales se pudo identificar:

Ignimbrita: Albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), Muscovita ($\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$), Cristobalita (SiO_2) and Microcline (KAlSi_3O_8)

Mortero de demolición: Cuarzo (SiO_2), Albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), Muscovita ($\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$), Cristobalita (SiO_2), Actinolita ($\text{Ca}_2(\text{Mg},\text{Fe}^{2+})_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$), Anortita ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$), Portlandita ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), Calcita ($\text{Ca}(\text{CO}_3)$) y Chlorita ($(\text{Mg},\text{Al})_6(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$).

Arcilla calcinada: Cuarzo (SiO_2), Albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), Muscovita ($\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$), Cristobalita (SiO_2), Actinolita ($\text{Ca}_2(\text{Mg},\text{Fe}^{2+})_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$) y Anatase (TiO_2).

Fine sand: Albite ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), Muscovite ($\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$), Cristobalite (SiO_2), Actinolite ($\text{Ca}_2(\text{Mg},\text{Fe}^{2+})_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$) y Anorthite ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$)

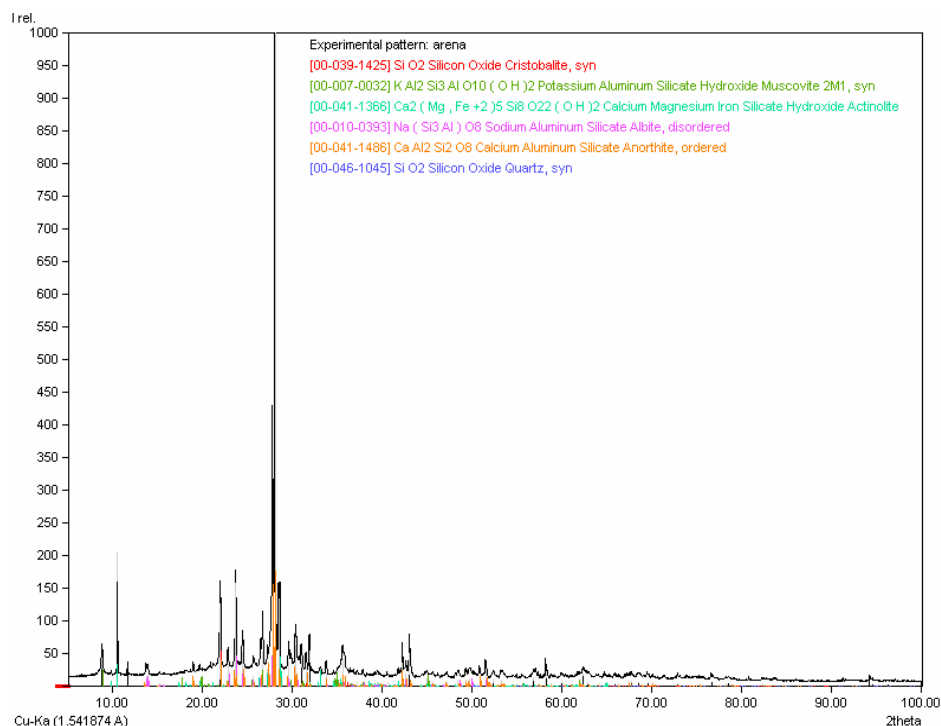


Figura 13. Difractograma de la muestra de arena fina con los picos de las principales fases identificadas.

Fuente: Elaboración propia.

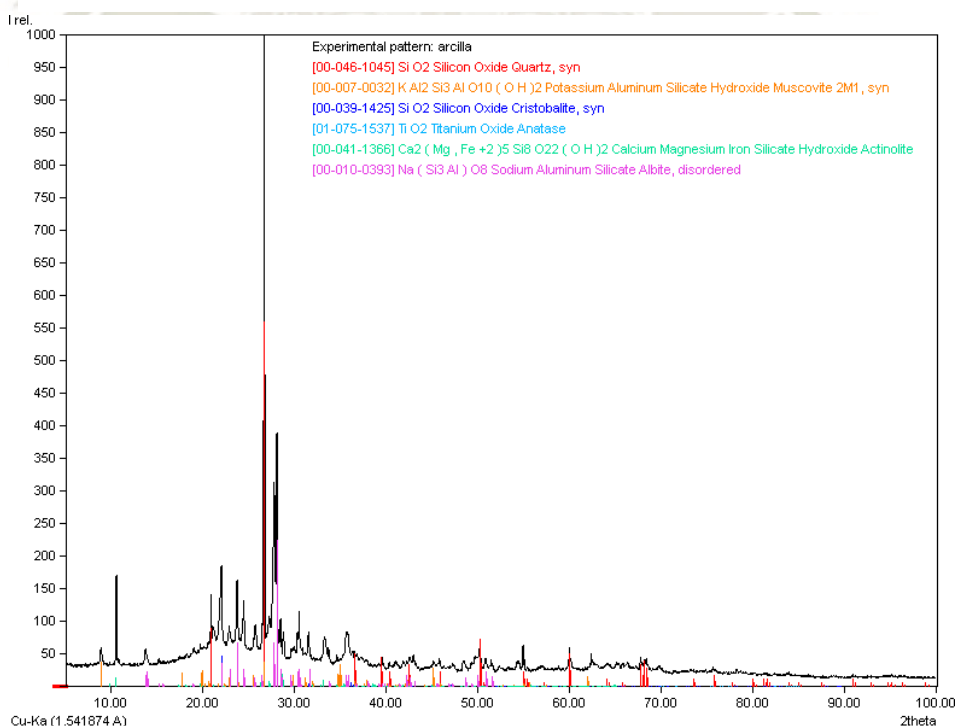


Figura 12. Difractograma de la muestra de arcilla calcinada con los picos de las principales fases identificadas.

Fuente: Elaboración propia.

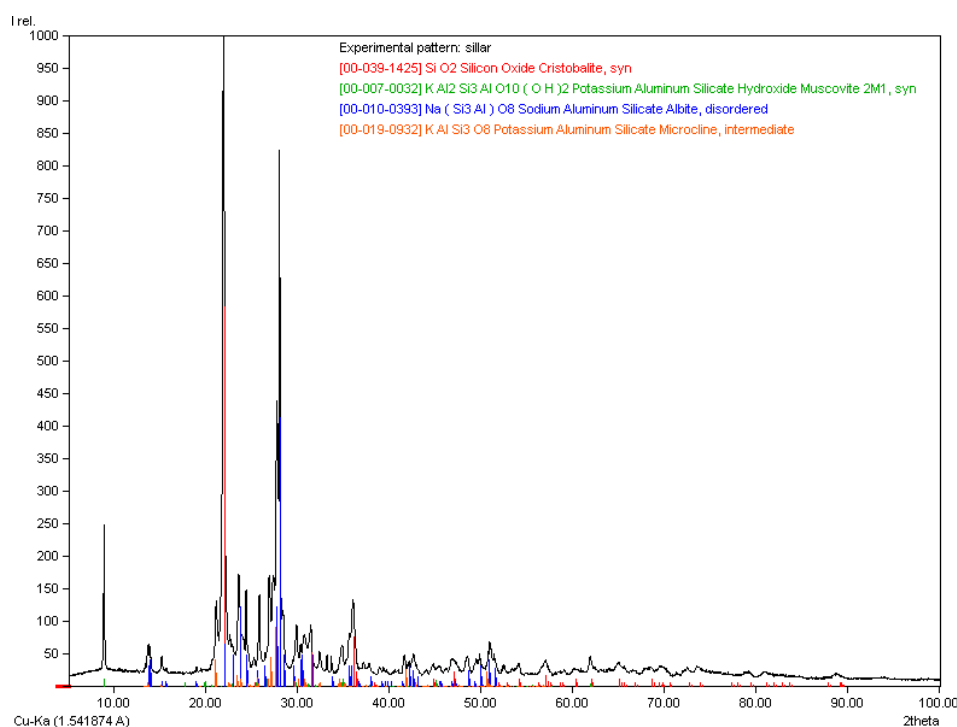


Figura 15. Difractograma de la muestra de sillar blanco con los picos de las principales fases identificadas.

Fuente: Elaboración propia.

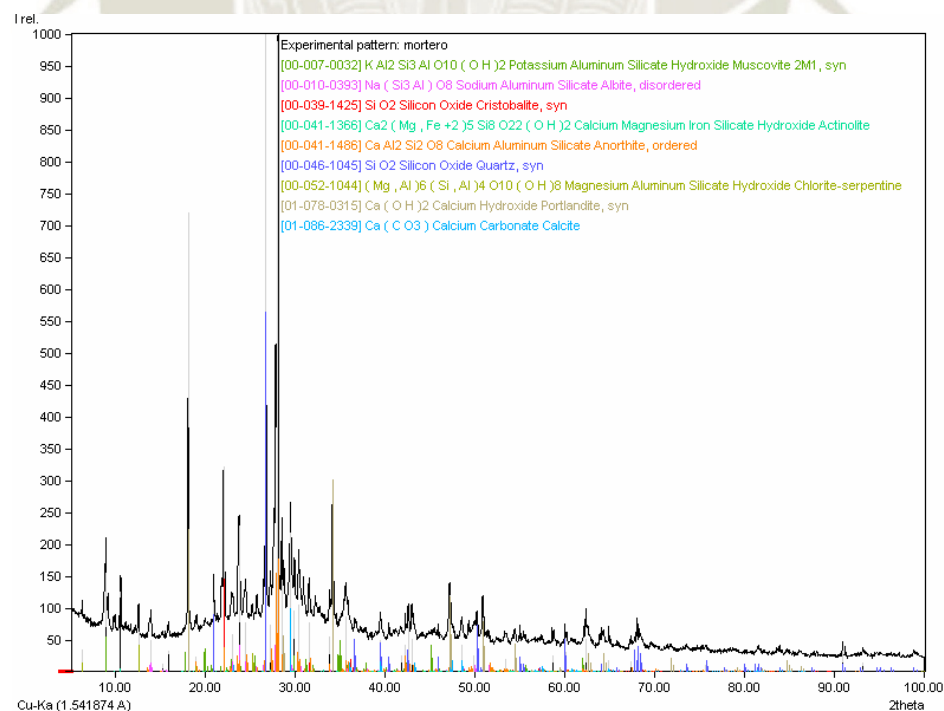


Figura 14. Difractograma de la muestra de mortero de demolición con los picos de las principales fases identificadas.

Fuente: Elaboración propia.

4.3 Microscopía óptica

Para la caracterización morfológica de los materiales fabricados se empezó con la preparación metalográfica de una cara de un paralelepípedo de un determinado tipo de material geopolimérico, ésta preparación consistió de dos etapas: (i) desbaste con papel abrasivo de SiC (#600, #800 y #1200) y (ii) pulido mecánico con paños, suspensión de pulido y pasta de diamante de tamaño de partícula de 6, 3 y 1 micra. Luego del pulido las superficies fueron limpiadas con agua destilada y dejadas al sol para evaporación de la humedad remanente. Finalmente, las superficies pulidas y secas fueron observadas en un microscopio óptico en modo reflexión.

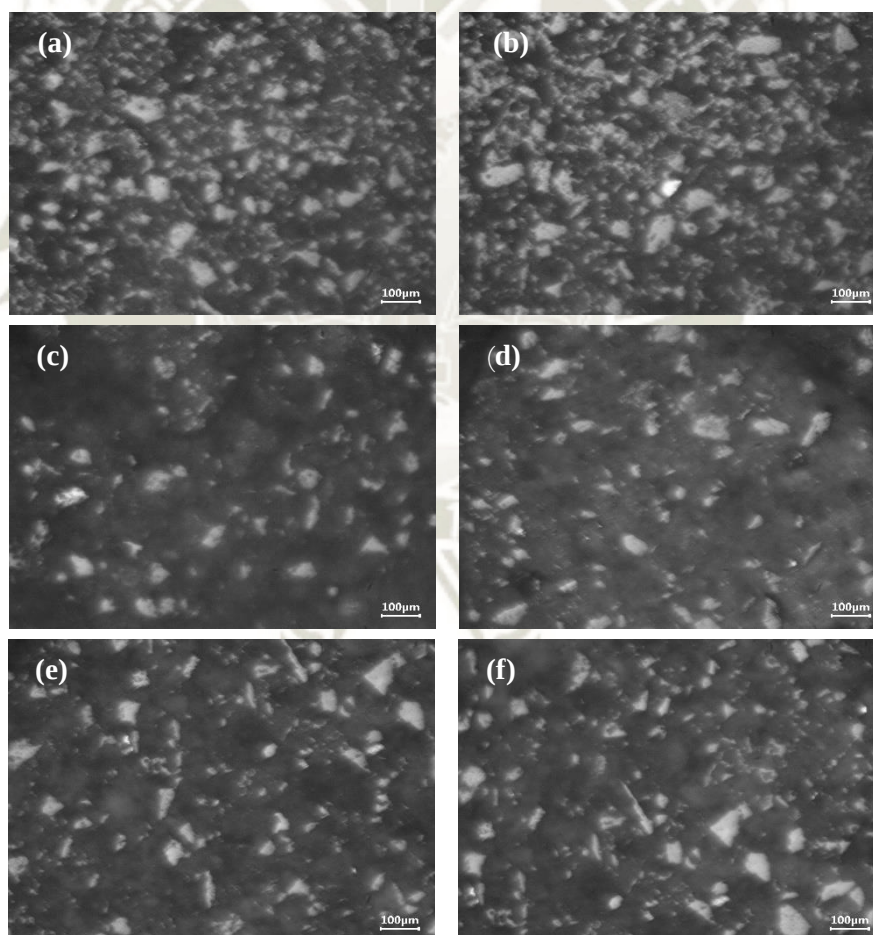


Figura 16. Micrografías por microscopía óptica de superficies pulidas de morteros geopoliméricos derivados de arcilla calcinada (a,b), mortero de demolición (c,d) y polvo de Ignimbrita (e,f).

Fuente: Elaboración propia.

En la *Figura 16* se muestran micrografías obtenidas por microscopía óptica de superficies metalográficamente pulidas de morteros geopoliméricos derivados de arcilla calcinada de demolición *Figura 16* (a,b), mortero de demolición *Figura 16* (c,d) y polvo de Ignimbrita *Figura 16* (e,f). En todos los casos se ha podido claramente diferenciar dos fases: (1) fase continua de contraste oscuro que correspondería al aligante geopolimérico y (2) fase discontinua de granos aislados unos de otros en contraste claro, y de diversos tamaños de grano, que corresponderían a los granos de arena fina.

4.4 Ensayos mecánicos de compresión

La caracterización mecánica consistió en pruebas resistencia a la compresión uniaxial a temperatura ambiente a velocidad de 0.05 mm/min. Para éste tipo de ensayos se usó la configuración mostrada en la *Figura 17*.

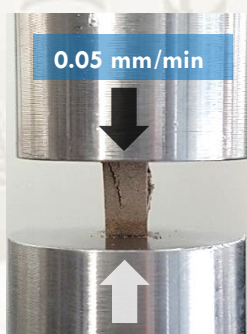


Figura 17. Configuración típica de un ensayo de compresión uniaxial a temperatura ambiente.

Fuente: Elaboración propia.

Los datos brutos de fuerza y posición obtenidos de los ensayos fueron analizados en curvas esfuerzo vs. deformación, determinando la respuesta máxima antes de la fractura final.

Primero se presentarán los resultados mecánicos obtenidos en las probetas de aligantes geopoliméricos y luego los de morteros geopoliméricos. Como se mencionó en la sección 3.2 Se han fabricado aligantes geopoliméricos a partir de 03 tipos de precursores: residuos de Ignimbrita, mortero reciclado y arcilla de demolición y una solución de Na(OH) de 5, 10 y 15 molar.

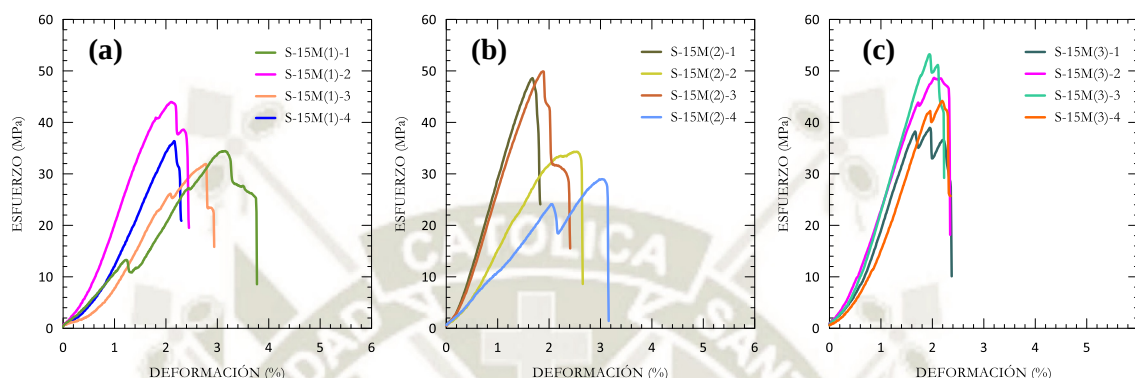


Figura 18. Curvas esfuerzo vs. deformación para paralelepípedos de aligantes geopoliméricos obtenidos de polvo de Ignimbrita y una solución endurecedora de Na(OH) 15 M.

Fuente: Elaboración propia.

En la *Figura 18* se muestran los resultados de resistencia máxima a la compresión uniaxial para probetas de aligante geopolimérico derivados de polvo de Ignimbrita y una solución endurecedora de Na(OH) 15M, en esa misma figura se pueden identificar valores de resistencia máxima en el rango de 29 y 53 MPa para todas las curvas, que superan largamente los 17.5 MPa mínimos para aplicaciones como mortero estructural, según el RNE del Perú. Las pastas de aligante geopolimérico derivados de polvo de Ignimbrita y soluciones endurecedoras de Na(OH) 5 y 10 molar no cumplieron con el criterio de trabajabilidad (ver sección 3.2), obteniendo pastas poco cohesivas y de limitada comprensibilidad, por lo tanto, se descartó de la metodología final el uso de soluciones endurecedoras con esas concentraciones. Adicionalmente hay que indicar que, aunque los aligantes geopoliméricos derivados de Ignimbrita con concentración molar 15 de la solución endurecedora tuvieron buenos resultados mecánicos, no significa que sea la concentración óptima, en cualquier caso, el valor de la concentración molar de la solución será entre 10 y 15 molar, sin perjudicar sustancialmente la resistencia máxima a la compresión uniaxial, es decir, manteniendo valores superiores a los que se solicita en aplicaciones de mortero estructural, según el RNE del Perú.

La *Figura 19* muestra los resultados mecánicos para aligantes geopoliméricos obtenidos a partir de polvo de arcilla calcinada (ladrillos de demolición) y una solución endurecedora de Na(OH) con concentración de 10 y 15 molar. Los valores de resistencia máxima para las probetas con solución 10M están en el rango de 22 y 26 MPa, mientras que aquellas con concentración 15M llegan hasta 42 MPa. Hay que señalar que las pastas geopoliméricas de arcilla calcinada con solución alcalina 5M fueron descartadas por presentar problemas de trabajabilidad. De lo anterior, y considerando el criterio costo/beneficio mecánico (sección 3.2), se ha determinado que la concentración 10 molar en la solución alcalina endurecedora de aligantes geopoliméricos derivados de residuos de ladrillos de demolición fue hasta ese momento la más adecuada.

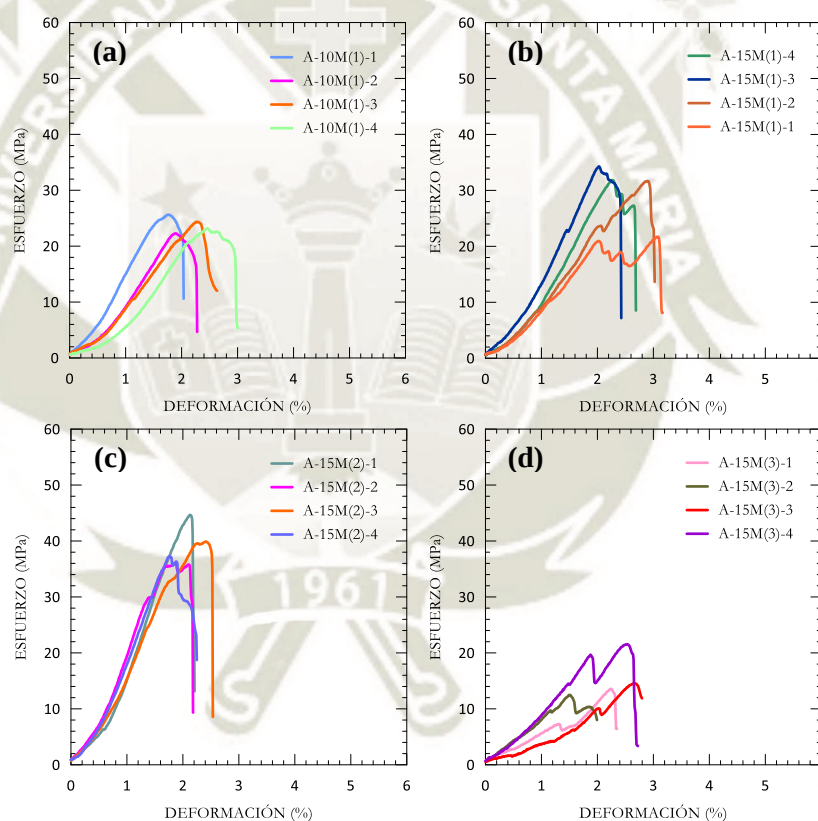


Figura 19. Curvas esfuerzo vs. deformación para paralelepípedos de aligantes geopoliméricos obtenidos de polvo de arcilla calcinada (ladrillos de demolición) y una solución endurecedora de Na(OH) con concentración de (a) 10M y (b-d) 15M.

Fuente: Elaboración propia.

En el caso de las probetas de aligantes geopoliméricos fabricados a partir de polvo de mortero reciclado se han obtenido curvas esfuerzo vs. deformación con valores de entre 27 y 45 MPa para concentraciones de solución endurecedora de 10M (*Figura 20 (a-c)*) y de 31 a 50 MPa para concentraciones de 15M (*Figura 20 (d-f)*). Las pastas geopoliméricas de aligantes con concentración 5M fueron descartadas de la metodología final por falta de trabajabilidad.

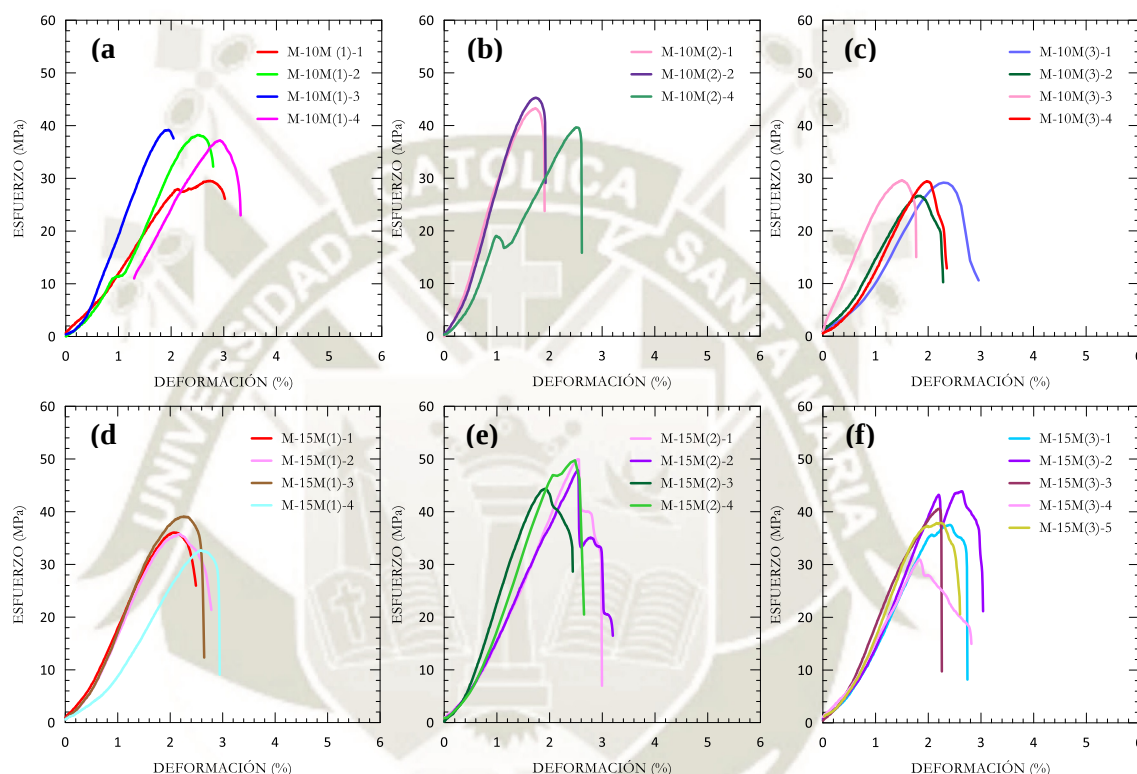


Figura 20. Curvas esfuerzo vs. deformación para paralelepípedos de aligantes geopoliméricos obtenidos de polvo de mortero reciclado y una solución endurecedora de Na(OH) con concentración de (a-c) 10M y (d-f) 15M.

Fuente: Elaboración propia.

De los valores de resistencia máxima mostrados en la *Figura 20* se puede deducir que la concentración más adecuada para la solución alcalina endurecedora usada en la fabricación de aligantes geopoliméricos derivados de polvo de mortero de demolición es 10 M, ya que éste valor cumple con todos los criterios de fabricación presentados en la sección 3.2.

Las *Figura 18* a *Figura 20* mostraron resultados mecánicos para aligantes geopoliméricos derivados de Ignimbrita, arcilla calcinada de ladrillos de demolición y mortero de demolición, respectivamente, de estos resultados y en forma general, se podría concluir que para una concentración molar de 10M a más

es posible obtener aligantes geopoliméricos con resistencias mecánicas a la compresión uniaxial por encima de los 20 MPa.

Tras conocer la respuesta mecánica de los aligantes geopoliméricos, se planteó:

- (1) Añadir a la pasta geopolimérica de polvo de mortero de demolición una fracción volumétrica de arena fina, con una relación en volumen polvo precursor aligante/arena fina de 37.5:62.5. Con la adición de arena a la pasta geopolimérica se espera que las probetas ganen en resistencia mecánica.
- (2) Probar mayores concentraciones en las soluciones endurecedoras, fabricando morteros de aligantes geopoliméricos de polvo de mortero de demolición con soluciones de Na(OH) al 12, 15 y 18 molar. Se buscó conocer el límite de saturación de concentración de solución endurecedora.

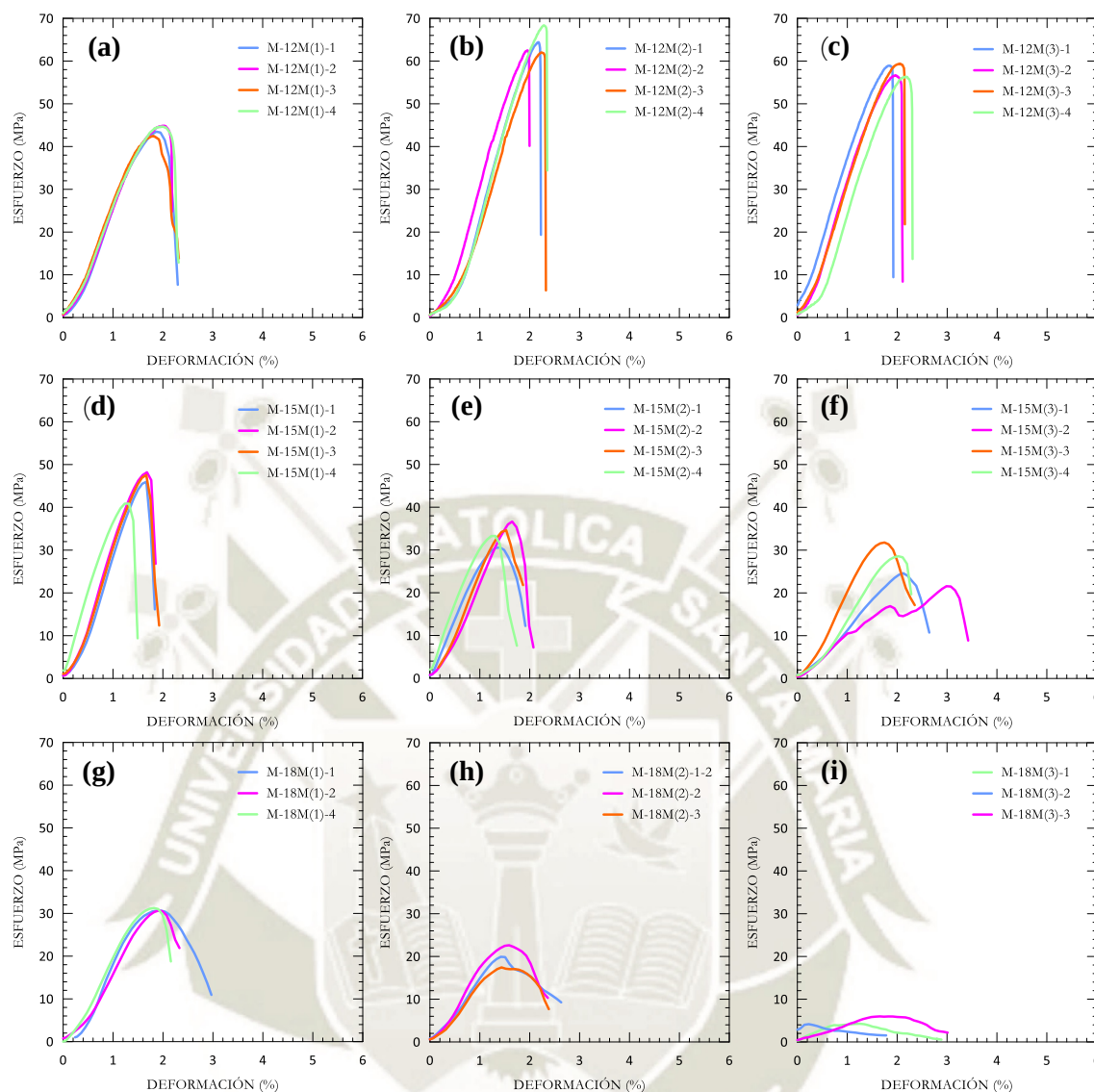


Figura 21. Curvas esfuerzo vs. deformación para paralelepípedos de morteros geopoliméricos obtenidos de polvo de mortero reciclado y una solución endurecedora de Na(OH) con concentración de (a-c) 12M, (d-f) 15M y (g-i) 18M.

Fuente: Elaboración propia.

La *Figura 21* muestra los resultados mecánicos encontrados en morteros geopoliméricos derivados de polvo de mortero de demolición, con concentración de solución endurecedora de 12, 15 y 18 molar.

La *Figura 21* revela resistencias mecánicas máximas de hasta 68 MPa (*Figura 21(b)*) para morteros geopoliméricos con 12 M de concentración de la solución endurecedora. En general se ha observado un incremento sistemático de la resistencia mecánica por adición de arena fina, tal como ocurre en los morteros tradicionales de cemento Portland. Los valores de resistencia máximas para morteros geopoliméricos con 12 molar de concentración de la solución

endurecedora están por encima de 40 MPa, que supera largamente el valor mínimo (17.5 MPa) del RNE para ser denominado mortero estructural.

Otro aspecto importante que se desprende de la *Figura 21* es la disminución sistemática de los valores de resistencias máximas a medida que la concentración de la solución endurecedora aumenta de 12 a 18 M, este resultado sugiere que valores de concentración molar de la solución endurecedora por encima de 12 molar saturan las interfaces aligante geopolimérico-arena fina con compuestos base sodio, que limitan la transferencia de carga desde el aligante geopolimérico hacia las partículas de arena fina, reduciendo de ese modo la respuesta mecánica global del mortero, al menos esta es la hipótesis que se tendría para explicar el fenómeno encontrado.

Para la verificación de la metodología final se fabricaron morteros geopoliméricos de los tres tipos de materias primas, con una relación volumétrica polvo precursor aligante/arena fina de 37.5:62.5 y una concentración molar de 12. Los resultados mecánicos obtenidos a los 7 días de endurecimiento se muestran en la *Figura 22*.

De la *Figura 22* se puede evidenciar que, en todos los casos, y usando una concentración 12 molar, se logra superar el valor mínimo requerido de 17.5 MPa para aplicaciones como mortero estructural en la industria de la construcción.

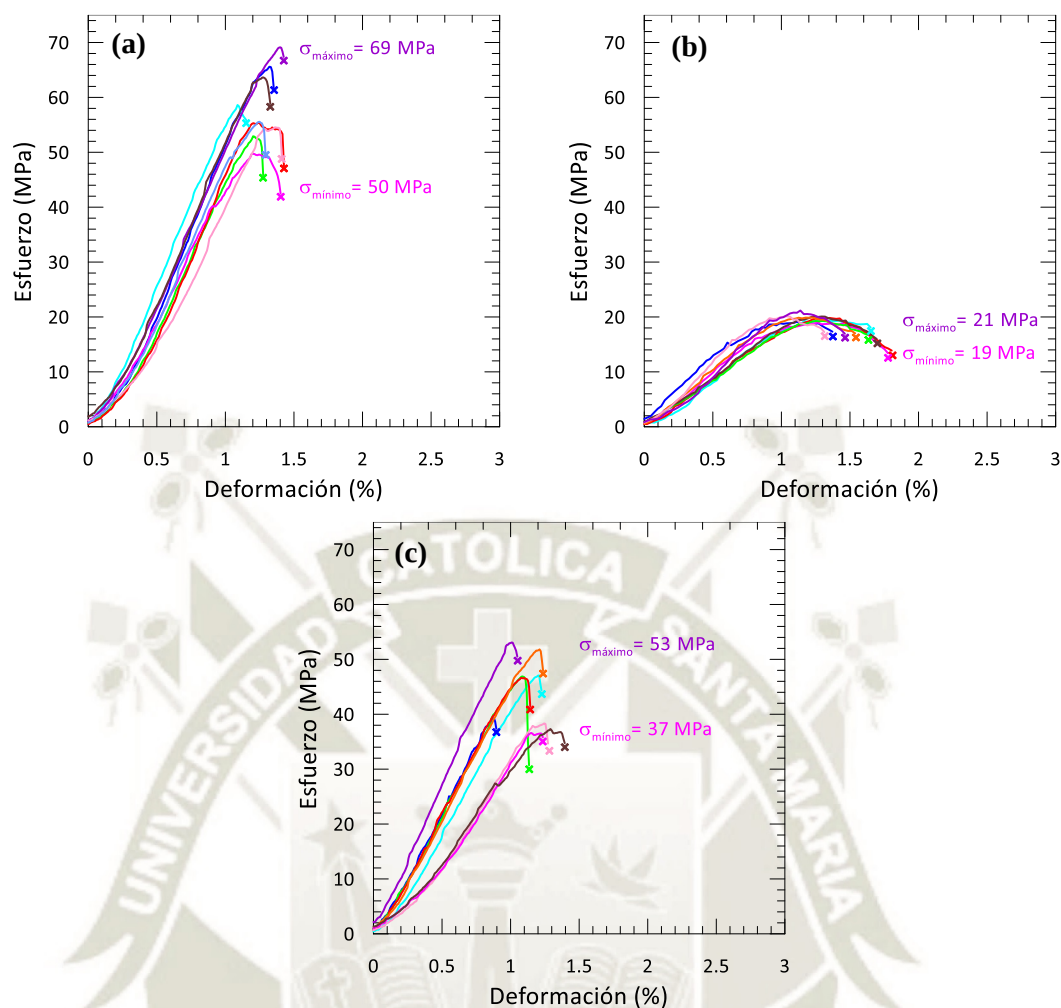


Figura 22. Curvas esfuerzo vs. deformación para la validación de la metodología final de fabricación de morteros geopoliméricos derivados de (a) arcilla calcinada, (b) mortero de demolición y (c) polvo de ignimbrita.

Fuente: Elaboración propia.

4.5 Ensayos termomecánicos

La caracterización termomecánica consistió en pruebas de resistencia a la compresión uniaxial a las temperaturas de -20°C , -10°C , 200°C , 300°C , 400°C , 450°C , 500°C y 600°C a una velocidad constante de 0.05 mm/min. Estos resultados permiten comprender el comportamiento mecánico de los materiales cuando son sometidos a diferentes temperaturas.

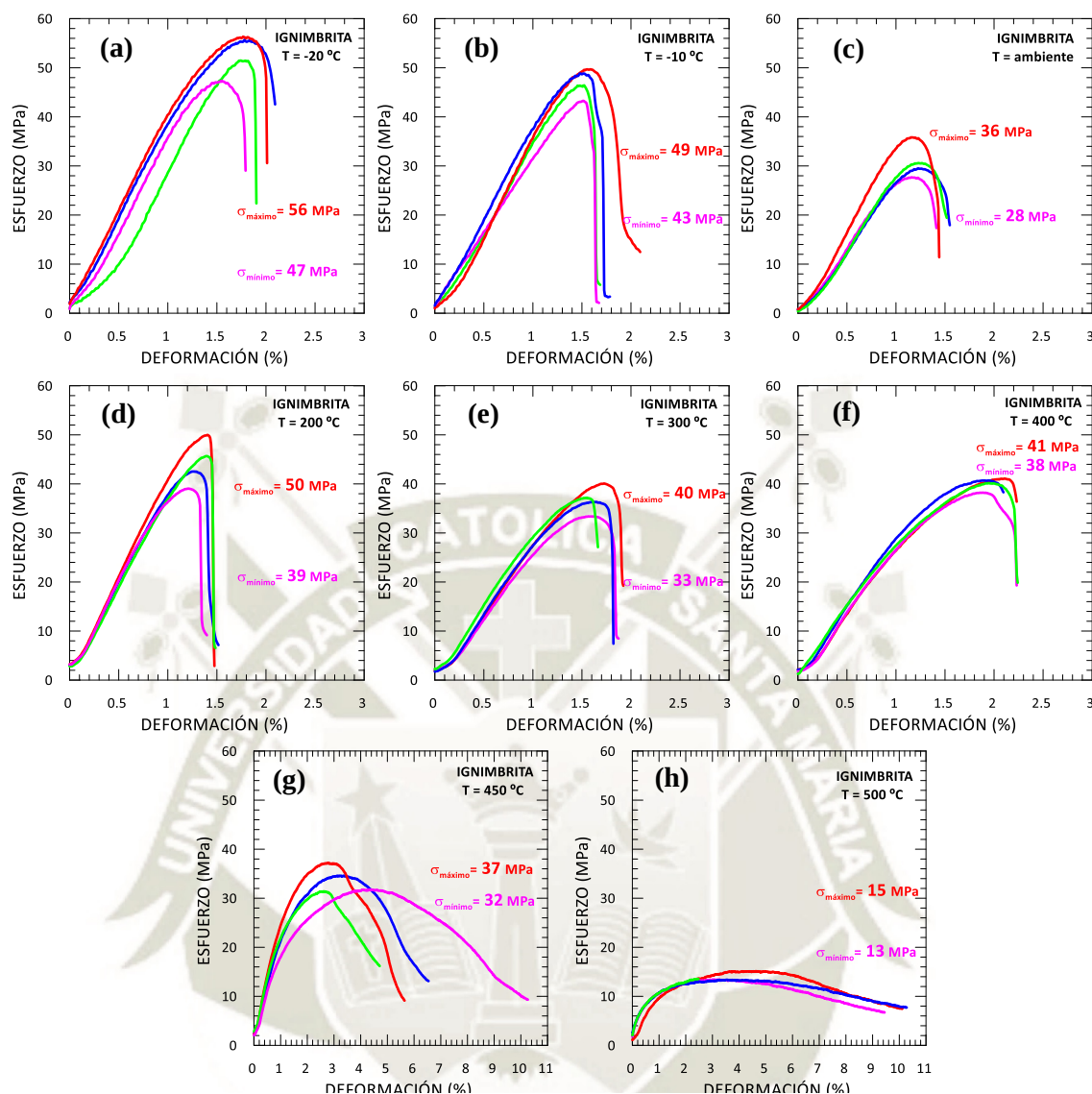


Figura 23. Curvas esfuerzo vs. deformación de mortero geopolimérico fabricado a partir de ignimbrita frente a esfuerzos de compresión a temperaturas de (a) $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, (b) $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, (c) temperatura ambiente, (d) $200\text{ }^{\circ}\text{C}$, (e) $300\text{ }^{\circ}\text{C}$, (f) $400\text{ }^{\circ}\text{C}$, (g) $450\text{ }^{\circ}\text{C}$ y (h) $500\text{ }^{\circ}\text{C}$.

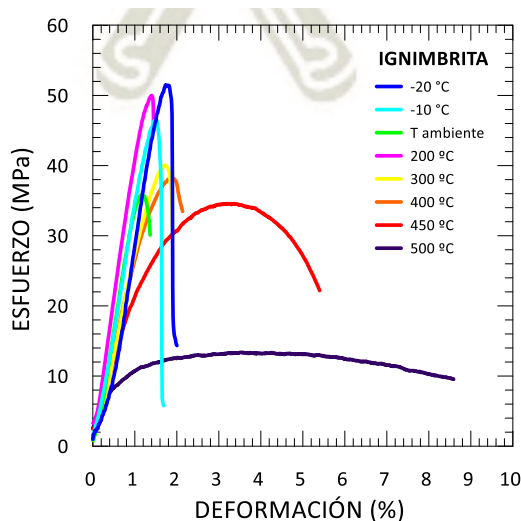


Figura 24. Curvas representativas de esfuerzo vs. deformación de mortero geopolimérico fabricado a partir de ignimbrita a temperaturas variables.

De los ensayos por repetición realizados a diferentes temperaturas, en la *Figura 22* se puede notar que representan un comportamiento similar en cada una de las 4 repeticiones y por lo tanto todos los ensayos pueden ser considerados para el análisis.

En la *Figura 23* se muestran los resultados de los ensayos termomecánicos a temperaturas variables del mortero geopolimérico elaborado a partir de escombros de ignimbrita. Se puede notar que en comparación a la temperatura ambiente a menores temperaturas la resistencia a la compresión aumenta gradualmente (*Figura 23 (a y b)*) obteniendo una resistencia máxima de hasta 56 MPa (571.04 kg/cm²) a -20°C (*Figura 23 (a)*).

Por otro lado, los ensayos a temperaturas mayores a temperatura ambiente muestran un incremento de la resistencia máxima a la compresión hasta los 200°C (*Figura 23 (d)*) y a mayores temperaturas una gradual disminución, a 450°C se puede notar una transición de un comportamiento frágil a semi-dúctil (*Figura 23 (g)*) alcanzando una deformación de 5%, es decir el material bajo esfuerzos de compresión a esta temperatura no tiene fallas catastróficas y a 500°C se nota una mayor capacidad de deformación de hasta 9%.

En la *Figura 24* se consideraron curvas representativas de los ensayos a temperaturas variables, donde es posible notar la modificación del comportamiento mecánico del mortero geopolimérico elaborado a partir de ignimbrita.

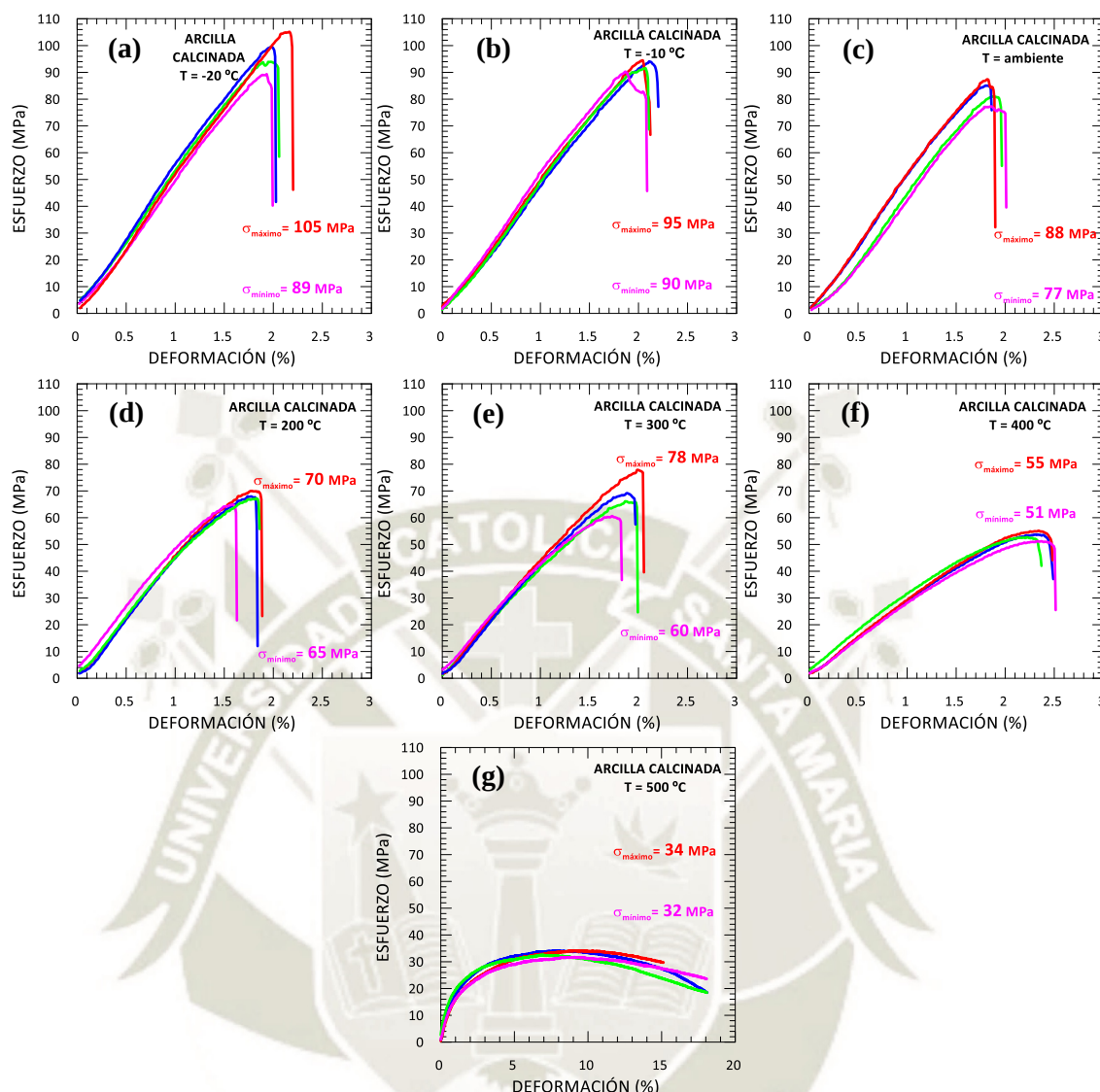


Figura 25. Curvas esfuerzo vs. deformación de mortero geopolimérico fabricado a partir de arcilla calcinada de demolición frente a esfuerzos de compresión a temperaturas de (a) $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, (b) $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, (c) temperatura ambiente, (d) $200\text{ }^{\circ}\text{C}$, (e) $300\text{ }^{\circ}\text{C}$, (f) $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ y (h) $500\text{ }^{\circ}\text{C}$.

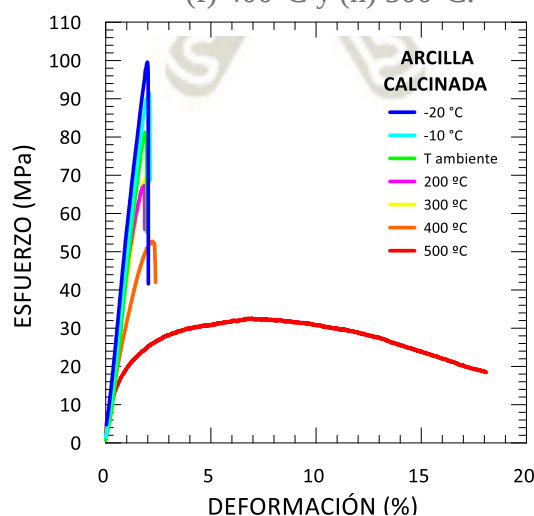


Figura 26. Curvas representativas de esfuerzo vs. deformación de mortero geopolimérico fabricado a partir de arcilla calcinada a temperaturas variables.

De los ensayos por repetición realizados a diferentes temperaturas, en la *Figura 25* se puede notar que representan un comportamiento similar en cada una de las 4 repeticiones y por lo tanto todos los ensayos pueden ser considerados para el análisis.

En la *Figura 25* se muestran los resultados de los ensayos termomecánicos a temperaturas variables del mortero geopolimérico elaborado a partir de arcilla calcinada de demolición. Se puede notar que en comparación a la temperatura ambiente a menores temperaturas la resistencia a la compresión aumenta gradualmente (*Figura 25 (a y b)*) obteniendo una resistencia de hasta 105 MPa (1070.70 kg/cm^2) a -20°C (*Figura 25(a)*). Por otro lado, los ensayos a temperaturas mayores a temperatura ambiente muestran una gradual disminución, a 500°C se puede notar una transición de un comportamiento frágil a semi-dúctil (*Figura 25 (g)*) alcanzando una deformación de 12%, es decir el material bajo esfuerzos de compresión a esta temperatura no tiene fallas catastróficas. En la *Figura 26* se consideraron curvas representativas de los ensayos a temperaturas variables, donde es posible notar la modificación del comportamiento mecánico del mortero geopolimérico elaborado a partir de arcilla calcinada de demolición.

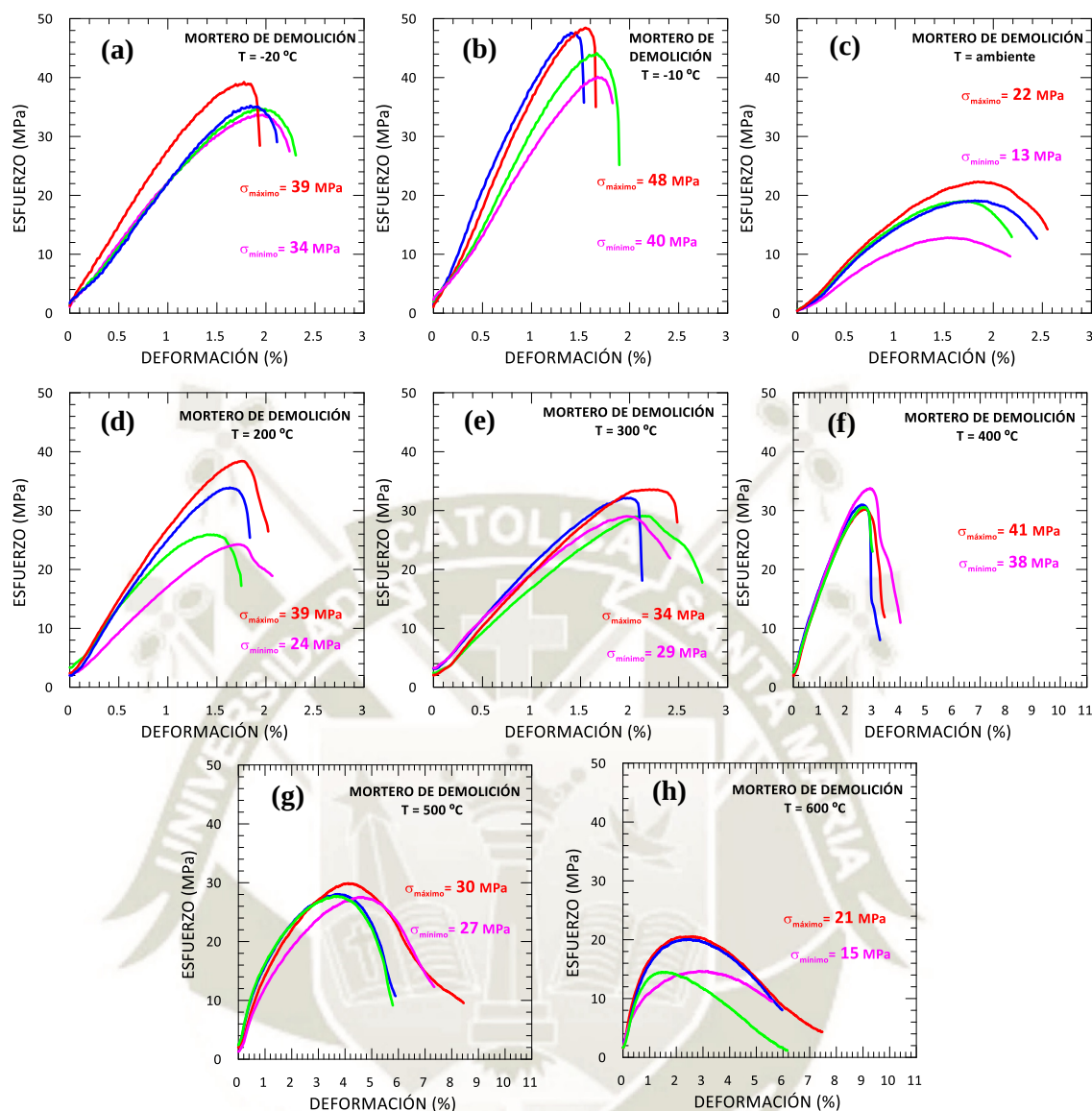


Figura 28. Curvas esfuerzo vs. deformación de mortero geopolimérico fabricado a partir de mortero de demolición frente a esfuerzos de compresión a temperaturas de (a) -20°C , (b) -10°C , (c) temperatura ambiente, (d) 200°C , (e) 300°C , (f) 400°C , (g) 500°C y

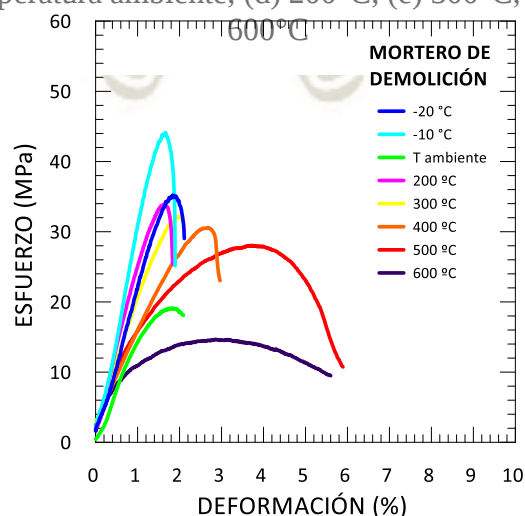


Figura 27. Curvas representativas de esfuerzo vs. deformación de mortero geopolimérico fabricado a partir de mortero de demolición a temperaturas variables.

Finalmente de los ensayos por repetición realizados a diferentes temperaturas, en la Figura 28 se puede notar que representan un comportamiento similar en cada una de las 4 repeticiones y por lo tanto todos los ensayos pueden ser considerados para el análisis.

En la Figura 28 se muestran los resultados de los ensayos termomecánicos a temperaturas variables del mortero geopolimérico elaborado a partir de mortero de demolición. Se puede notar que en comparación a la temperatura ambiente a menores temperaturas existe un notorio incremento de la resistencia a la compresión, alcanzado una máxima resistencia a los -10°C (Figura 28(a y b)) obteniendo una resistencia de hasta 48 MPa (489.46 kg/cm^2) y a -20°C (Figura 28(a)) la resistencia a la compresión promedio disminuye. Por otro lado, los ensayos a temperaturas mayores a temperatura ambiente muestran un incremento de la resistencia máxima hasta los 200°C (Figura 28(d)) y a mayores temperaturas una gradual disminución, a 500°C se puede notar una transición de un comportamiento frágil a semi-dúctil (Figura 28(g)) alcanzando una deformación de hasta 5% y a 600°C (Figura 28 (h)) se puede notar una capacidad de deformación reducida de hasta 4%. En la Figura 27 se consideraron curvas representativas de los ensayos a temperaturas variables, donde es posible notar la modificación del comportamiento mecánico del mortero geopolimérico elaborado a partir de mortero de demolición.

4.6 Resultados de ensayos de resistencia a compresión de morteros según normas peruanas

- Las normas técnicas peruanas NTP, las normas técnicas de asociación ASTM y el Reglamento Nacional de Edificaciones RNE definen el termino mortero y normalizan las proporciones de su elaboración y propiedades mínimas para su aplicación en la construcción de albañilería reforzada y no reforzada; sin embargo, el mortero descrito incluye materiales cementosos como cemento Portland, cemento hidráulico, cementos de escorias de altos hornos, cal viva, cal hidratada, pasta de cal, entre otros. Los nuevos materiales propuestos como morteros geopoliméricos no incluye cemento Portland tradicional, por lo que no puede seguir las indicaciones de las normas y reglamento mencionados. Se tuvieron que

realizar diversos ensayos de laboratorios para poder proponer una ruta de fabricación para este nuevo material.

Para poder analizar el mortero geopolimérico se realizó una comparación entre la propiedad de resistencia a la compresión del mortero elaborado con cemento Portland tradicional y mortero geopolimérico.

Para el ensayo de mortero según normativas peruanas se aplicó la Norma Técnica Peruana 334.051. Se elaboraron 3 muestras de 50mm x 50mm de cada material; para su fabricación se usó: material precursor tamizado por malla ASTM N° 100 (149 micras de paso) aumentando el tamaño de partícula con respecto a las pruebas de laboratorio, el agregado usado fue el ofertado comercialmente, los moldes usados son de bronce marca ELE y se realizó un apisonado por capas de acuerdo a lo indicado en las normas correspondientes

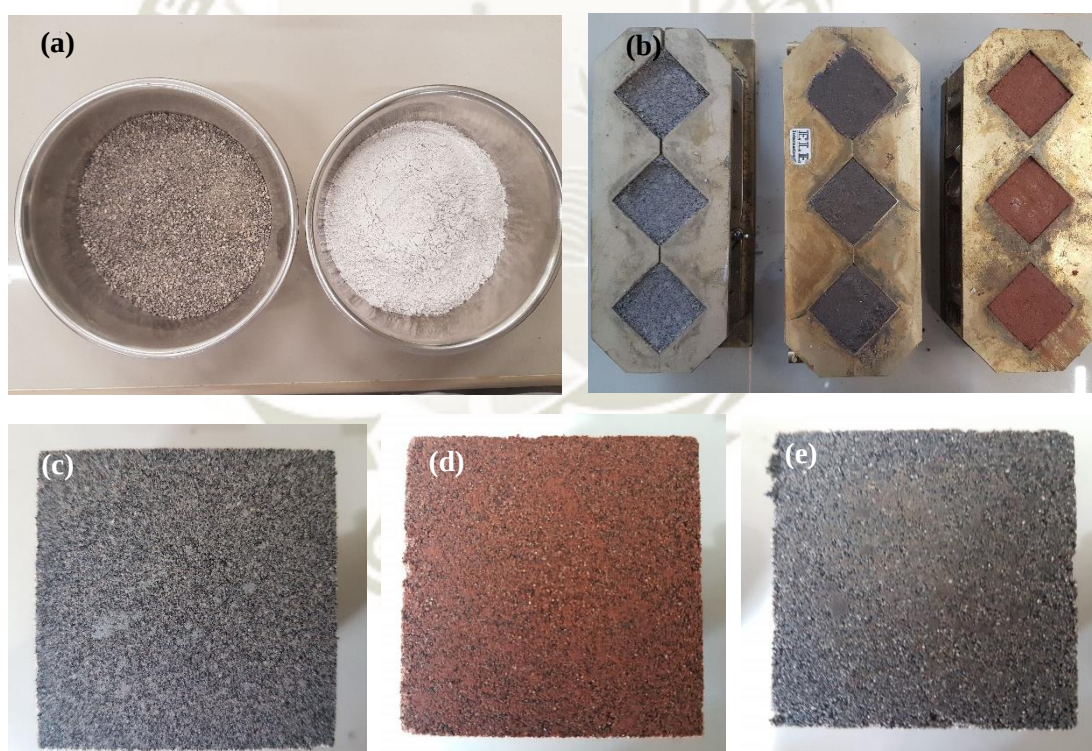


Figura 29. (a) Arena de construcción e ignimbrita tamizado por malla ASTM N°100, (b) moldeado de probetas de ignimbrita, mortero y arcilla calcinada de demolición, (c) probeta cúbica ignimbrita, (d) probeta cúbica de arcilla calcinada de demolición y (e) probeta cúbica de mortero de demolición.

Fuente: Elaboración propia.

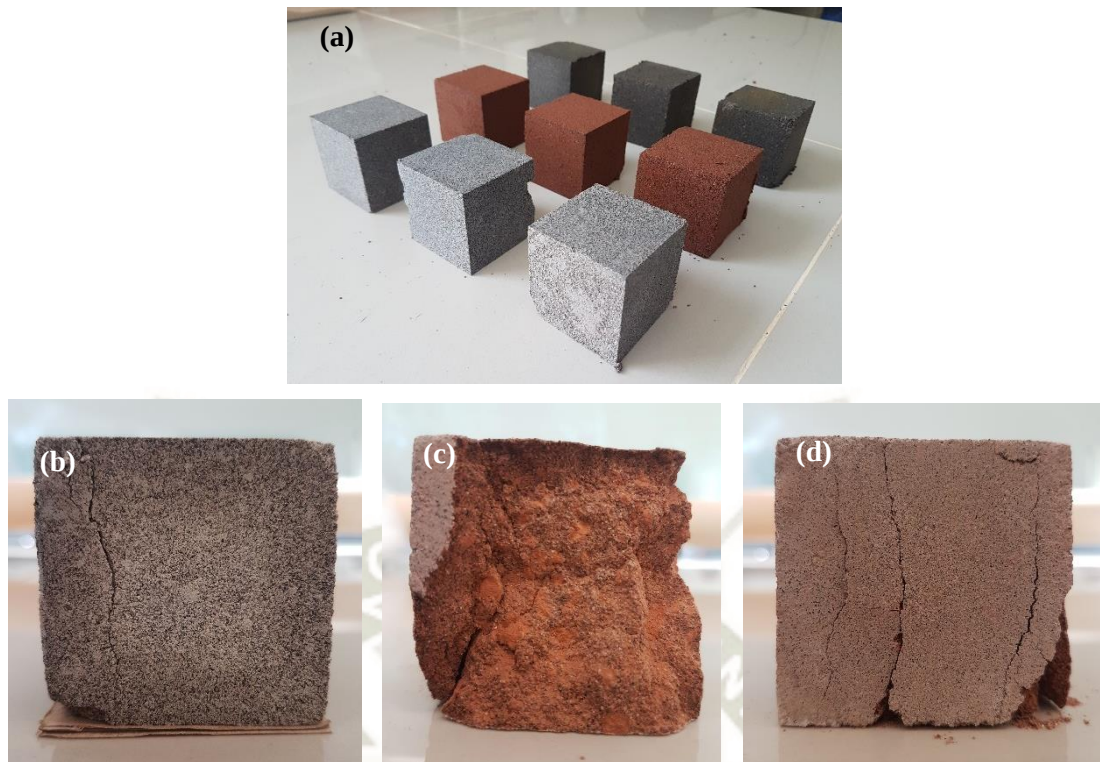


Figura 30. (a) muestras cúbicas por triplicado de cada materia prima, (b) probeta cúbica de sillar ensayada, (c) probeta cúbica de mortero de demolición ensayada y (d) probeta cúbica de arcilla calcinada de demolición ensayada.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 32 se muestran los resultados de resistencia máxima a la compresión uniaxial para las probetas de mortero geopolimérico elaboradas a partir de (Figura 32(a)) polvo de ignimbrita, (Figura 32(b)) polvo de arcilla calcinada de demolición y polvo de mortero de demolición (Figura 32(c)) elaborados según normativa peruana.

En la Figura 32(a) se puede notar que la resistencia del mortero geopolimérico de ignimbrita varía entre 8.33 MPa y 13.09 MPa, obteniendo como promedio de resistencia a la compresión de las tres muestras 10.23 MPa. En la Figura 32(b) se puede notar que la resistencia del mortero geopolimérico de arcilla calcinada de demolición varía entre 9.25 MPa y 12.54 MPa, obteniendo como promedio de resistencia a la compresión de las tres muestras 10.72 MPa; en ambos casos los promedios que superan la resistencia requerida para mortero estructural tipo S, según la Norma Técnica Peruana 339.610: Especificación normalizada para morteros. Por otro lado En la Figura 32(c) se puede notar que la resistencia del mortero geopolimérico elaborado a partir de mortero de demolición varía entre 3.21 MPa y 3.86 MPa, obteniendo como promedio de resistencia a la compresión

de las tres muestras 3.54 MPa, que superan la resistencia requerida para mortero tipo O, según la Norma Técnica Peruana 339.610: Especificación normalizada para morteros. En la *Figura 31* se muestra una curva representativa de los resultados cada materia prima, se puede notar una resistencia a la compresión muy superior por parte de los morteros geopoliméricos de ignimbrita y arcilla calcinada con respecto al comportamiento del mortero geopolimérico de mortero de demolición.



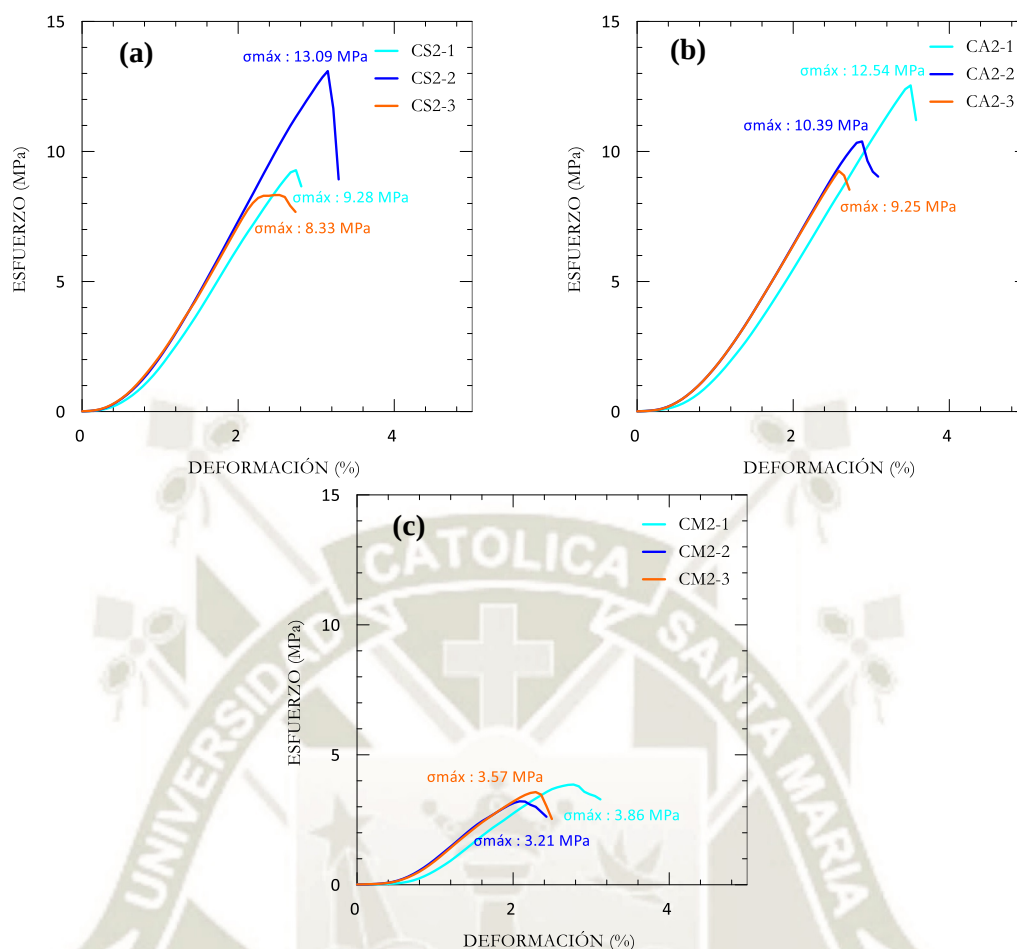


Figura 32. Curvas esfuerzo vs. deformación de morteros geopoliméricos a escala real de (a) polvo de ignimbrita, (b) arcilla calcinada y (c) mortero de demolición.

Fuente: Elaboración propia.

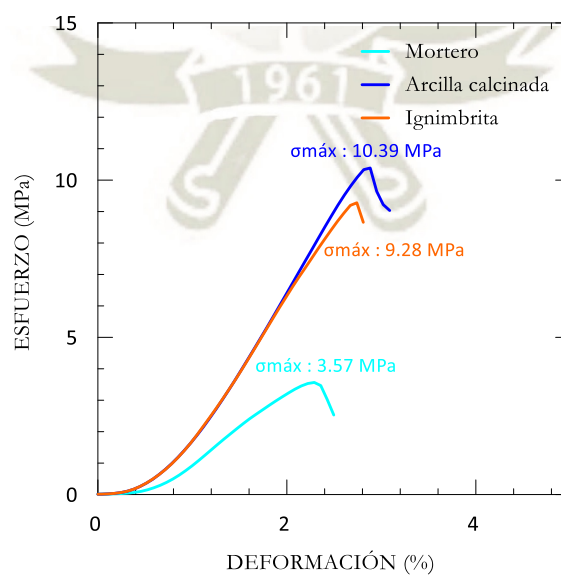


Figura 31. Curvas de esfuerzo vs. deformación representativas de los ensayos de mortero geopolimérico de ignimbrita, arcilla calcinada y mortero de demolición.

Fuente: Elaboración propia.

4.7 Resultados de ensayos para determinar la resistencia a la compresión de muestras de albañilería según normas peruanas

Para el ensayo de unidades de albañilería según normativas peruanas se aplicó la Norma Técnica Peruana 399.605 (2013). Se elaboraron 3 muestras de pilas de unidades de albañilería y para su fabricación se usó: material precursor (ignimbrita y desperdicios de demolición: arcilla calcinada y mortero de demolición) tamizado por malla ASTM N° 100 (149 micras de paso), el agregado usado fue el ofertado comercialmente y las unidades de albañilería fueron mecanizadas de 24cm x 14cm x 10cm. El equipo usado para los ensayos fue una máquina de prueba de compresión ADR Touch.

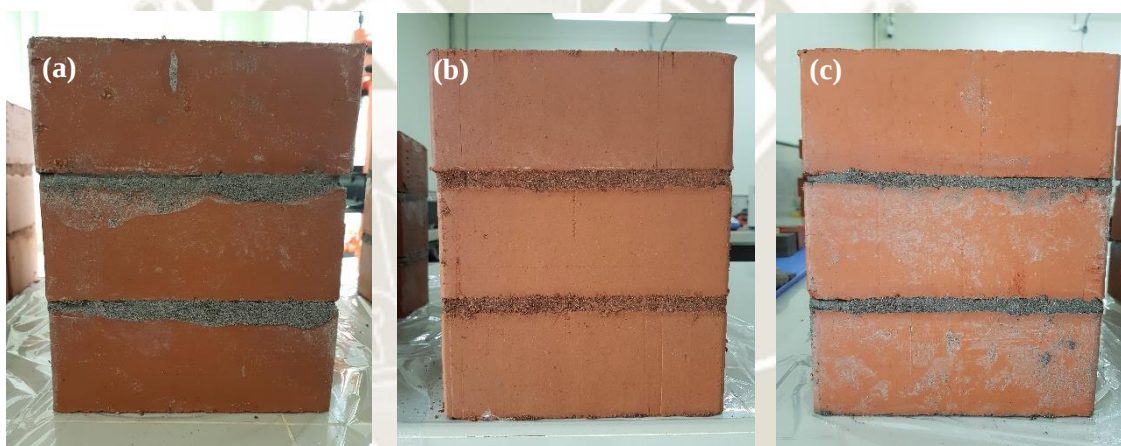


Figura 33. Muestras de albañilería sin recubrimientos superior e inferior de cada materia prima: (a) ignimbrita, (b) arcilla calcinada de demolición (c) mortero de demolición.

Fuente: Elaboración propia.

Se elaboraron prismas de 3 y 2 unidades de albañilería de altura y todas las muestras tuvieron un recubrimiento superior e inferior compuesto por cemento y yeso, para corregir irregularidades de las superficies que estarán en contacto durante el ensayo de compresión.

A todos los resultados se les aplicó el factor de corrección altura/espesor según lo indicado en las Normas Técnicas Peruanas y se obtuvo el promedio de resistencia de cada material, los resultados se muestran en la Tabla 10.



Figura 34. Ejecución de ensayo de compresión a muestras de albañilería.

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 10. Resistencia a la compresión de muestras de albañilería

Materia prima	Promedio de resistencia a la compresión con factor de corrección aplicado
Ignimbrita	6.51 MPa
Arcilla calcinada de demolición	6.84 MPa
Mortero de demolición	7.76 MPa

Fuente: Elaboración propia.

Según el Reglamento Nacional de Edificaciones. E 070. Albañilería. Capítulo 5, las muestras de albañilería elaboradas con unidades de arcilla king kong industriales deben alcanzar 6.4 MPa de resistencia a la compresión en muestras tipo pilas de albañilería. Por lo tanto, el mortero geopolimérico de cada material usado para la elaboración de las muestras puede ser considerado como mortero según el mismo reglamento.

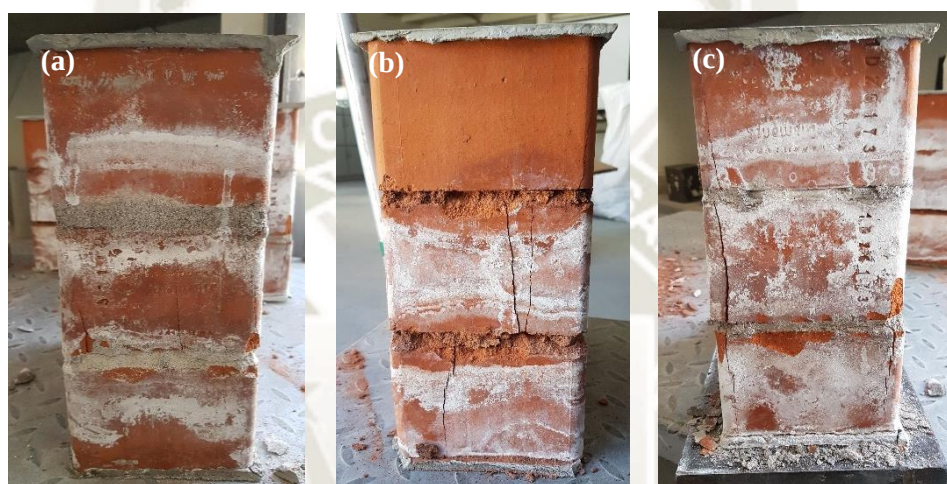


Figura 35. Muestras de albañilería de ensayadas de (a) ignimbrita, (b) arcilla calcinada de demolición (c) mortero de demolición.

Fuente: Elaboración propia.



CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES

- La construcción de viviendas colectivas es una actividad con una demanda y necesidad creciente en el país, el uso de materiales con una excesiva generación de emisiones de CO₂ para el desarrollo de esta actividad es insostenible, considerando que más del 91% de viviendas colectivas son construidas con un sistema de unidades de albañilería y aligante, siendo el cemento Portland el principal material aligante y contaminante para este sistema constructivo, es necesario buscar un aligante alternativo ecoamigable.
- Los ensayos de caracterización estructural y de tamaño de partícula muestran que las materias primas propuestas (ignimbrita y desperdicios de demolición: arcilla calcinada y mortero de demolición) cumplen con criterios requeridos para ser usados como materiales precursores para la fabricación de materiales geopoliméricos (concentración de aluminosilicatos de estructura amorfa).
- Los resultados de los ensayos de compresión a morteros según las Normas Técnicas Peruanas muestran que los morteros geopoliméricos elaborados a partir de ignimbrita y arcilla calcinada de demolición son clasificados como mortero tipo S y el mortero geopolimérico elaborado a partir de mortero de demolición es clasificado como mortero tipo O, siendo morteros aptos para su aplicación en la industria de la construcción según normativas peruanas.
- Los resultados de los ensayos termo mecánicos indican que en todos los casos a temperaturas mayores a 500 °C el mortero geopolimérico realiza una transición de material frágil a semi-dúctil, alcanzando una deformación de hasta 7%, 12% y 6% para los morteros de ignimbrita, arcilla calcinada y mortero de demolición respectivamente, sin presentar una falla catastrófica.

VIII. Propuesta

Se propone reemplazar el mortero elaborado a partir de cemento Portland por los morteros geopoliméricos fabricados a partir de ignimbrita y escombros de demolición: arcilla calcinada y mortero en la construcción de viviendas colectivas, con el objetivo de reducir las emisiones de CO₂ generadas por la producción de cemento Portland, debido a que se estima que durante la producción de este nuevo aligante alternativo se puede reducir hasta en un 90% las emisiones de CO₂ de la industria cementera global que representan el 6.3% de las emisiones globales.



IX. Bibliografía

- (Agosto de 2015). Obtenido de Ruta del sillar web site: <http://rutadelsillar.com>
- Agency, I. E. (2018). *Technology roadmap. Low carbon transition in the cement industry*. Francia: International Energy Agency.
- Bligh, R., & Tom, G. (2014). Development of Geopolymer Precast Floor panles for the Global Change Institute at University of Queensland. *Concrete Conference*, (págs. 39-43). Australia.
- c. McLellan, B., P. Williams, R., Lay, J., Van Riessen, A., & D. Corder, G. (2011). Costs an carbon emissions for geopolymer pastes in comparison to ordinary portland cement. *Journal of Cleaner Production*, 1080-1090.
- Chithambaram, S. J., Kumar, S., & Prasad, M. (2019). Thermo-mechanical characteristics of geopolymer mortar. *Construction and Building Materials*, 100-108.
- Davidovits, J. (2015). *Chemestry and applications*. San Quintín: Instituto de geopolímeros.
- Gholampour, A., Ho, V. D., & Ozbakkaloglu, T. (2019). Ambient-cured geopolymer mortars prepared with waste-based sands:. *Composites Part B*, 519-534.
- Glasby, T., Day, J., Genrich, R., & Aldred, J. (2015). EFG Geopolymer Concrete Aircraft Pavements at Brisbane West Wellcamp Airport. *Concrete Conference*. Melbourne, Australia.
- INACAL. (2013). *NTP 399.610: Especificación normalizada para morteros* . Lima: INACAL.
- INEI. (2003). Construcción. En INEI, *Perú: Compendio Estadístico 2003* (págs. 533-544). Lima.
- INEI. (2007). *Perfil Sociodemográfico*. Lima: INEI.
- INEI. (2009). Construcción. En INEI, *PERÚ: Compendio Estadístico 2009* (págs. 867-882). Lima.

- INEI. (2017). Construcción. En INEI, *Compendio Estadístico Perú 2017* (págs. 1195-1213). Lima.
- INEI. (2017). *Perú: Perfil Sociodemográfico*. Lima: INEI.
- INEI. (2018). *Informe Técnico de Producción Nacional*. Lima: INEI.
- Kani, E. N., Allahverdi, A., & John L. Provis. (2012). Efflorescence control in geopolymer binders based on natural pozzolan. *Cement & Concrete Composites*, 25-33.
- Lemougna, P. N., Wang, K.-t., U., Q. T., Melo, C., & Cui, X.-m. (2016). Recent developments on inorganic polymers synthesis and applications. *Ceramics International*, 15142-15159.
- Ministerio de vivienda, construcción y saneamiento. (2018). *Reglamento nacional de edificaciones*. Lima: El Peruano.
- Moon, V. G. (1993). Microstructural controls on the geomechanical behaviour of ignimbrite. *Engineering Geology*, 19-31.
- Naik, T. (2008). Sustainability of Concrete Construction. *Practice periodical on structural design and construction*, 13,2.
- Oh, D.-Y., Noguchi, T., Kitagaki, R., & Park, W.-J. (2014). CO2 emission reduction by reuse of building material waste in the japanese cement industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 796-810.
- Pouhet, R., & Cyr, M. (2016). Formulation and performance of flash metakaolin geopolymer concretes. *Construction and Building Materials*, 150-160.
- Rawle, A. (2018). Basic principles of particle size analysis. *Malvern Instrumens*, 1-8.
- Real Academia Española. (2017). *Diccionario de la lengua española*. Madrid: Real Academia Española.
- RILEM. (2005). *Recycling of Demolished Concrete*. Londres: Spon Press.
- Rossi, A. D., Ribeiro, M., Labrincha, J., Novais, R., Hotza, D., & Moreira, R. (2019). Effect of the particle size range of construction and demolition waste on the fresh and hardened-state properties of fly ash-based geopolymer mortars with total replacement of sand. *Process Safety and Environmental Protection*, 130-137.

Serrano, C. D. (2005). Ciudad y vivienda colectiva republicana en el Perú. *Ur[b]es*, 125-144.

Shanks, W., Dunant, C., Drewniok, M. P., Lupton, R., Serrenho, A., & Allwood, J. M. (2019). How much cement can we do without? Lessons from cement material flows in the UK. *Resources, Conservation & Recycling*, 441-454.

Tua, S. N. (2015). *Apreciaciones en torno a la ruta del sillar arequipeño*. Lima: Instituto de investigación del patrimonio cultural.

