

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL
PERÚ**

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ**

**GEOPOLÍMEROS EN LA
INDUSTRIA DE LA
CONSTRUCCIÓN: APLICACIONES
CON CENIZA VOLANTE Y
PUZOLANA NATURAL**

Tesis para optar el Título de Ingeniero Civil

Jorge Anderson SALIRROSAS TANTA

ASESORA: SUYEON KIM DE AGUILAR

Lima, abril de 2020

AGRADECIMIENTOS

Primero quiero agradecer a Dios por el haberme permitido disfrutar de esta experiencia universitaria y tener a mi lado a personas maravillosas que me apoyaron en todo momento y que con sus guías pude ser lo que soy en este momento.

Mi gratitud a la Profesora Suyeon Kim, asesora de mi tesis, al profesor Rafael Aguilar y al profesor Javier Nakamatsu por la orientación y apoyo brindado durante todo el proyecto. Además, me gustaría agradecer por la oportunidad de pertenecer al grupo de Modificación de Materiales, al laboratorio de Ingeniería y Patrimonio y ser parte del proyecto “GeoBloques: Desarrollo de Bloques de Construcción Ultraligeros con Geopolímeros”.

Así mismo, mi agradecimiento a todos mis compañeros, colegas y amigos que me acompañaron durante toda mi etapa universitaria y que me dieron su apoyo en el desarrollo de este proyecto.

Agradezco a la Compañía Minera de Agregados Calcáreos S.A. (COMACSA) y a su Gerente de investigación y desarrollo el Doctor Bruno Bertolotti por su ayuda al proveer materiales precursores para el desarrollo y producción de las muestras utilizados en este proyecto.

Estaré eternamente agradecido con la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP) por todos estos años de formación y por ser el lugar donde conocí a grandes profesionales y amigos.

Igualmente quiero expresar mi reconocimiento al Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica (CONCYTEC) por su apoyo al respaldar y financiar el desarrollo del proyecto “GeoBloque: Desarrollo de bloques de construcción ultraligeros con geopolímeros” (Convenio N°105-2017).

Finalmente, un especial agradecimiento a toda mi familia, mis padres y mis hermanos, por su apoyo y amor incondicional brindado durante toda esta etapa. Gracias por sus oraciones, consejos y valores que siempre me dieron.

RESUMEN

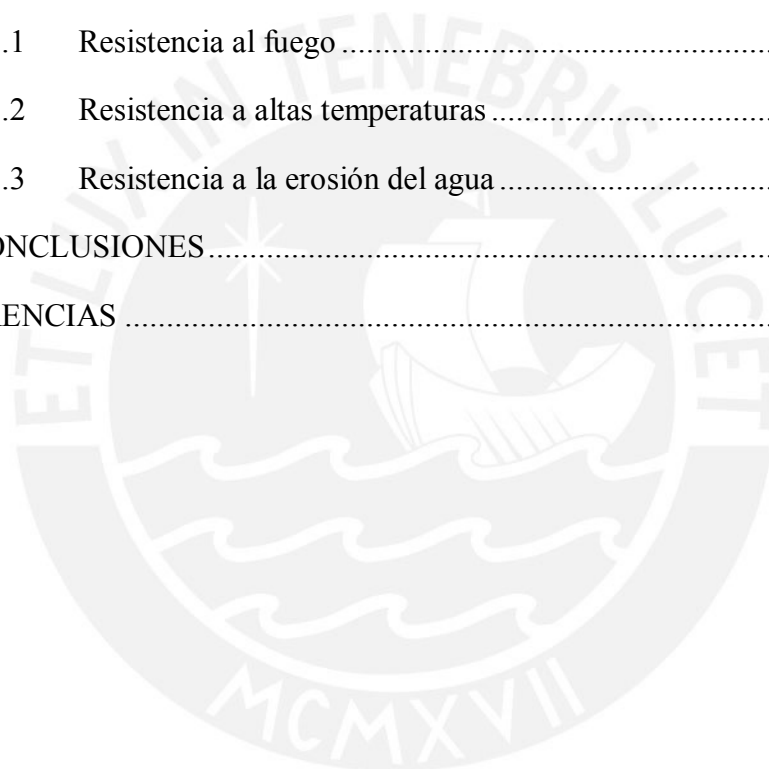
El incremento en la demanda de materiales de construcción y su producción desmesurada ocasiona un aumento en la generación de contaminantes. Por tal motivo, para reducir estas emisiones se realizan estudios e investigaciones de materiales alternativos que ocasionen menos contaminación. La presente tesis aborda el tema de desarrollo de los geopolímeros como una alternativa al cemento ordinario Portland. Para cumplir con el tema, se inició con una revisión de los conceptos generales de los geopolímeros: A qué se le denomina geopolímero y cuál es su proceso de producción, el material precursor y el agente activador en la producción y cómo están compuestos, y una descripción de los precursores empleados en la investigación. Luego de la revisión bibliográfica, la investigación se separa en dos partes definidas por el material precursor utilizado en la producción del geopolímero: Ceniza volante y puzolana natural. La primera parte consistió en la caracterización del geopolímero a base de ceniza volante para entender la producción de los geopolímeros. La caracterización consistió en obtener la dosificación con la cual se obtiene la mayor resistencia a compresión posible. La dosificación resultante fue $M_s=1.00$, $Na_2O=8\%$, $w/b=0.26$ y curado a $80^\circ C$ durante 7 días, con lo que se obtiene una resistencia a compresión igual a 34.01 MPa. La segunda parte consistió en el desarrollo de un bloque de construcción utilizando un mortero de geopolímero ligero en base a puzolana natural y fibra natural. El bloque obtenido alcanzó una resistencia de 5.3 y 5.7 MPa a 7 y 28 días, respectivamente. Adicionalmente, se realizó ensayos de durabilidad bajo condiciones agresivas, estos ensayos mostraron un buen comportamiento de los bloques frente a la acción del fuego, altas temperaturas y agua. El estudio realizado demuestra la factibilidad de emplear los geopolímeros en la construcción.

INDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS	i
RESUMEN	ii
INDICE GENERAL	iii
INDICE DE FIGURAS	vi
INDICE DE TABLAS	viii
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Motivación	2
1.2 Objetivos de tesis	3
1.2.1 Objetivo general	3
1.2.2 Objetivos específicos	3
1.3 Metodología	3
1.4 Organización de la tesis	4
2. CONCEPTOS GENERALES DE LOS GEOPOLÍMEROS	6
2.1 Introducción	7
2.2 Geopolímeros	9
2.3 Proceso de geopolimerización	9
2.4 Propiedades de los geopolímeros	10
2.4.1 Propiedades químicas	10
2.4.2 Propiedades físicas	12
2.5 Componentes del geopolímero	12
2.5.1 Material precursor	12
2.5.2 Solución alcalina	13
2.6 Puzolana	13
2.6.1 Clasificación de la puzolana	14
2.6.2 Características de la puzolana natural	14

2.7	Ceniza volante	15
2.7.1	Clasificación de la ceniza volante	15
2.7.2	Características de la ceniza volante	15
2.8	Uso de la puzolana y la ceniza volante en la construcción	16
3.	ANÁLISIS DE LAS CONDICIONES DE PRODUCCIÓN DE MATRICES DE GEOPOLÍMERO A BASE DE CENIZA VOLANTE CLASE F	17
3.1	Introducción.....	18
3.2	Descripción de los materiales.....	18
3.2.1	Ceniza volante clase F	18
3.2.2	Solución alcalina	21
3.3	Caracterización de la matriz de geopolímero a base de ceniza volante	22
3.4	Preparación de muestras.....	25
3.4.1	Fabricación de geopolímero	25
3.4.2	Variables del análisis	25
3.5	Resultados y discusión.....	27
3.5.1	Efecto de la relación molar SiO_2 y Na_2O (M_S) de la solución alcalina	27
3.5.2	Efecto de contenido de Na_2O de la solución alcalina	28
3.5.3	Efecto del contenido de agua de la solución alcalina	30
3.5.4	Efecto de la temperatura de curado de las muestras	32
3.5.5	Efecto del tiempo de curado de las muestras	34
4.	DESARROLLO DE UN BLOQUE DE GEOPOLÍMERO LIGERO A BASE DE PUZOLANA REFORZADO CON FIBRA NATURAL DE YUTE	37
4.1	Introducción.....	38
4.2	Descripción de materiales	39
4.2.1	Puzolana natural	39
4.2.2	Solución alcalina	40
4.2.3	Agente espumante.....	40
4.2.4	Agregado fino.....	40

4.2.5	Fibra de yute.....	42
4.3	Proceso de producción de un bloque de construcción.....	42
4.3.1	Dimensiones del bloque.....	42
4.3.2	Proceso de producción.....	43
4.4	Caracterización física y mecánica.....	44
4.4.1	Caracterización física.....	44
4.4.2	Caracterización mecánica.....	45
4.5	Análisis de la durabilidad bajo condiciones agresivas.....	46
4.5.1	Resistencia al fuego.....	46
4.5.2	Resistencia a altas temperaturas.....	49
4.5.3	Resistencia a la erosión del agua.....	52
5.	CONCLUSIONES.....	55
	REFERENCIAS.....	59



INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Estructura de geopolímero: (a) Una cadena polimérica y (b) cadenas poliméricas enlazadas (Adaptado de Davidovits, 2005).....	10
Figura 3.1. Características físicas de la ceniza volante clase F: (a) SEM y (b) granulometría.....	20
Figura 3.2. Materiales de la Solución Alcalina: (a)Perlas de hidróxido de sodio y (b) silicato de sodio.	21
Figura 3.3. Muestras de Geopolímero a base de ceniza volante: (a) Dimensiones del cubo de Geopolímero; (b) cubo fabricado de geopolímero y (c) esquema de molde de silicona.	22
Figura 3.4. Equipos para la medición de la densidad: (a) Vernier (Pie de rey) y (b) balanza Ohaus.....	23
Figura 3.5. Ensayo de Pulso Ultrasónico: (a) Esquema del ensayo y (b) PROCEQ Punditlink+.....	24
Figura 3.6. Ensayo de compresión: (a) Esquema de ensayo y (b) maquina universal (MTS, 2015).....	24
Figura 3.7. Efecto de relación molar SiO_2 y NaO_2 (Ms): (a) Esfuerzo a compresión; (b) densidad y (c) correlación UPV y el esfuerzo a compresión.	28
Figura 3.8. Efecto de cantidad de Na_2O : (a) Esfuerzo a compresión; (b) densidad y (c) correlación UPV y el esfuerzo a compresión.	30
Figura 3.9. Efecto de concentración de agua (a) Esfuerzo a compresión; (b) densidad y (c) correlación UPV y el Esfuerzo a compresión.	32
Figura 3.10. Efecto de temperatura de curado (a) Esfuerzo a compresión, (b) correlación UPV y el esfuerzo a compresión y (c) densidad.	34
Figura 3.11. Efecto del tiempo de curado: (a) Esfuerzo a compresión, (b) densidad y (c) correlación UPV y el esfuerzo a compresión.	36
Figura 4.1. Características físicas de la puzolana natural: (a) SEM y (b) granulometría.....	39
Figura 4.2. Características físicas del cuarzo M70: (a) SEM y (b) granulometría.	41
Figura 4.3. Dimensionado del bloque: (a) Características geométricas del bloque (Dimensiones en mm) y (b) molde metálico.....	43

Figura 4.4. Proceso de producción de bloque de construcción: (a) Mezcla seca, (b) mezcla fresca de geopolímero con peróxido de hidrogeno, (c) mezcla en el molde metálico previo a sellado y curado y (d) bloque ligero de geopolímero.....	44
Figura 4.5. Caracterización mecánica del bloque ligero de geopolímero: (a) Esfuerzo de Compresión y (b) curva esfuerzo vs deformación.....	46
Figura 4.6. Ensayo de resistencia a fuego: (a) Realización del ensayo y (b) dimensiones del disco.	47
Figura 4.7. Temperatura del lado opuesto vs. tiempo de los ensayos de resistencia al fuego.....	48
Figura 4.8. Disco de geopolímero ligero reforzado con fibra: a) Antes del ensayo y b) después del ensayo.....	49
Figura 4.9. Patrones de calentamiento de los hornos.....	50
Figura 4.10. Cubos expuestos a altas temperaturas: (a) Temperatura ambiente; (b) 300°C; (c) 500°C; (d) 800°C y (e) 1000°C.....	51
Figura 4.11. Caracterización mecánica y física de morteros de geopolímero ligero reforzado con fibras, expuestos a altas temperaturas: (a) Resistencia a la compresión y (b) densidad aparente.	52
Figura 4.12. Ensayo de humectabilidad: (a) Telescopio-goniómetro de ángulo de contacto Ramé-hart y (b) medición del ángulo de contacto.....	53
Figura 4.13. Ensayo de chorro de agua a presión: (a) Esquema de ensayo y (b) superficies de las muestras sometidas a la erosión por chorro de agua.	54

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Reportes de investigaciones de geopolímeros.....	8
Tabla 2.2. Tipos de cadenas de polisialatos dependiendo la relación Si:Al (Adaptado de Brus et al., 2016; Davidovits, 2015).....	11
Tabla 3.1. Composición de óxidos de la ceniza volante.	20
Tabla 3.2. Plan experimental para caracterización del geopolímero.	26
Tabla 4.1. Composición de óxidos de la puzolana natural.....	40
Tabla 4.2. Composición de óxidos del cuarzo M70.....	41
Tabla 4.3. Caracterización física del bloque liguero de geopolímero.....	45
Tabla 4.4. Resumen de temperatura máxima.	47



CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN



1.1 Motivación

En el entorno actual, la industria de la construcción es uno de los sectores más importantes que influye en la dinámica de una nación. Sin embargo, la producción desmesurada de los materiales que se lleva a cabo trae consigo gran emisión de contaminantes y consumo de energías. Esto se debe a que para la producción de los materiales tradicionales de construcción es necesario que distintas materias primas pasen por procesos de calentamiento, molienda, cocción y más procesos de transformación antes de obtener un producto útil para ser utilizado en la construcción.

El mayor ejemplo de contaminación y consumo de energía en esta industria de la construcción se encuentra en la producción del clinker en el cemento ordinario Portland (OPC), el material más utilizado en el sector construcción. En el año 2019, en el Perú se produjo 9,124 mil y 10,574 mil toneladas métricas de clinker y OPC, respectivamente, lo que representan incrementos de 5.2% y 7.1% en comparación del año anterior (ASOCCEM, 2019). Mientras que a nivel mundial se estima una producción de 3.7 y 4.1 mil millones de toneladas métricas de clinker y OPC, respectivamente, lo que es una cantidad similar al año anterior (U.S. Geological Survey, 2020). Además, para la producción del clinker es necesario un consumo de energía entre 1.6 a 1.85 GJ por cada tonelada (Habert, 2013) por la cocción a altas temperaturas, lo que equivale a 2-3% de la demanda global de energía (Juenger et al., 2011). Asimismo, se estima que se emite aproximadamente la misma cantidad de masa de dióxido de carbono (CO₂) y otros gases (Krishnan et al., 2014) que la masa de clinker producido, lo que equivale 5-7% de emisiones de CO₂ y 1.3% de gases invernaderos de los generados a nivel mundial (McLellan et al., 2011; Muñoz et al., 2015; Turner & Collins, 2013). Esta problemática ha hecho que más investigadores opten por estudiar materiales alternativos que ayuden a reducir las emisiones y gastos de energía como el empleo de residuos u otros tipos de fuentes de materias primas para su producción. Unidades de construcción a base de geopolímeros resaltan debido a que son materiales cementicios activados alcalinamente que poseen propiedades similares a las unidades a base de OPC y son una alternativa debido a que en su producción se generan menos contaminación y utilizan como materia prima minerales no metálicos, desechos o subproductos de procesos industriales (Suksiripattanapong et al., 2015).

1.2 Objetivos de tesis

1.2.1 Objetivo general

Fomentar el uso de los geopolímeros como materiales alternativos al cemento en el sector construcción y aumentar el conocimiento en cuanto a su uso como elementos de construcción.

1.2.2 Objetivos específicos

Analizar y proponer una optimización de la formulación de geopolímero a base de ceniza volante.

Analizar y caracterizar física y mecánicamente bloques de geopolímero ligero a base de puzolana reforzado con fibras como unidad de albañilería.

Evaluar la durabilidad de geopolímero ligero de puzolana mediante la resistencia al fuego, altas temperaturas y erosión del agua.

1.3 Metodología

Para el inicio del estudio y evaluación de los geopolímeros se hizo una revisión de la literatura. Se revisaron publicaciones en artículos, libros y normas técnicas. Además, se realizó un análisis de los conceptos generales de los geopolímeros, el proceso de fabricación y sus cualidades físicas y químicas.

Luego de la revisión, se realizó un análisis del proceso de producción del geopolímero utilizando ceniza volante como materia prima en la fabricación. En esta etapa se realizó una evaluación de la dosificación para la fabricación del geopolímero de ceniza volante utilizando la resistencia a compresión y ensayos de pulso ultrasónico para la determinación de la dosificación óptima.

A continuación, se estudió la fabricación y las características de una unidad de albañilería producida con geopolímero ligero a base de puzolana reforzado con fibra de yute. Se detalla el proceso que se siguió para la obtención del geopolímero y de la unidad de albañilería. Además, se calculó las propiedades físicas de la unidad de albañilería mediante el uso de ensayos y fórmulas.

Finalmente, se procedió a realizar ensayos para determinar y calcular las propiedades de durabilidad del geopolímero utilizado en la fabricación del bloque de geopolímero ligero frente a tres condiciones agresivas, los cuales fueron la acción del fuego, altas temperaturas y erosión por acción del agua. Primero, se midió el grado afectación del material debido al estar en contacto con el fuego. También, se midió la resistencia del material del bloque expuestos a altas temperaturas. Por su parte, los ensayos de medición de ángulo de contacto de una gota de agua y chorro a presión sobre la superficie del bloque determinaron su comportamiento frente a la acción del agua.

1.4 Organización de la tesis

La presente tesis está compuesta por cinco capítulos. El capítulo 1 presenta la introducción al trabajo en la cual incluye la motivación y los objetivos general y específicos. También, se presenta la metodología empleada en la realización de la tesis y la organización con la que se redactó.

El capítulo 2 presenta los conceptos generales de los geopolímeros. Este capítulo abarca una explicación general de lo que son los geopolímeros, las propiedades que los caracterizan y los componentes usados como fuentes de materia prima. Además, se describen a los materiales que se utilizaron para el estudio de esta tesis.

El capítulo 3 trata sobre el análisis de la producción de geopolímero a base de ceniza volante. La optimización de la producción se basa en estudiar el efecto que produce la solución alcalina en el geopolímero cambiando la relación molar de $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$, la concentración de Na_2O y el contenido de agua, y el efecto que produce en el geopolímero las condiciones de curado (temperatura y tiempo).

El capítulo 4 muestra una descripción de lo que son los bloques de geopolímero ligero a base de puzolana reforzados con fibra natural de yute, el proceso de su fabricación y

la caracterización física y mecánica. También, se analizó el comportamiento del material utilizado en la fabricación luego de ser sometido a condiciones agresivas: Contacto directo con el fuego, exposición a altas temperaturas y acción del agua.

Finalmente, el capítulo 5 corresponde a las conclusiones a las que se llega en esta tesis y discusiones para futuros trabajos.



CAPÍTULO 2

2. CONCEPTOS GENERALES DE LOS GEOPOLÍMEROS



2.1 Introducción

El concreto es uno de los materiales más importantes en el sector construcción y es el cemento el principal actor en su fabricación. Sin embargo, la producción de cemento ocasiona que se emitan grandes cantidades de contaminantes y se consuma gran cantidad de energía (Juenger et al., 2011). En la actualidad, el problema de la contaminación es uno de los campos que empiezan a tener más relevancia en investigaciones sobre construcción. Entre las alternativas que se optan por estudiar se encuentran la estandarización y eficiencia de los procesos de fabricación, uso de equipos para la captura y almacenamiento de los contaminantes, sustitución de una parte de la cantidad del clinker y el uso de materiales alternativos (Miller et al., 2018; Schneider et al., 2011).

Los geopolímeros son materiales cementicios que poseen características y propiedades potencialmente aptos para su uso en la construcción y generan menos emisiones de contaminantes en su producción. Estos factores hacen que se les considere materiales alternativos al cemento y elementos a base de cemento (Li et al., 2019). La fabricación de geopolímeros se basa en la formación de un polímero inorgánico a partir de la activación de una fuente de alúmina y sílice (aluminosilicatos) mediante la adición de una solución a base de un álcali y por lo general un curado en horno a temperaturas mucho menores a las usadas en materiales tradicionales (Davidovits, 1978). Actualmente, es un material bastante estudiado a nivel mundial pues los primeros estudios científicos de materiales geopoliméricos indicaron un cierto potencial para que estos materiales se conviertan en el cemento del futuro (Bakharev, 2005b). A su vez, las fuentes de aluminosilicatos pueden ser diversos tipos de materiales como se aprecia en la tabla 2.1, y se pueden fabricar pastas, morteros y concretos de geopolímeros. Se observa que los materiales que principalmente se utilizan para las investigaciones son desechos, subproductos o minerales naturales, por lo que la obtención del material precursor no solo no genera problemas, sino que incluso los resuelve desde el punto de vista medioambiental. También, se observa que la resistencia obtenida en los distintos estudios alcanza a lo obtenido en concretos a base de OPC (210 kg/cm² o 21 MPa) e incluso son capaces de superarlo.

Tabla 2.1. Reportes de investigaciones de geopolímeros.

Pasta / Mortero / Concreto	Material Precursor	Resistencia a Compresión (MPa) [Edad]	Referencia
Pasta	Ceniza volante	66 [4 días]	(Bakharev, 2005a)
	Escoria de alto horno	70 [1 día]	(Cheng & Chiu, 2003)
	Relave de bauxita + ceniza de cáscara de arroz	20.5 [49 días]	(He et al., 2013)
	Ceniza volante	32.4 [7 días]	(Oyun-Erdene & Temuujin, 2019)
	Puzolana	25.8 [7 días]	(Silva et al., 2019)
	Ladrillo molido	36.6 [7 días]	(Silva et al., 2019)
	Ceniza volante	40 [28 días]	(Thokchom et al., 2009)
Mortero	Ceniza volante	120 [1 día]	(Atiş et al., 2015)
	Ceniza de cáscara de arroz	45 [28 días]	(Kim et al., 2014)
	Ceniza volante	47.5 [91 días]	(Ryu et al., 2013)
Concreto	Escoria de alto horno + ceniza volante	80.5 [28 días]	(Krishnan et al., 2014)
	Residuos de demolición	46.4 [28 días]	(Vásquez et al., 2016)

Para el estudio de los geopolímeros es necesario conocer sobre este material, el proceso de fabricación y los principales agentes para su producción. Este capítulo se compone de una introducción, un resumen de los conceptos relacionados a geopolímeros, el proceso de geopolimerización y sus principales propiedades. Además, se aborda una descripción sobre los precursores que se utilizan en la fabricación de los geopolímeros de la presente tesis y su uso actual.

2.2 Geopolímeros

El término de geopolímero fue propuesto por Joseph Davidovits en 1978 luego de que en su búsqueda de un nuevo material polimérico para sustituir al cemento descubriera un polímero inorgánico con una microestructura química similar a la zeolita, pero amorfa (Davidovits, 1978). Dado que el material sintético presentado tenía una microestructura similar a las que se forman en la corteza terrestre se le otorgó el nombre de Geopolímero. El descubrimiento de este material dio auge a un nuevo campo de estudio en el área de materiales de construcción, donde el tema de estudio se centra en el uso de los geopolímeros en la construcción, que por la naturaleza del material son varias las ramas que la estudian como son los casos de: Química física, analítica, coloidal e inorgánica; Mineralogía; Geología; y varias ramas de las Ingenierías.

Los geopolímeros son compuestos de polímeros inorgánicos formados por redes de sialatos producidos por una reacción química entre un material precursor rico en óxido de aluminio y óxido de silicio en su composición química, como es el caso de la ceniza volante, metacaolín o puzolana, y una solución acuosa alcalina (Davidovits, 1978). La mezcla producida por esta reacción pasa a una etapa de curado en horno y el material resultante obtiene propiedades similares o mejores a la del concreto. Por mencionar sus propiedades se ejemplifica su buena resistencia a compresión y durabilidad ante los agentes degradantes y otros factores, además su producción genera menor contaminación y menor gasto de energía. Por sus características mencionadas se les considera como sustitutos al cemento.

2.3 Proceso de geopolimerización

El proceso de geopolimerización consiste en la formación de polímeros a partir de la reacción entre el precursor con alto contenido de aluminio y silicio y la solución alcalina de monómeros inorgánicos (Davidovits, 1978; Valenzuela Herrera, 2013). Las etapas del proceso de geopolimerización son las siguientes: Disolución del material precursor en sus componentes por acción del medio alcalino, los monómeros de aluminio y silicio se unen a los presentes en la solución a través de átomos de oxígeno formando cadenas poliméricas como se aprecia en la figura 2.1a, finalmente las

cadena se entrelazan mediante enlaces covalentes generando una red tridimensional amorfa (figura 2.1b). La estructura de las cadenas de polímeros se define por la fórmula: $M_n[-(\text{SiO}_2)_z - \text{AlO}_2]_n \cdot w\text{H}_2\text{O}$, donde M es el metal alcalino de la solución, n es el grado de polimerización, z es un número entero (1,2 o 3) y w el número de hidratación (Davidovits, 2005; Hardjito & Rangan, 2005; Khale & Chaudhary, 2007).

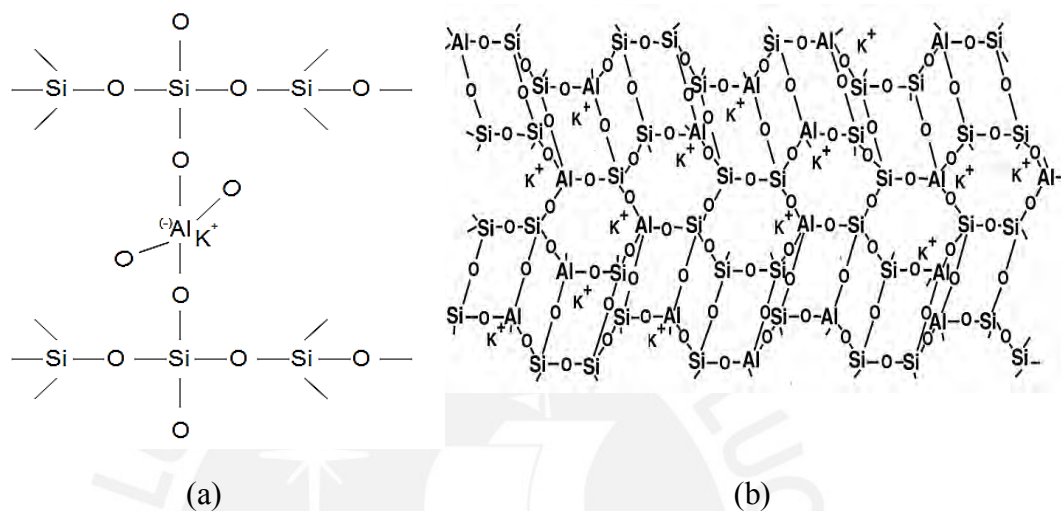


Figura 2.1. Estructura de geopolímero: (a) Una cadena polimérica y (b) cadenas poliméricas enlazadas (Adaptado de Davidovits, 2005).

2.4 Propiedades de los geopolímeros

2.4.1 Propiedades químicas

El uso de una solución alcalina en la producción requiere procedimientos de seguridad. Otra cualidad de los geopolímeros son su baja emisión de CO₂, según reporta Davidovits (2005), por la producción de una tonelada de geopolímero se emite 0.184 toneladas de CO₂, es decir, una cantidad considerablemente menor a lo generado en la producción OPC.

Adicionalmente, otra característica que destaca en los geopolímeros es su alta resistencia a ataques de agentes degradantes que sí afectan a un elemento de concreto, como son los ácidos y sulfatos. El buen comportamiento de los geopolímeros frente a agentes degradantes se debe a que los enlaces de sialato (Si-O-Al) generados en los geopolímeros son más difíciles que reaccionen con los iones de los ácidos a diferencia de los enlaces de hidratados del OPC. Thokchom, Ghosh P y Ghos S. (2009) en su

investigación expusieron muestras de geopolímero a base de ceniza volante a soluciones de ácido sulfúrico al 10% en volumen y ácido nítrico al 10% durante 24 semanas y obtuvieron como resultado que las muestras perdieron peso solo en porcentajes de hasta 1.64% y 1.42% del peso original respectivamente; sin embargo, perdieron gran parte de su alcalinidad. No obstante, las muestras conservaron su forma y color original, también conservaron su resistencia a compresión equivalentes a 54.8% y 60.3% a la original, respectivamente.

Según explica Davidovits (1978), la relación Si/Al de los sialatos dentro de la composición del geopolímero, determina las propiedades de rigidez/flexibilidad del material resultante. Para una relación 3:1 o menor, el geopolímero tiene una estructura molecular rígida, en cambio, si es mayor disminuye su rigidez y aumenta su flexibilidad. Finalmente, la composición química de los geopolímeros es, en su mayoría, de óxidos de aluminio y silicio que producen enlaces Si-O-Al como se deduce de la fórmula antes descrita esto produce distintos tipos de estructuras de polisialatos como se aprecia en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Tipos de cadenas de polisialatos dependiendo la relación Si:Al (Adaptado de Brus et al., 2016; Davidovits, 2015)

Relación Si/Al	Estructura química	Representación grafica
1	Poli(sialato) -Si-O-Al-O-	
2	Poli(silato-siloxo) -Si-O-Al-O-Si-O-	
3	Poli(sialato-disiloxo) -Si-O-Al-O-Si-O-Si-O-	

2.4.2 Propiedades físicas

Las propiedades físicas de los geopolímeros según Davidovits (1978) son las siguientes:

Mezcla Cementante: Agrietamiento durante el fraguado menor al 0.05%; módulo de Young mayor a 2 GPa; elevada resistencia a edades tempranas: 90 MPa a 28 días, 20 MPa luego de 4 horas; alta resistencia a la flexión: 10-15 MPa luego de 28 días, 10 MPa luego de 24 horas; y alta resistencia los cambios de temperaturas: menos del 0.1% de pérdida de masa en ciclos de congelación y descongelación, y humedecimiento y secado abrupto.

Concreto de Geopolímero: Expansión lineal: menor a $5 \times 10^{-6}/K$; conductividad al calor: 0.2 a 0.4 W/K. m; calor específico: 0.7 a 10 kJ/kg; conductividad eléctrica: depende fuertemente de la humedad; estabilidad térmica: menos de 5% de pérdida de masa y menos de 20% de pérdida de resistencia sobre los 1000°C; densidad estructural: 2.4 a 2.6 g/ml; densidad voluminosa: 1 a 1.9 g/ml; porosidad aparente: 15% a 30%; contracción geopolimérica: 0.2% a 0.4%; capacidad de calor específico: 0.2 cal/g°C.

2.5 Componentes del geopolímero

2.5.1 Material precursor

El material precursor para la fabricación debe contener aluminosilicatos, presentes en materiales con alto contenido de sílice y alúmina en su composición (Davidovits, 1978; Ranjbar et al., 2014; Tchadjié et al., 2016). Usualmente se trata de arcillas calcinadas y cenizas volantes que tienen como origen uno natural o artificial. El material precursor de origen natural son generados a cocción de minerales a las altas temperaturas dentro de los núcleos de magma de los volcanes y expulsados en las erupciones y humos volcánicos (Djobo et al., 2017), de origen natural también se encuentran los desechos naturales y materiales que no se han empleado en procesos industriales y no sufrieron cambio significativos. Por otro lado, los de origen artificial son subproductos generados por la reacción incompleta de materiales durante procesos industriales o son desechos de los mismos (Davidovits, 1978). La gran diversidad de materiales que pueden ser empleados como material precursor ha generado que

diferentes investigadores estudien distintas fuentes para encontrar la mezcla óptima en la producción de un geopolímero funcional para un determinado fin, como son para la producción de materiales de construcción (A. Allahverdi & Najafi Kani, 2009), aislantes (El-Naggar et al., 2019) u otros.

2.5.2 Solución alcalina

La solución alcalina actúa en la formación de geopolímeros como agente activador del proceso de geopolimerización (Davidovits, 1978). Son soluciones acuosas que interactúan con los aluminosilicatos disolviendo sus componentes en aluminatos (AlO_2^-), silicatos (SiO_3^{2-}) y sialatos ($-\text{Si}-\text{O}-\text{Al}-$), para formar los polímeros. Las soluciones se generan al disolver un hidróxido de un metal alcalino (MOH), como son el sodio (Na) o el potasio (K), para formar los cationes de estos elementos alcalinos y aniones de hidroxilo (OH^-), donde son los aniones los responsables de disolver los aluminosilicatos en sus componentes de Si y Al para formar las redes del geopolímero. La producción de la solución se debe realizar en ambientes adecuados, debido a que la disolución del hidróxido es una reacción exotérmica.

Aunque, otra solución activadora, que es más utilizada en las investigaciones, es la de silicatos alcalinos. Esta práctica se basa en la teoría de que las reacciones del proceso de geopolimerización ocurren a mayor velocidad cuando estos presentan mayor cantidad de silicatos disueltos en la solución (Hardjito & Rangan, 2005). Al agregar un silicato alcalino (MSO_4) al hidróxido alcalino en proporciones controladas se logra que en el proceso de geopolimerización haya una relación mayor de Si/Al.

2.6 Puzolana

El término Puzolana deriva del pueblo Pozzouli en Italia de donde se extraían las cenizas del Vesubio para la formación de los primeros cementos en tiempos del imperio romano (Jackson et al., 2010). Las puzolanas son materiales con alto contenido de sílice y alúmina obtenidos de la cocción a altas temperaturas de minerales de forma natural o artificial.

2.6.1 Clasificación de la puzolana

Por su origen la puzolana se divide en dos grupos:

Puzolana natural: Es un mineral no metálico que se extrae de depósitos de ceniza volcánica (Djobo et al., 2017). Durante las erupciones volcánicas son expulsados compuestos principalmente de aluminosilicatos que se enfrían rápidamente y forman materiales con estructuras amorfas. Los depósitos que se forman son materiales que están compuestos en su mayoría por puzolana, ejemplo de estos materiales se mencionan las cenizas volcánicas, piedras pómez, tobas volcánicas u obsidianas.

Puzolana Artificial: Es un material que adquiere propiedades similares a la puzolana natural luego de un proceso de tratamiento térmico (Soria Santamaría, 1983). Por lo general son desechos de procesos de calcinación, como la quema de minerales, donde los componentes de óxido de silicio y aluminio se desprenden del material original y luego forman estructuras amorfas.

2.6.2 Características de la puzolana natural

En la composición química de la puzolana resaltan el óxido de silicio, óxido de aluminio y óxido de hierro con concentraciones de más 70% de la masa de forma conjunta y es, de estos tres compuestos, el óxido de silicio el que se presenta en mayor concentración. Asimismo, en la puzolana existen otros componentes en menores concentraciones.

En cuanto a las características físicas de la puzolana se puede describir su color que por lo general es grisáceo o marrón, dependiendo del origen y las concentraciones de óxidos de silicio presentes. Existen también otros tipos de colores naturales como rojos o negros a causa de la presencia de otros óxidos. Por su parte el tamaño de partícula depende del origen y de la molienda que se realiza al material. Para la puzolana natural, después de la molienda se debe obtener, por lo general, que el 66% sea menor a $45 \mu\text{m}$ según la ASTM C 618 (2017). En cambio, las de origen artificial se forman con tamaños menores a $75 \mu\text{m}$, aunque existen productos con mayores tamaños que luego son molidos para obtener tamaños adecuados.

2.7 Ceniza volante

La ceniza volante es un residuo fino captado de los gases producidos durante la quema de carbón mineral para la generación de energía en centrales térmicas (Davidovits, 1978). Por su obtención y características la ceniza volante es considerada como una puzolana artificial según la ASTM C 618 (2017).

2.7.1 Clasificación de la ceniza volante

La clasificación de la ceniza volante es de dos tipos y está definida por la ASTM C 618 (2017):

Clase C: “*Ceniza volante alta en calcio*”. Es aquella que tiene concentración de óxido de calcio mayor a 15% de su peso. Usualmente producidos a partir de la combustión de lignitos y carbones sub bituminosos.

Clase F: “*Ceniza volante baja en calcio*”. Es aquella que tiene concentración de óxido de calcio menor a 5% de su peso. Usualmente producidos a partir de combustión de antracitas y carbones bituminosos.

2.7.2 Características de la ceniza volante

Como se menciona antes se considera a la ceniza volante como una puzolana artificial y al igual que la puzolana natural posee gran concentración de óxido de silicio, óxido de aluminio y óxido de hierro en rangos de concentraciones de 30 a 70%, 10 a 40% y 5 a 20% de la masa, respectivamente. Así mismo, dependiendo el tipo de ceniza volante, clase C o clase F, la concentración de óxido de calcio se puede presentar en una concentración importante. También, existen otros componentes en menores concentraciones que representan hasta un 5% de la masa de forma conjunta.

En cuanto a sus características físicas, destaca su presentación en forma de polvo muy fino que por lo general son de color gris debido al óxido de hierro presente. En lo que se refiere a la granulometría de la ceniza, se ha encontrado estudios que demuestran que se encuentran partículas por debajo de 250 μm , aunque el 90% se encuentra debajo del 75 μm (Hardjito & Rangan, 2005; Santaella Valencia, 2001). Debido al tamaño de sus partículas, por lo general menor a 100 μm , no se puede ver las partículas

individuales de ceniza volante a simple vista, pero usando microscopios especiales se puede determinar que su forma la cual es fundamentalmente esférica.

2.8 Uso de la puzolana y la ceniza volante en la construcción

La puzolana y la ceniza volante se utiliza en la construcción diversas formas. Hasta la aparición del cemento Portland, la puzolana se consideraba como el material para esencial en la fabricación de cementos y concretos. Por su parte, la ceniza volante se le consideraba simplemente deshecho por lo que fue utilizada como material de relleno. Mas adelante se estudiaron las características de ambos materiales para mejorar elementos y estructuras por lo que obtuvieron otros usos. Por ejemplo, la ceniza volante se empezó a utilizar para estabilizar taludes y la puzolana como agregado ligero en elementos de concreto y como reductor de las emisiones de CO₂ en la producción de cemento (Djobo et al., 2017).

No obstante, el uso que se da a ambos en el concreto actualmente es como aditivo para la mejora de las características de las mezclas. Las características del concreto que se mejoran son su impermeabilidad, resistencia al calor, resistencia a sulfatos, entre otras (Rodríguez Camacho & Uribe Afif, 2002). Además, mejoran la resistencia a compresión, aunque a edades tempranas la resistencia es menor a cuando no se utiliza, a largo plazo la resistencia aumenta hasta obtener resistencias superiores al concreto sin adiciones en algunos casos. Sin embargo, el principal uso que se les da es como sustituto en la producción de cemento para así reducir la cantidad de cemento que se utiliza en las mezclas obteniendo resultados similares o mejores. La Norma ASTM C 618 (2017) da los estándares de las cantidades que se deben emplear en caso de ser usado.

CAPÍTULO 3

3. ANÁLISIS DE LAS CONDICIONES DE PRODUCCIÓN DE MATRICES DE GEOPOLÍMERO A BASE DE CENIZA VOLANTE CLASE F



3.1 Introducción

El estudio de los geopolímeros en el Perú está poco desarrollado, por lo que es importante fomentar el estudio sobre este material como alternativa a los materiales tradicionales. Entre las ventajas que posee este nuevo material resalta el poco impacto ambiental que tiene en comparación al cemento (McLellan et al., 2011) y el uso de desechos como material precursor (Suksiripattanapong et al., 2015). La ceniza volante, deshecho de la quema de carbón mineral, es un excelente material para formar los geopolímeros dado que posee grandes cantidades de aluminosilicatos como lo indican Davidovits (1978) y Bakharev (2005a, 2005b). Debido a que se quema una gran la cantidad de carbón en las plantas térmicas, sumado al aumento del uso de este método de generación de energía, se ha producido una excesiva cantidad de ceniza volante y solo el 16% es procesado o utilizado en otra actividad mientras el resto es desechado, lo que representa un problema para el medio ambiente (Ahmaruzzaman, 2010). Así, la formación de geopolímeros es una forma de emplear este desecho de forma productiva y reducir las cantidades existentes. Este capítulo abarca el proceso de caracterización de geopolímeros a base de ceniza volante. Se describe los materiales que se utilizaron y la caracterización realizada, el proceso de fabricación y las variables estudias en la producción del geopolímero y se muestran análisis de los resultados obtenidos.

3.2 Descripción de los materiales

3.2.1 Ceniza volante clase F

Para esta primera parte de la investigación se decidió utilizar la ceniza volante con bajo contenido de óxido de calcio (clase F) (ASTM International, 2017) para la fabricación de geopolímeros. Por lo cual fue necesario conocer las características físicas y químicas de la ceniza volante utilizada, las cuales son descritas a continuación:

Caracterización física

Sus características físicas fueron descritas mediante la forma y tamaño de las partículas, para lo cual se realizó un análisis de microscopía electrónica de barrido (SEM) para obtener su morfología y un análisis granulométrico para determinar la distribución de tamaños de las partículas.

El análisis SEM consistió en hacer un barrido con un haz de electrones sobre la superficie de una muestra, a medida que los electrones interactúan con la muestra se producen electrones secundarios que son emitidos y captados, donde la intensidad de las mismas depende de la topografía y se puede formar una imagen con las intensidades. Se empleó un “Thermo Fisher Scientific Quanta 250” para la realización del análisis SEM. En la figura 3.1a. se presenta la microscopía hecha a la ceniza volante en la cual se puede observar que las partículas tienen por lo general una forma esférica, característica común en la ceniza volante (Duxson & Provis, 2008).

Por su parte el análisis granulométrico se realizó mediante el método de sedimentación, se utilizó un analizador de tamaños de partículas SediGraph 5100, el cual midió directamente la masa de las partículas mediante la absorción de rayos X y midió la velocidad con que cae debido a la gravedad en un líquido con propiedades conocidas como las descritas por la Ley de Stokes (densidad y viscosidad). Con esto datos, el SediGraph 5100 determina el diámetro de las partículas basándose en parámetros como la densidad y viscosidad. La figura 3.1b se presenta la gráfica granulométrica de la ceniza volante donde se observa que el 100% es menor a 250 μm de diámetro, con D_{90} igual a 74 μm y D_{50} igual a 31 μm .

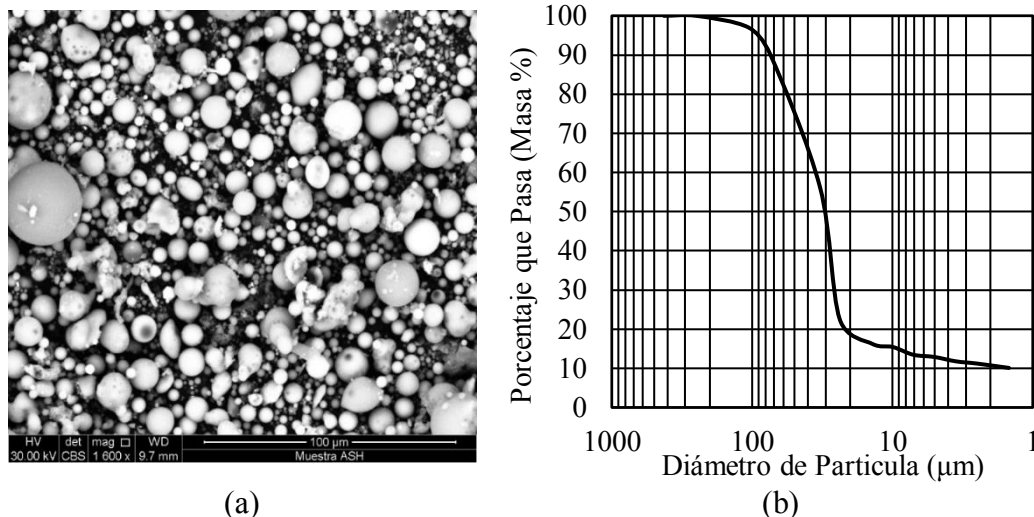


Figura 3.1. Características físicas de la ceniza volante clase F: (a) SEM y (b) granulometría.

Caracterización Química

La composición química de la ceniza volante se determinó por un análisis por fluorescencia de rayos X (XRF). Este análisis consiste en irradiar una muestra con rayos X excitando sus átomos, para que estas emitan a su vez una segunda radiación, conocida como fluorescencia de rayos X. Esta segunda radiación es captada con un detector para su análisis. Para este análisis se utilizó un espectrómetro ARL OPTIM'X.

En la Tabla 3.1. se presenta los resultados del análisis XRF que muestra el contenido de los óxidos presentes en la ceniza volante de la investigación. Se determinó una cantidad de CaO de 1.65% menor al 5% lo que justifica que se trata de una ceniza volante clase F. Los resultados del análisis muestran un alto contenido de sílice y alúmina de 54.71% y 27.45%, respectivamente, esto indica que la ceniza volante puede ser usada para producir geopolímeros. Se observa que también posee un alto porcentaje de hierro, 9.98%, lo que otorga un color gris oscuro a la muestra. El término LOI (Loss on Ignition) se refiere a una cantidad de carbono dentro de la muestra producidos durante la formación de la ceniza volante y está presente en un 2.79% que representa una cantidad considerablemente baja.

Tabla 3.1. Composición de óxidos de la ceniza volante.

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	CaO	MgO	Na ₂ O	LOI
54.71	27.45	9.98	2.26	1.65	0.92	0.29	2.79

3.2.2 Solución alcalina

Como se mencionó antes, la solución alcalina es el agente activador del proceso de geopolimerización. Se decidió optar por una solución a base de sodio, la razón se debe a los menores costo del hidróxido de sodio respecto al potasio. A continuación, se describe los componentes empleados en la fabricación de la solución alcalina:

i. Hidróxido de Sodio

También conocida como soda cáustica o sosa cáustica. Se presenta como un sólido blanco cristalino de forma aperlada como se aprecia en la figura 3.2a. Para la presente investigación se empleó un hidróxido de sodio de 99.27% de pureza.

ii. Silicato de Sodio

También conocido como vidrio soluble. Se presenta como un líquido viscoso incoloro como se aprecia en la figura 3.2b. Para la presente investigación se empleó un silicato de sodio con composición química: 28.10% de SiO_2 , 8.45% de Na_2O y 63.45% de H_2O .



(a)



(b)

Figura 3.2. Materiales de la Solución Alcalina: (a)Perlas de hidróxido de sodio y (b) silicato de sodio.

iii. Agua Desionizada

El agua es empleada como medio de disolución de la solución alcalina y para obtener una mezcla de reacción más trabajable. Se empleó agua desionizada para no alterar los componentes en la solución.

3.3 Caracterización de la matriz de geopolímero a base de ceniza volante

El análisis de la matriz de geopolímero de ceniza volante se realizó mediante la caracterización física y mecánica a las distintas muestras. Las muestras empleadas en la caracterización fueron muestras cúbicas por lo que se empleó la norma ASTM C 109 (2016a) para definir las dimensiones (50mm). Sin embargo, la literatura muestra que este tipo de matriz de geopolímero obtiene resistencias a compresión altas, es así que se decidió reducir las dimensiones que establece la norma a fin de no sobre exigir a la máquina de compresión. Por lo que se fabricaron cubos de 40mm (figura 3.3 a y b) de aristas utilizando moldes de silicona (figura 3.3 c). Además, para la cantidad de muestras a ensayar se decidió utilizar 3 muestras por cada mezcla para obtener un promedio y desviación estándar.

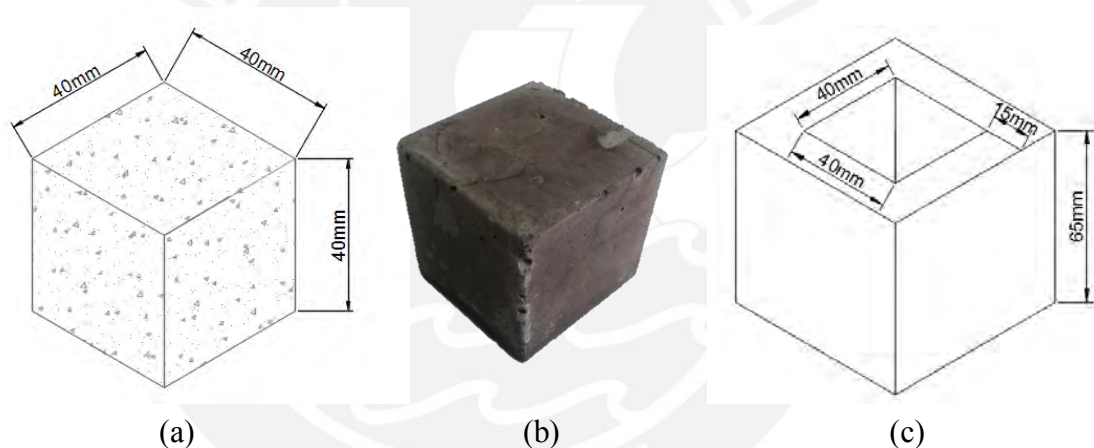


Figura 3.3. Muestras de Geopolímero a base de ceniza volante: (a) Dimensiones del cubo de Geopolímero; (b) cubo fabricado de geopolímero y (c) esquema de molde de silicona.

La caracterización física de las muestras se realizó mediante el cálculo de la densidad aparente. El cálculo se realizó siguiendo las recomendaciones de la ASTM D 7263 (2018b). Por lo que para determinar el volumen de los especímenes se midió las dimensiones de cada una de las muestras utilizando un vernier (figura 3.4a), la medición se realizó posicionando el vernier en tres puntos en línea en el centro de la cara a medida. Para la medición del peso se posicionó las muestras sobre una balanza electrónica (figura 3.4b).



Figura 3.4. Equipos para la medición de la densidad: (a) Vernier (Pie de rey) y (b) balanza Ohaus.

Por su parte, la caracterización mecánica se realizó mediante dos fases: Ensayo de pulso de ultrasonido y ensayo de compresión uniaxial. El ensayo de pulso de ultrasonido consiste en determinar la velocidad de un pulso ultrasónico (UPV) a partir de la generación pulsos de ondas de tensión longitudinales emitido por un transductor eléctrico acústico que se mantiene en contacto con la superficie del elemento (ASTM International, 2016b). En otras palabras, el ensayo consiste en emitir ondas mediante un transductor y captarla con otro, siendo la distancia entre los transductores sobre el tiempo la velocidad de la onda en el elemento, como se aprecia en la figura 3.6a. Se decidió utilizar este método no destructivo para caracterizar las muestras sin alterar las mismas. Investigaciones recientes demuestran que la aplicación de una onda ultrasónica en un material proporciona información sobre las características del mismo (Lionetto & Maffezzoli, 2009). Los ensayos de pulso de ultrasonido se realizaron utilizando un equipo PROCEQ (Figura 3.6b) con longitud de onda 25.4 Hz y el programa del mismo: Punditlink+, el programa proporciona el tiempo que demora la onda en cruzar el material hasta llegar al receptor.

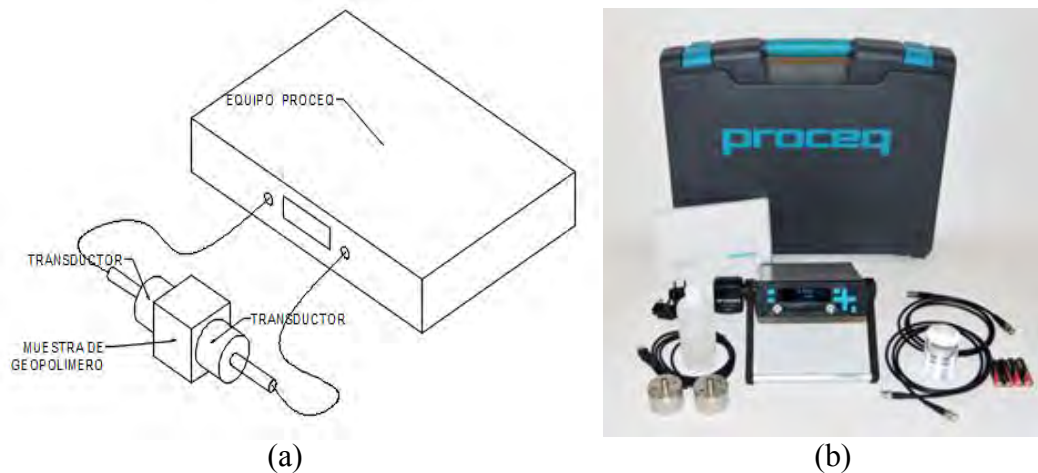


Figura 3.5. Ensayo de Pulso Ultrasónico: (a) Esquema del ensayo y (b) PROCEQ Punditlink+.

En la segunda fase se realizó el ensayo de compresión uniaxial a las muestras. Este ensayo consiste en la determinación de la capacidad de resistencia a la compresión del material según lo que establece la norma ASTM C 109 (2016a). Los ensayos se realizan aplicando una fuerza que gradualmente aumenta sobre una superficie o punto determinado como se aprecia en la figura 3.6a. Para los ensayos de compresión se empleó una máquina universal de marca MTS (MTS, 2015) controlada por desplazamiento, la cual puede ejercer una fuerza de 100 KN (figura 3.6b). Durante el ensayo la celda de carga se ajustó a una velocidad de 0.5 mm/min.

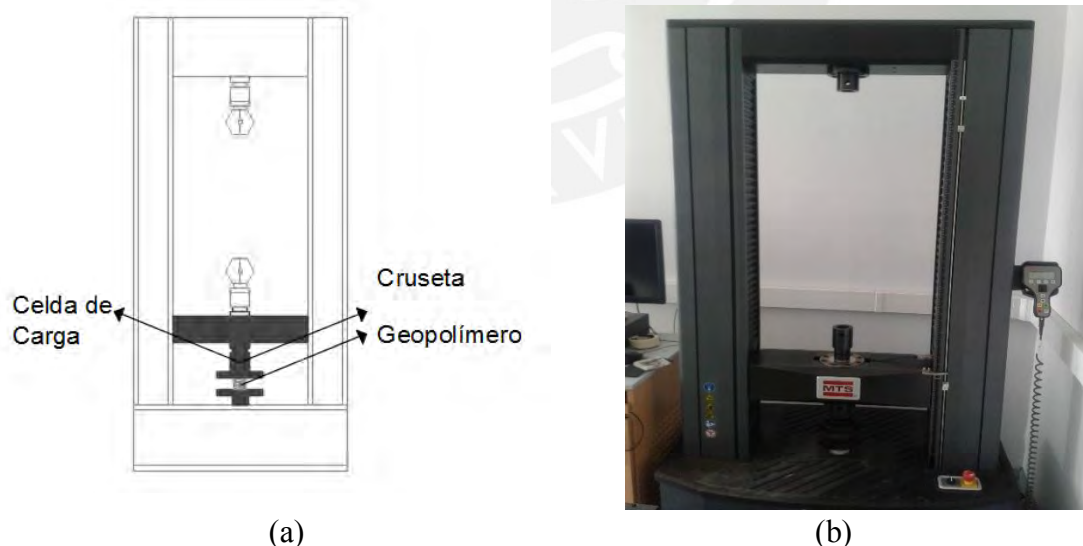


Figura 3.6. Ensayo de compresión: (a) Esquema de ensayo y (b) maquina universal (MTS, 2015).

3.4 Preparación de muestras

3.4.1 Fabricación de geopolímero

La fabricación del geopolímero inició preparando la solución alcalina. Se mezcló en un recipiente el hidróxido de sodio, silicato de sodio y el agua desionizada en proporciones de acuerdo a lo estudiado (ver tabla 3.2). Luego, la solución alcalina fue vaciada en la ceniza volante y mezclados de forma manual. Después, la mezcla fue vertida en los moldes de silicona y se realizó un vibrado mecánico para posteriormente ser puestos en el horno a distintas temperaturas según lo que se estudiaba. Las muestras fueron desmoldadas 24 horas después del inicio del curado y, si necesitaba más tiempo de curado, puestos nuevamente en el horno. Finalmente, las muestras fueron retiradas del horno y dejadas reposar a temperatura ambiente hasta ser ensayadas, todas las muestras fueron ensayadas a 7 días de edad.

3.4.2 Variables del análisis

Para el análisis de la fabricación del geopolímero se estudiaron cinco variables, tres variables con respecto con la solución alcalina y dos de las condiciones de curado. La primera variable fue el módulo de sílice (Ms) el cual consiste en la relación molar del óxido de silicio entre el óxido de sodio. La segunda variable consistió en determinar la concentración de óxido de sodio (%Na₂O) en la solución. La tercera variable fue el efecto del contenido de agua mediante la relación agua/precursor (water/binder o w/b). Se tomó estas variables como claves para determinar el contenido de cada material utilizado en la solución alcalina: Silicato de sodio, hidróxido de sodio y agua desionizada, respectivamente. La cuarta variable fue la temperatura de curado. Finalmente, la quinta variable fue el tiempo de curado en horno. A continuación, la tabla 3.2 muestra todas las dosificaciones de la solución alcalina y condiciones de curado de las mezclas.

Tabla 3.2. Plan experimental para caracterización del geopolímero.

Etapa	Nº	MS (mol / mol)	Na ₂ O (Peso%)	Agua / aglutinante (Peso /Peso)	Temperatura de Curado (°C)	Tiempo de Curado en Horno (Horas)	Tiempo de Curado Total (Días)
Etapa de análisis del efecto de Ms	1	0.25					
	2	0.50					
	3	0.75					
	4	1.00	8	0.30	80	24	7
	5	1.25					
	6	1.50					
Etapa de análisis del efecto de Na ₂ O	7		2				
	8		4				
	9		6				
	10	1.00	8	0.30	80	24	7
	11		10				
	12		12				
Etapa de análisis del efecto de agua/ aglutinante	13			0.25			
	14			0.26			
	15			0.27			
	16			0.28			
	17	1.00	8	0.29	80	24	7
	18			0.30			
	19			0.35			
	20			0.40			
Etapa de análisis del efecto de la temperatura de curado	21				55		
	22				60		
	23				65		
	24	1.00	8	0.26	70	24	7
	25				75		
	26				80		
	27				24(*)		
Etapa de análisis del efecto del tiempo de curado	28					4	
	29					8	
	30					12	
	31					24 (1Dia)	
	32	1.00	8	0.26	80	48 (2Dias)	7
	33					72 (3Dias)	
	34					120 (5Dias)	
	35					168 (7Dias)	

(*) Temperatura Ambiente

3.5 Resultados y discusión

3.5.1 Efecto de la relación molar SiO_2 y Na_2O (M_s) de la solución alcalina

La primera etapa que se estudió fue el análisis del efecto del M_s en la solución alcalina, donde se estudió valores de M_s igual a 0.25, 0.50, 0.75, 1.00, 1.25 y 1.50, mientras los demás valores fueron: $\%\text{Na}_2\text{O}=8$, $w/b=0.30$ y curado a 80°C por 24 horas.

En la figura 3.7a se puede apreciar que la mayor resistencia de la matriz se alcanzó cuando el valor de M_s fue igual a 1.00 con un $f'_c=23.55$ MPa. Se aprecia que, para concentraciones muy pequeñas, la resistencia es muy baja, esto se debe a que en estas mezclas la concentración de silicio que se agrega es muy poca y no es suficiente para activar el proceso de geopolimerización a una velocidad adecuada y obtener una resistencia más alta. Finalmente, en casos de relaciones molares altas también disminuyó la resistencia, esto se debe a que en la mezcla no reaccionan todas las especies de silicio para formar las redes poliméricas y quedan atrapadas entre las redes de silicatos ya formados debilitándolos. Comparando el valor M_s obtenido se asemeja a lo obtenido en otras investigaciones. Por ejemplo Palomo et al. (1999) en su investigación utiliza un valor M_s igual a 1.23 o Criado et al. (2007) en su estudio obtiene los mejores resultados con un M_s igual a 1.17.

La figura 3.7b muestra los valores de densidad que se obtuvieron con los diferentes valores de M_s . Se aprecia un aumento de la densidad del geopolímero conforme aumenta el M_s , esto se debe a que se adicionó mayor contenido de silicato de sodio a las muestras de geopolímero según aumentó el valor de M_s , lo que aumentó el peso de las mismas.

Finalmente, en la figura 3.7c se observa una relación ascendente entre la velocidad del pulso y la resistencia, es decir, a mayor velocidad de pulso mayor es la resistencia, esto se debe a que el pulso ultrasónico se desplaza más rápido en elementos con menor cantidad de imperfecciones dentro de su estructura. En este caso se puede deducir que las muestras al alcanzar su valor óptimo de M_s se homogeniza la estructura del geopolímero y conforme el valor se aleja del M_s se presentan imperfecciones como

son sectores donde no termina el proceso de geopolimerización o presencia de especies de silicio u otros compuestos atrapados dentro de las muestras. La línea tendencia que se forma tiene una fórmula igual a: $f'c=0.0065 e^{0.0032V}$ con R^2 igual a 0.8953 lo que indica que los valores son semejantes a lo esperado.

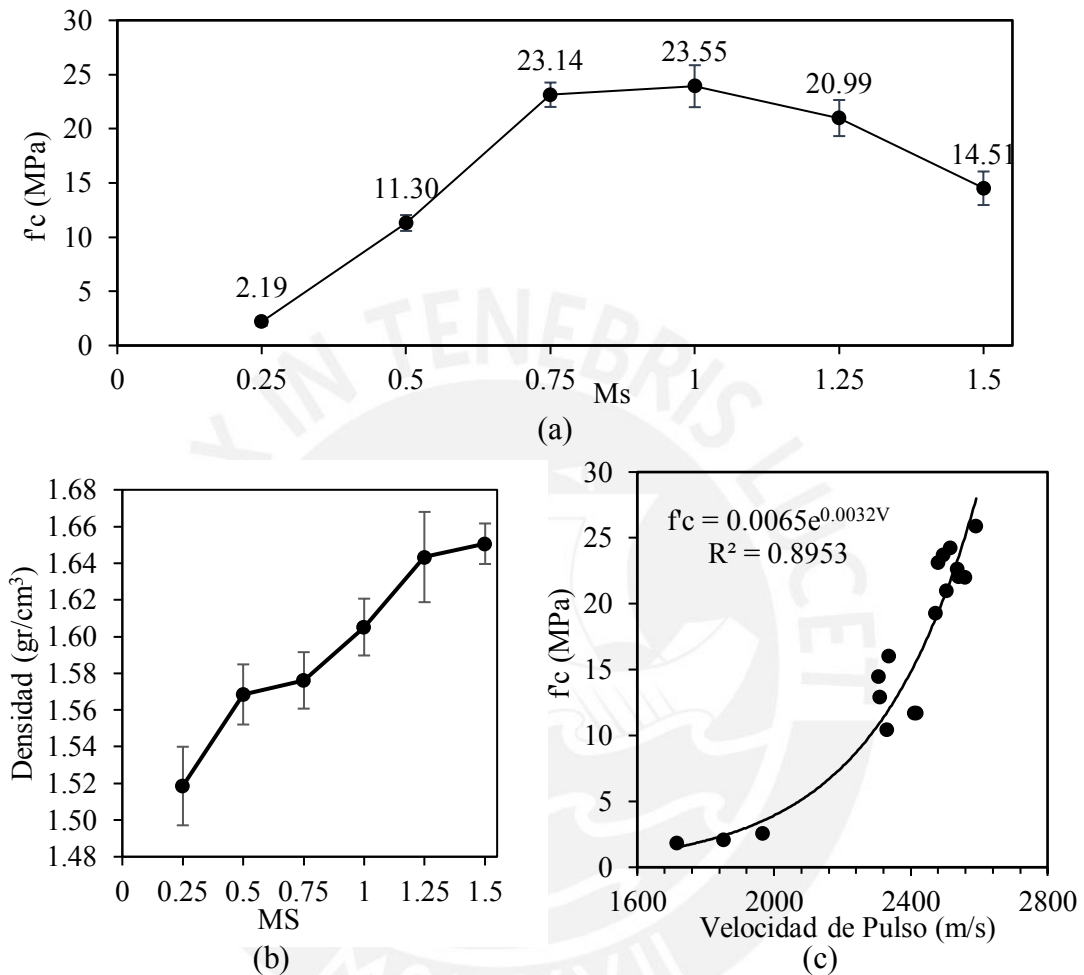


Figura 3.7. Efecto de relación molar SiO_2 y Na_2O (M_s): (a) Esfuerzo a compresión; (b) densidad y (c) correlación UPV y el esfuerzo a compresión.

3.5.2 Efecto de contenido de Na_2O de la solución alcalina

La segunda etapa que se estudió fue el análisis del efecto del contenido de Na_2O en la solución alcalina, donde se estudió valores de $\%Na_2O$ igual a 2, 4, 6, 8, 10 y 12%, mientras los demás valores fueron: $M_s=1.00$, $w/b=0.30$ y curado a $80^\circ C$ por 24 horas.

En la figura 3.8a se puede apreciar que la mayor resistencia de la matriz se alcanzó cuando el valor $\%Na_2O$ es igual a 8% con un $f'c=23.93$ Mpa. Se aprecia que

concentraciones menores al óptimo la resistencia cae drásticamente, esto se debe a que el contenido de Na_2O está directamente relacionado a la cantidad de NaOH que se incorpora a la solución y el ion de hidróxido (OH^-) es el que disuelve el aluminosilicato, por lo que a una mayor concentración de Na_2O existe una mejor disolución de los compuestos para formar el geopolímero. Sin embargo, cuando excede al valor óptimo se aprecia que la resistencia empieza a disminuir, esto se debe a que se produce un bloqueo en la formación del geopolímero, ya que existe presencia del disolvente que no permite que se formen las cadenas de silatos pues continúa disolviéndolo en sus componentes. Comparando el valor de $\% \text{Na}_2\text{O}$ obtenido con otros estudios el resultado es similar, Fernandez-Jiménez et al. (2007) obtiene en su investigación un valor óptimo de $\% \text{Na}_2\text{O}=7.5\%$, o Bakharev (2005a, 2005b) utiliza un valor de $\% \text{Na}_2\text{O}=8\%$.

En la figura 3.8b muestra los valores de densidad que se obtuvieron con los diferentes valores de $\% \text{Na}_2\text{O}$. Se aprecia un aumento de la densidad del geopolímero conforme aumente la concentración de $\% \text{Na}_2\text{O}$, esto se debe a que se formaron mayor cantidad de moléculas de Na_2O para cumplir con la concentración prevista lo que aumenta el peso de la mezcla resultante.

Finalmente, en la figura 3.8c se observa una relación ascendente entre la velocidad del pulso y la resistencia, es decir, a mayor velocidad de pulso mayor es la resistencia. En este caso cuando alcanza el valor óptimo de $\% \text{Na}_2\text{O}$ hay una homogeneidad en la mezcla del geopolímero, para valores menores al óptimo aún hay presencia del precursor sin reaccionar y para mayores el disolvente aún está presente en la mezcla. La línea tendencia que se forma tiene una fórmula igual a: $f^c=0.1057 e^{0.0018V}$ con R^2 igual a 0.7487, lo que supondría una ligera diferencia a los valores esperados.

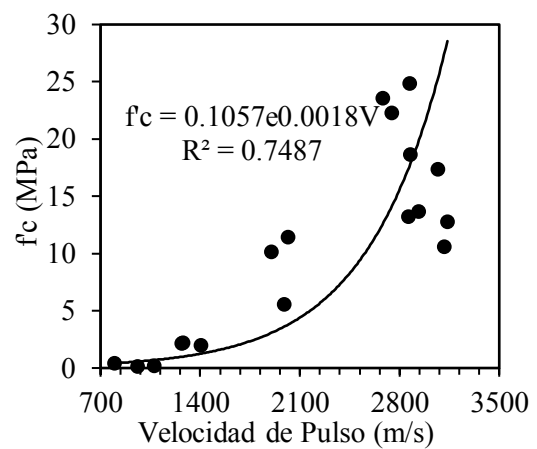
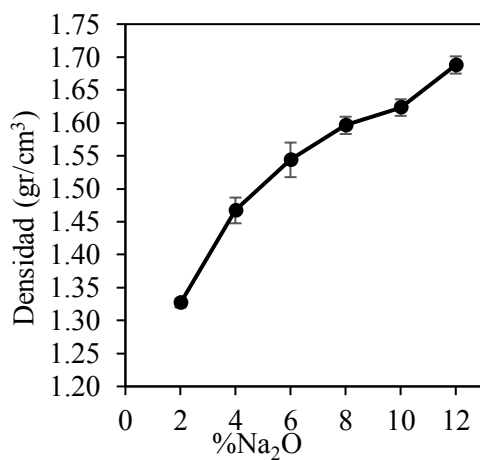
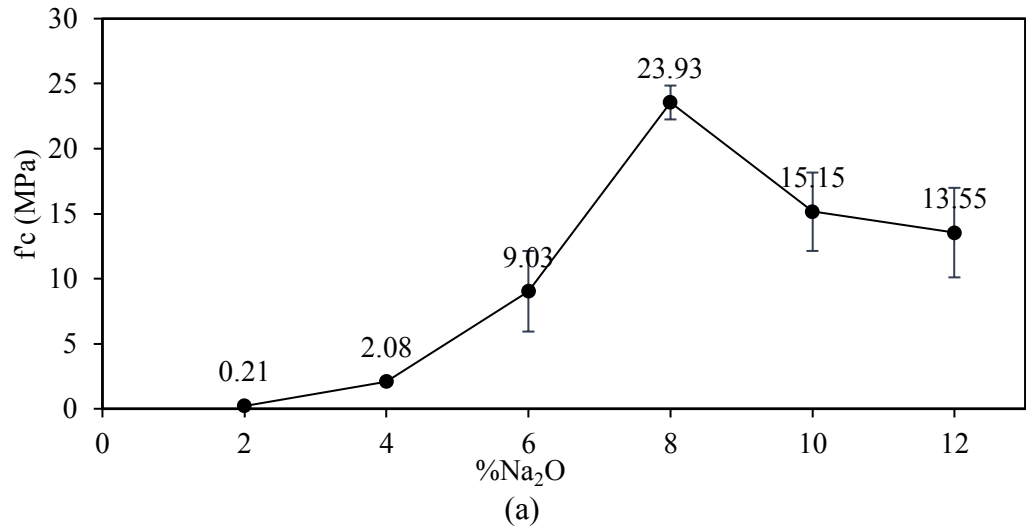


Figura 3.8. Efecto de cantidad de Na₂O: (a) Esfuerzo a compresión; (b) densidad y (c) correlación UPV y el esfuerzo a compresión.

3.5.3 Efecto del contenido de agua de la solución alcalina

La tercera etapa que se estudió fue el análisis del efecto de la relación agua/aglutinante (w/b) en la solución alcalina, donde se estudió valores de w/b igual a 0.25, 0.26, 0.27, 0.28, 0.29, 0.30, 0.35 y 0.40, mientras los demás valores fueron: Ms=1.00, %Na₂O=8%, y curado a 80°C por 24 horas.

En la figura 3.9a se puede apreciar que la mayor resistencia de la matriz se alcanza cuando el valor de w/b es igual a 0.26 con un f'c=24.56 MPa. Se aprecia que entre mayor es el contenido de agua menor es la resistencia, la razón es que las moléculas de agua al no pertenecer a la reacción y solo ser un medio al final quedan atrapadas

dentro de la matriz que luego en el curado se evaporan dejando espacios vacíos que debilitan la muestra final. Otro factor que es importante es el papel que tiene el agua como medio para que se produzca la reacción, es que entre menos contenido de agua exista en la solución es más difícil que las moléculas se encuentren para reaccionar y se mezclen los reactivos. Comparando el contenido de agua obtenido, se observa una ligera diferencia con otras investigaciones, por ejemplo Bakharev (2005a, 2005b) utiliza un valor de $w/b=0.30$ o Thokchom (2009) utiliza un $w/b=0.33$.

En la figura 3.9b muestra los valores de densidad que se obtuvieron con los diferentes valores de w/b . Se aprecia muy poca variación de la densidad del geopolímero conforme aumente la concentración de Agua, este resultado se debe a que se realiza un curado en horno lo que elimina el contenido de agua dentro de las muestras independiente el contenido inicial.

Finalmente, en la figura 3.9c se observa una relación ascendente entre la velocidad del pulso y la resistencia, es decir, a mayor velocidad de pulso mayor es la resistencia. La línea tendencia que se forma tiene una fórmula igual a: $f^c=4.5269 e^{0.0005V}$ con $R^2=0.1416$. No obstante, la gráfica resultante posee mucha dispersión entre sus valores, esto se puede deber a que otro factor que afecta la velocidad de propagación de las ondas es la densidad de las muestras. Las densidades al ser muy semejantes ocasionan que la propagación de las ondas sea muy parecida entre las distintas resistencias.

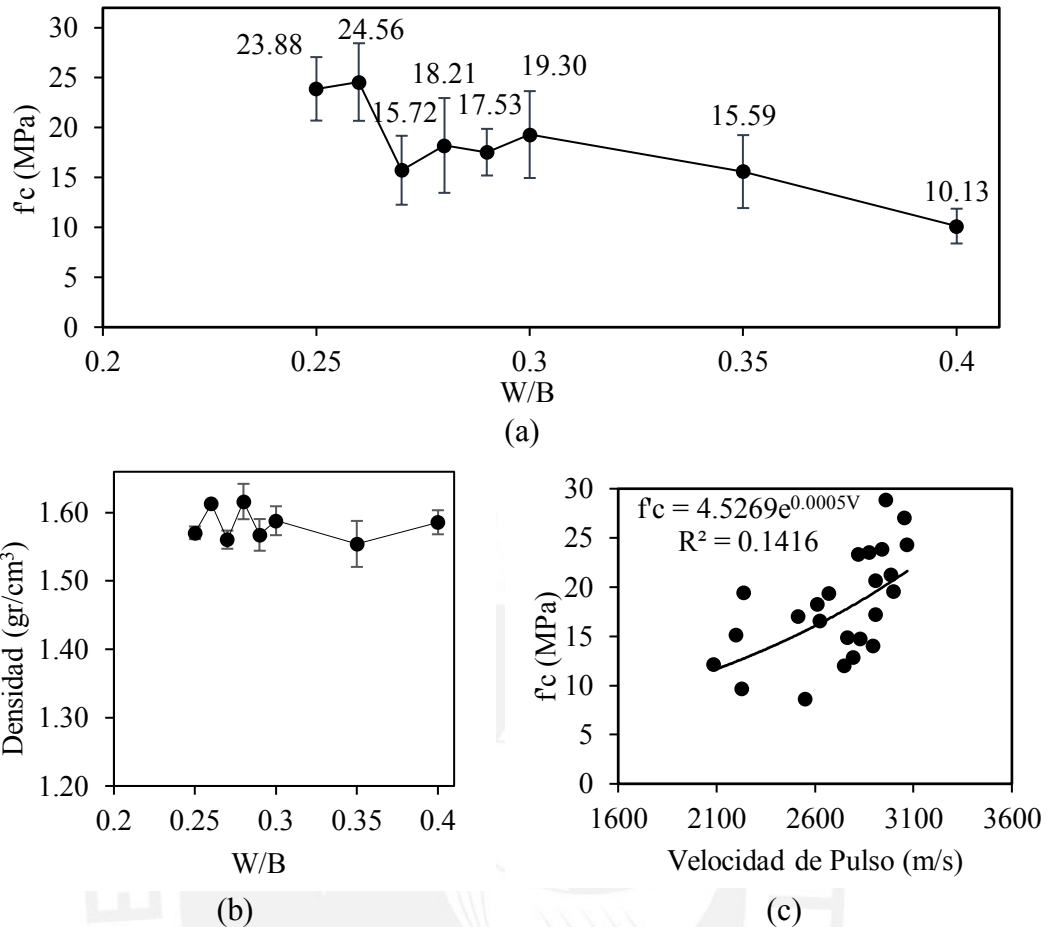


Figura 3.9. Efecto de concentración de agua (a) Esfuerzo a compresión; (b) densidad y (c) correlación UPV y el Esfuerzo a compresión.

3.5.4 Efecto de la temperatura de curado de las muestras

La cuarta etapa que se estudió fue el análisis del efecto de la temperatura en la etapa de curado, donde se empleó temperaturas de 55, 60, 65, 70, 75, 80°C y temperatura ambiente (24°C), mientras los demás valores fueron: $M_s=1.00$ % $Na_2O=8$, $w/b=0.26$ y curado a por 24 horas.

En la figura 3.10a se puede observar que la mayor resistencia se alcanza para una temperatura de curado de 80°C con un $f'_c=24.75$ MPa. Se puede interpretar que a temperaturas bajas de curado las muestras no alcanzan una resistencia considerable. Como se observa la muestra dejada a temperatura ambiente, luego de 7 días, alcanza una resistencia casi nula, este resultado probaría que los geopolímeros necesitan un

curado a temperaturas mayores a la temperatura ambiente, es decir, un curado en horno para obtener una resistencia considerable. La casi nula resistencia se debe a que existe aún presencia de agua en la mezcla, la gran diferencia entre las densidades de la muestra curada a temperatura ambiente y las curadas en horno confirma la presencia de agua, y esta provoca que los sialatos y otros componentes continúen dispersos y no permite que se junten o formen una red de geopolímero. En el gráfico se puede observar que hay una disminución en la resistencia en un punto, pero luego tiende a subir, esto se puede atribuir a que las muestras pudieron tener algún fallo antes de realizar el ensayo. También, del gráfico se puede entender que entre mayor sea la temperatura de curado mayor será la resistencia, esto se atribuye a que el aumento de temperatura acelera el proceso de geopolimerización, lo cual causa que se formen más rápido las redes de sialatos y obtenga mejores propiedades mecánicas. Se debe mencionar que se pudo estudiar a mayores temperaturas, pero por condiciones de esta investigación solo se realizó hasta 80°C, pero no se descarta que pueda aumentar la resistencia con una mayor temperatura. No obstante, es necesario señalar que una mayor temperatura causaría una rápida evaporación del agua de las mezclas, siendo esta el medio para la reacción, lo que no permitiría la reacción completa de todos los componentes y afectaría negativamente sus propiedades mecánicas. La temperatura obtenida en esta investigación no difiere demasiado si se compara con otros estudios, Nagalia (2016) por ejemplo obtiene el mejor resultado a una temperatura de 70°C de curado y Thokchom (2009) utiliza una temperatura de 85°C en sus muestras.

En la figura 3.10b muestra los valores de densidad que se obtuvieron con las diferentes temperaturas de curado. Se aprecia un descenso considerable de la densidad del geopolímero conforme aumente la temperatura de curado, esto se debe a que una mayor temperatura elimina mayor cantidad de agua atrapada en el interior de la muestra lo que resulta en una menor densidad.

Finalmente, en la figura 3.10c se observa una relación ascendente entre la velocidad del pulso y la resistencia, es decir, a mayor velocidad de pulso mayor es la resistencia. Para el caso de la temperatura ambiente, la velocidad del pulso calculada es muy baja y esto se debe a que la muestra es muy poco homogénea debido a la gran presencia de agua y componentes que aún continúan sin formar redes. La línea tendencia que se

forma tiene una fórmula igual a: $f_c = 0.0627 e^{0.002V}$ con $R^2 = 0.8664$ lo que indica que los valores son semejantes a lo esperado.

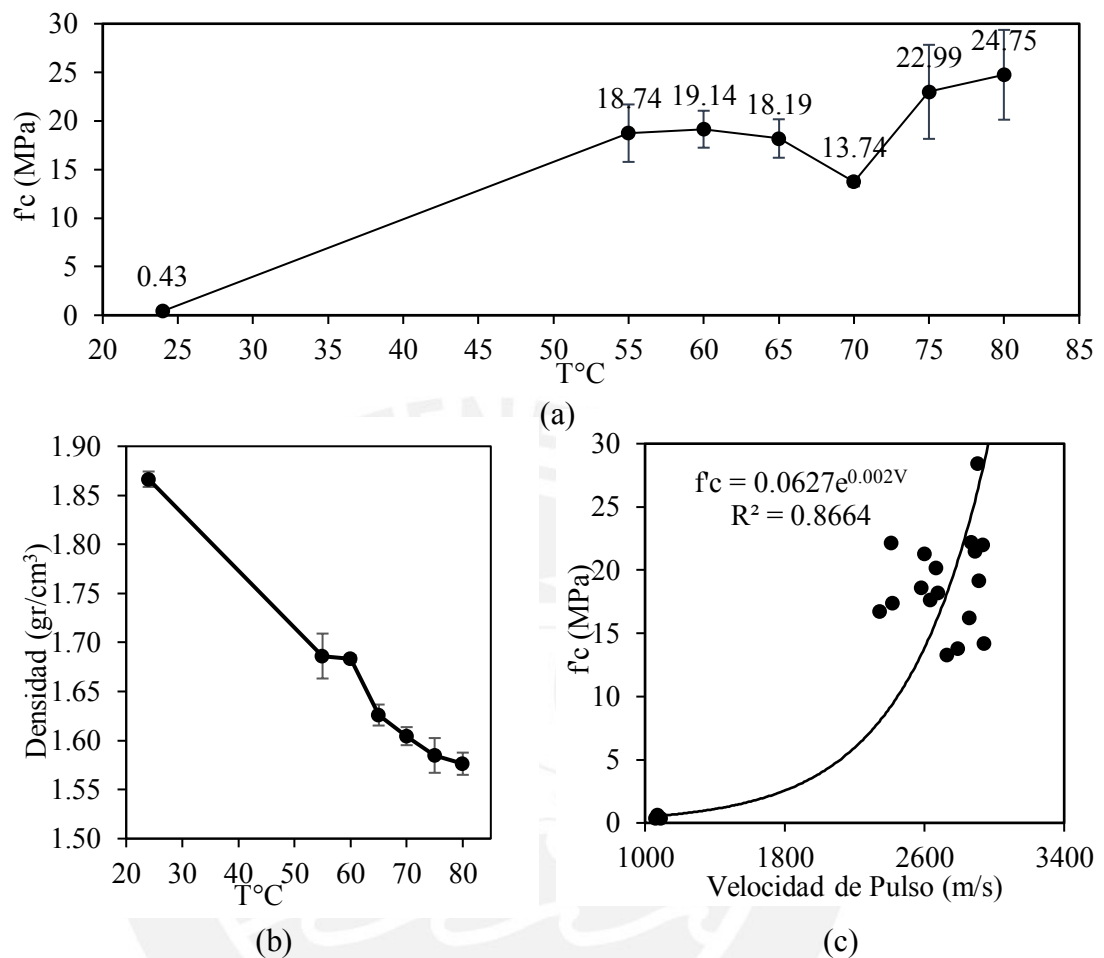


Figura 3.10. Efecto de temperatura de curado (a) Esfuerzo a compresión, (b) correlación UPV y el esfuerzo a compresión y (c) densidad.

3.5.5 Efecto del tiempo de curado de las muestras

La quinta y última etapa que se estudió fue el análisis del efecto del tiempo en la etapa de curado, donde se empleó tiempos de 4, 8, 12, 24, 48, 73, 120 y 168 horas, mientras los demás valores fueron: $M_s = 1.00$ % $Na_2O = 8$, $w/b = 0.26$ y curado a $80^{\circ}C$.

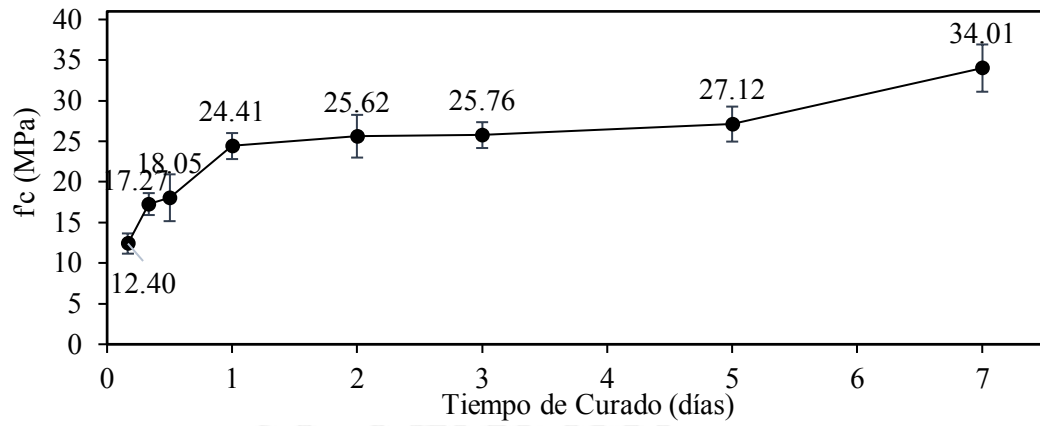
En la figura 3.11a se puede observar que la mayor resistencia se alcanza para un tiempo de curado de 148 horas (7 días) con un $f_c = 34.01$ MPa. Se observa que mientras mayor sea el tiempo en que permanece la muestra en el horno, mayor resistencia a compresión obtiene, esto se debe a que durante la etapa de curado la mezcla de geopolímero

absorbe la energía calorífica por acción del curado en horno lo que se interpretaría como que el proceso de geopolimerización es mayor y por ende más productiva. Así mismo, en el gráfico se puede observar que la mayor ganancia de la resistencia a compresión se obtiene durante las primeras horas de curado, ya que los componentes de las muestras se encuentran más dispersas y es más fácil formar redes de sialatos. Por otra parte, las muestras con 1, 2 y 3 días de curado obtienen resistencias parecidas, por lo que no hay un cambio significativo durante este tiempo, debido a que ya existen redes de sialatos lo que dificulta que se formen nuevas redes. En cambio, cuando aumentan los días la resistencia tiende a aumentar más notoriamente, pues se están terminando de formar todas las redes posibles lo que otorga una mayor ganancia. No obstante, se debe señalar que también un largo tiempo de curado puede ocasionar que las muestras sufran una acción de abrasión por el calor irradiado lo que las dañaría y debilitaría sus propiedades mecánicas. El tiempo de curado obtenido en esta investigación tiene diferencias con lo empleado en algunas investigaciones, por ejemplo Thokchom (2009) sus muestras son curadas por 48 horas (2 días), Bakharev (2005a, 2005b) en su investigación emplea tiempos de curado dentro del rango de [2-24 horas] o Nagalia (2016) obtiene sus mejores resultados con curados de 48 horas (2 días).

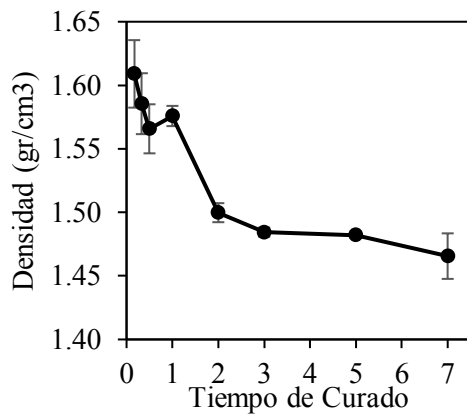
En la figura 3.11b muestra los valores de densidad que se obtuvieron con los diferentes tiempos de curado. Se aprecia un descenso de la densidad del geopolímero conforme aumenta el tiempo de curado, esto se debe a que, al igual que la temperatura de curado, un mayor tiempo de curado elimina una mayor cantidad de agua atrapada dentro de la muestra.

Finalmente, en la figura 3.11c se observa una relación ascendente entre la velocidad del pulso y la resistencia, es decir, a mayor velocidad de pulso mayor es la resistencia. Las muestras con tiempos de curado cortos, es decir, menos de un día, pues el proceso de geopolimerización no está completo y aún hay presencia de agua atrapada dentro de la muestra. Así mismo, conforme aumenta el tiempo el proceso de geopolimerización continúa y se elimina mayor cantidad de agua de la muestra lo que genera que sea más homogénea. La línea tendencia que se forma tiene una fórmula

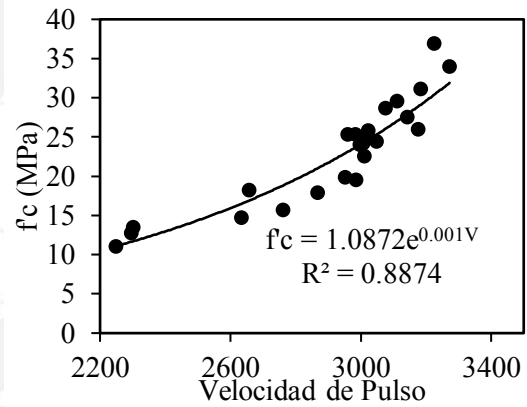
igual a: $f_c = 1.0872 e^{0.001V}$ con $R^2 = 0.8874$ lo que indica que los valores son semejantes a lo esperado.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.11. Efecto del tiempo de curado: (a) Esfuerzo a compresión, (b) densidad y (c) correlación UPV y el esfuerzo a compresión.

CAPÍTULO 4

4. DESARROLLO DE UN BLOQUE DE GEOPOLÍMERO LIGERO A BASE DE PUZOLANA REFORZADO CON FIBRA NATURAL DE YUTE



4.1 Introducción

La producción de geopolímeros se basa en la reacción entre un material precursor con una solución alcalina y se han realizado investigaciones con distintos tipos de materiales precursores (Moon et al., 2014). La ceniza volante es el precursor más utilizado en la producción de geopolímeros como por ejemplo fue utilizado por Atiş et al. (2015), Hardjito & Rangan (2005), Krishnan (2014), Oyun-Erdene & Temuujin (2019) o Ryu et al. (2013). Sin embargo, en el caso del Perú, la obtención de este tipo de material es muy escaso, es más factible utilizar otros tipos de precursores para la formación de geopolímeros.

Algunos estudios evaluaron a la puzolana natural como material precursor en la producción de geopolímeros (Allahverdi et al., 2008; Lemougna et al., 2011; Silva et al., 2019). La puzolana natural es un mineral no-metálico que en su composición química posee gran cantidad de aluminosilicatos y es extraído en los depósitos de ceniza volcánica en el Perú. En la actualidad la puzolana es utilizada como agregado ligero en el concreto o como aditivo para la mejora de las propiedades del cemento (Djobo et al., 2017). Además, al ser un material de origen natural no hay un proceso industrial anterior de donde se ha generado, aunque si existe un proceso de molienda donde se regula el tamaño de las partículas del precursor. Es así que se realizó una investigación basado en el geopolímero estudiado por Silva et al. (2019) y Castañeda (2019). Esta parte de la investigación se basó en la fabricación y caracterización de un bloque de geopolímero ligero a base de puzolana natural reforzado con fibra natural de yute y un estudio del comportamiento del geopolímero utilizado frente a condiciones que degradarían otros tipos de materiales como son el contacto al fuego, exposición a altas temperaturas y erosión por agua. Este capítulo se compone de una introducción, un resumen de la descripción de los materiales empleados en la fabricación, la caracterización física y mecánica del bloque de geopolímero ligero y un análisis del geopolímero bajo condiciones agresivas.

4.2 Descripción de materiales

4.2.1 Puzolana natural

Para esta investigación se empleó la puzolana natural (ASTM International, 2017). La puzolana fue provista por la compañía minera COMACSA, extraída de una mina de Arequipa y pasado por un proceso de molienda. A continuación, se presentan las características físicas y químicas de la puzolana natural:

Caracterización física

En la figura 4.1a. se presenta la microscopía hecha a la puzolana natural en la cual se puede observar que las partículas tienen forma cristalina e irregular en contraste de la ceniza volante, esto se debe a la molienda hecha previamente. Mientras en la figura 4.1b se presenta la gráfica granulométrica de la puzolana natural donde se observa que el 100% es menor a $75 \mu\text{m}$ de diámetro, el D_{90} es igual a $23 \mu\text{m}$ y con D_{50} igual a $11 \mu\text{m}$.

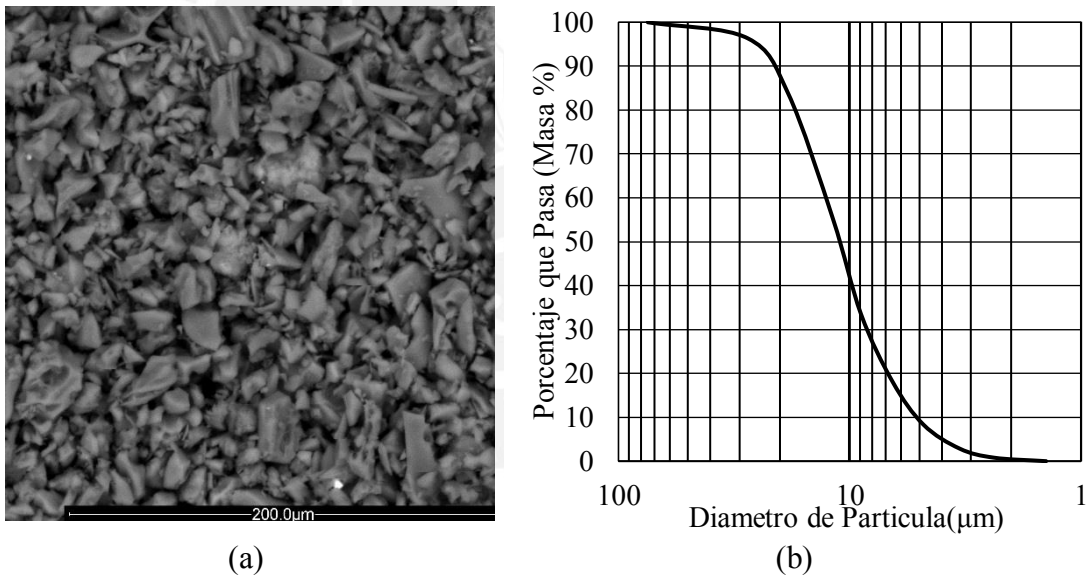


Figura 4.1. Características físicas de la puzolana natural: (a) SEM y (b) granulometría.

Caracterización química

En la Tabla 3.1. se presenta los resultados del análisis por XRF que muestra el porcentaje de los óxidos presentes en la puzolana natural. La concentración de sílice y alúmina son de 71.48% y 13.79%, respectivamente, lo que indica que con la puzolana es posible la formación de geopolímeros y otorgaría una gran resistencia debido a la mayor presencia de óxido de silicio. En la tabla se aprecia que tiene un bajo porcentaje de hierro, 1.29%. La cantidad de LOI en la puzolana es 4.14% lo que indica una mayor cantidad material perdido en comparación a la ceniza volante, pero sigue siendo una baja concentración.

Tabla 4.1. Composición de óxidos de la puzolana natural.

SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	LOI
71.48	13.79	4.56	3.05	1.30	1.29	0.49	4.14

4.2.2 Solución alcalina

La solución alcalina utilizada para la preparación del geopolímero fue la misma utilizada por Castañeda (2019), una solución alcalina a base de hidróxido y silicato de sodio. La dosificación utilizada fue la siguiente: Ms = 1.08, concentración de Na₂O = 8% y relación agua/aglutinante=0.52.

4.2.3 Agente espumante

Castañeda (2019) en su investigación utiliza peróxido de hidrogeno (H₂O₂, 30% de concentración, Movilab del Perú S.A.C.) como agente espumante en una concentración de 0.5% con respecto al total de solución alcalina utilizada. Este elemento se utiliza como aditivo generador de microburbujas en la mezcla de geopolímero lo que causa que la mezcla aumente su volumen y se expanda reduciendo así su densidad.

4.2.4 Agregado fino

Para la fabricación del mortero se decidió utilizar cuarzo M70 molido como agregado fino. Así como la Puzolana, el cuarzo fue provisto por la compañía COMACSA que es un producto que comercializa. También se realizó análisis morfológico, granulométrico y químico para conocer sus características.

Caracterización física

El análisis SEM (figura 4.2a) muestra una forma granular e irregular del cuarzo debido al proceso de molienda. Mientras que su granulometría (figura 4.2b) muestra un tamaño mucho mayor a la puzolana, un D_{50} igual a $480.75 \mu\text{m}$, y un tamaño menor a $4760 \mu\text{m}$, D_{90} igual a $574 \mu\text{m}$, lo que lo hace ideal como agregado fino.

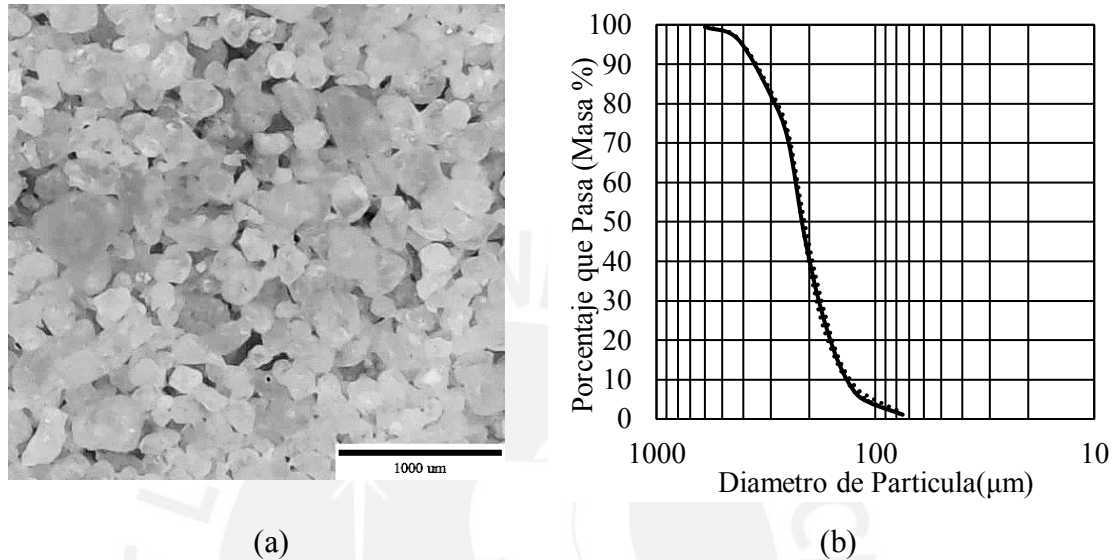


Figura 4.2. Características físicas del cuarzo M70: (a) SEM y (b) granulometría.

Caracterización química

Por su parte el análisis XRF muestra un alto contenido de óxido de silicio, característica común al tratarse de cuarzo. La importancia de este análisis está en la poca presencia de componentes que podrían alterar el geopolímero. Debido a que el geopolímero es un material activado químicamente, otros agregados con componentes que presenten reacciones fuera de lo estudiado alterarían los resultados obtenidos hasta el momento.

Tabla 4.2. Composición de óxidos del cuarzo M70.

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	Otros Componentes
97.80	0.77	0.02	1.41

4.2.5 Fibra de yute

El yute es una fibra vegetal (*Corchorus capsularis*, *Corchorus olitorius*) y está compuesto principalmente de celulosa (61-71%), hemicelulosa (13,6-20,4%) y lignina (12-13%) (Yan et al., 2016). Su uso en el compuesto geopolímero se decidió en base a sus beneficios ambientales, ya que la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) lo considera como fibra del futuro (2010). La fibra de yute se obtuvo a partir de cuerdas comerciales. El diámetro de las fibras fue de 53 μm y fueron cortadas a una longitud de aproximadamente 10 mm.

4.3 Proceso de producción de un bloque de construcción

4.3.1 Dimensiones del bloque

Las dimensiones utilizadas en el bloque son parecidas a una bloqueta comercial de concreto, con dos espacios en el interior. Así mismo se tuvo en cuenta la esbeltez del bloque para que tenga un buen comportamiento, esbeltez de 2:1 en relación altura: espesor. Las dimensiones del bloque se muestran en la figura 4.3a, con dimensión exterior 200 x 300 x 100 mm (altura x largo x espesor) y dimensiones de los orificios de 200 x 90 x 50 mm (altura x largo x espesor).

Para fabricar los bloques con estas dimensiones se utilizó un molde metálico de 3 mm de espesor y dos columnas rectangulares de poliestireno expandido para formar los orificios (figura 4.3b), todos los elementos fueron recubiertos con una película de plástico para evitar su adhesión al material de geopolímero.

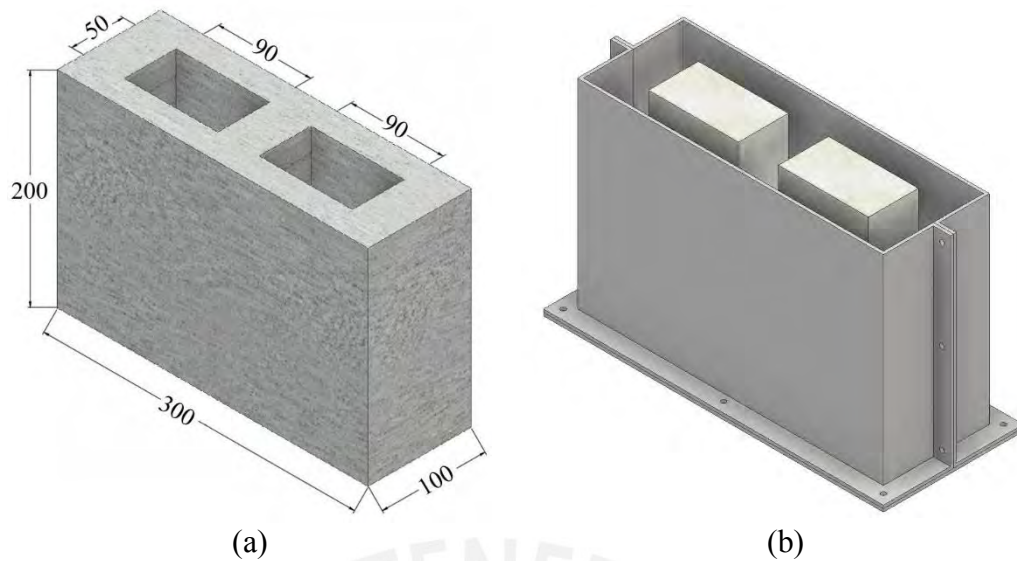


Figura 4.3. Dimensionado del bloque: (a) Características geométricas del bloque (Dimensiones en mm) y (b) molde metálico.

4.3.2 Proceso de producción

El proceso de producción del geopolímero inició mezclando en seco la puzolana natural, el cuarzo M70 molido y la fibra de yute durante 60 segundos. Después, se vertió sobre la mezcla seca el 95% del total de solución alcalina y se mezcló durante 90 segundos. Luego, se adicionó el peróxido de hidrogeno al 5% restante de solución alcalina y se mezcló con la mezcla anterior durante otros 60 segundos. Seguidamente, se vació la mezcla de geopolímero sobre el molde en tres capas haciendo vibrado manual en cada una de las capas. Se dejó el molde con mezcla reposar durante 2 horas a temperatura ambiente a fin de permitir la expansión de la mezcla, se realizó un corte al volumen excedido y se colocó en el horno a 65°C. A continuación, pasada 2 horas se realizó un nuevo corte a la mezcla expandida para luego sellarla y ser puesta nuevamente en el horno. Pasado 24 horas el bloque es desmoldado y nuevamente puesto en el horno hasta cumplir los 7 días de curado en horno. Finalmente, el bloque fue retirado del horno y dejado reposar hasta ser ensayado.

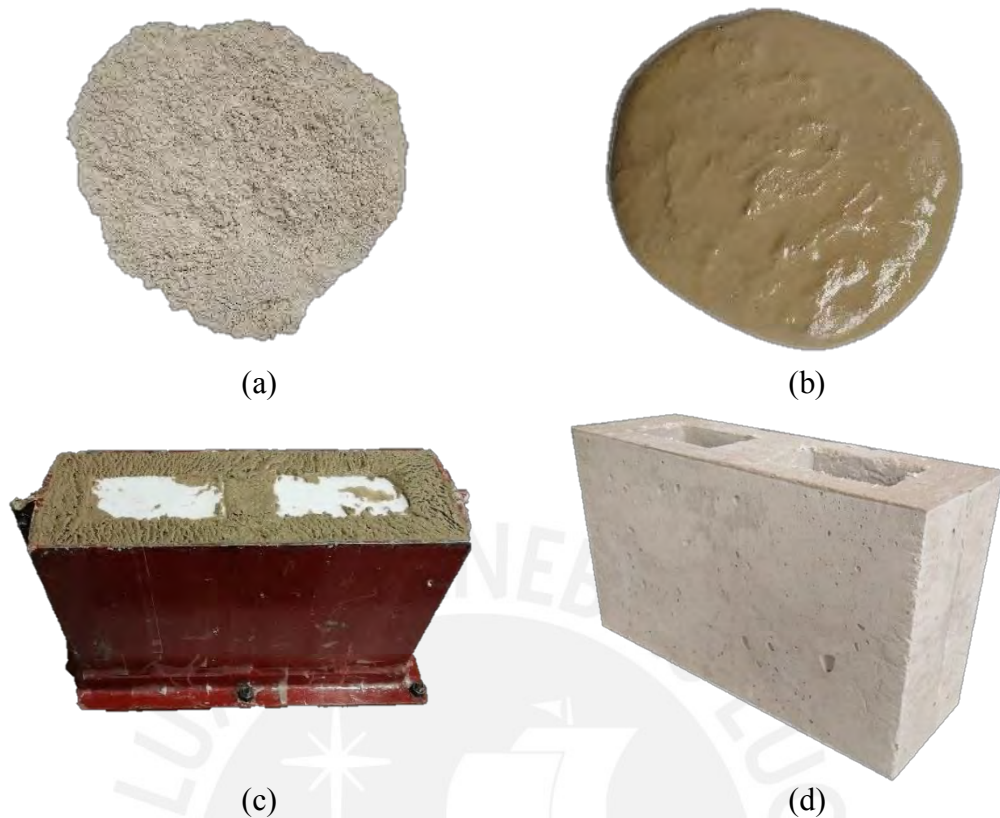


Figura 4.4. Proceso de producción de bloque de construcción: (a) Mezcla seca, (b) mezcla fresca de geopolímero con peróxido de hidrogeno, (c) mezcla en el molde metálico previo a sellado y curado y (d) bloque ligero de geopolímero.

4.4 Caracterización física y mecánica

Obtenido el bloque de geopolímero se realizó una caracterización física y mecánica del mismo.

4.4.1 Caracterización física

Para la obtención de las características físicas se siguió lo establecido por la norma ASTM C 20-00 (2015) y ASTM C 67 (2018a). El ensayo consistió primero en dejar reposar especímenes en agua durante 24 horas y luego se pesaron para obtener el peso saturado (W). Segundo se volvió a colocar los especímenes dentro de un recipiente con agua sin que toquen la base del recipiente y se pesó dentro para obtener el peso sumergido (S). Finalmente, los especímenes fueron puestos en el horno a 110°C durante 24 horas para ser secados y obtener el peso seco (D). Con los pesos obtenidos se calcularon mediante fórmulas establecidas (tabla 4.3) la densidad aparente (B), absorción de agua (A), porosidad aparente (P) y gravedad específica (T). La Tabla 4.3

muestra que se obtienen una densidad de 1.27 gr/cm³, menor a 1.68 gr/cm³, lo que indica que es un material ligero (Abdullah et al., 2012; Amran et al., 2015; ASTM International, 2014, 2016c). Los valores que se obtuvieron para la absorción de agua y porosidad aparente fueron 19.13% y 24.27%, respectivamente; estos resultados fueron lo esperado dado que se trata de un el material poroso. Por otro lado, se obtuvo una gravedad específica de 1.676 mucho menor a la gravedad específica del concreto (3.1-3.16), lo que indica que el material de por si es más ligero que el concreto.

Tabla 4.3. Caracterización física del bloque ligero de geopolímero.

Caracterización Física	Formula	Resultado
Densidad aparente (B)	$B = \frac{D}{W - S}$	1.27 gr/cm ³
Absorción de agua (A)	$A = \left[\frac{W - D}{D} \right] \times 100$	19.13%
Porosidad aparente (P)	$P = \left[\frac{W - D}{W - S} \right] \times 100$	24.27%
Gravedad específica (T)	$T = \frac{D}{D - S}$	1.676

4.4.2 Caracterización mecánica

La caracterización mecánica del bloque se realizó mediante ensayos de compresión uniaxial siguiendo lo establecido por la norma ASTM C 67 (2018a). Pevio al ensayo se aplicó una capa de pasta de yeso y cemento en las caras superior e inferior a fin de nivelar las superficies. Para realizar los ensayos se empleó una máquina de ensayo universal servohidráulica MTS controlada por desplazamiento. La celda de carga se ajustó a una velocidad de 2 mm/min. Los ensayos se realizaron a bloques con edades de 7 días (7 días en horno a 65°C) y 28 días (7 días en horno a 65°C + 21 días en condiciones ambientales). Las figura 4.5a muestra esfuerzos de compresión de 5.3 y 5.7 MPa a 7 y 28 días, respectivamente. Este resultado indica que los bloques pueden utilizarse como unidad de albañilería en la construcción de muros no-portantes (ASTM International, 2014; SENCICO, 2006). La figura 4.5b muestra la curva esfuerzo vs deformación respectivamente de los ensayos de compresión a 7 y 28 días, se aprecia un comportamiento similar de los bloques a distintas edades. Además, se observa un

comportamiento dúctil de los bloques, caracterizado por un crecimiento lento del esfuerzo de compresión.

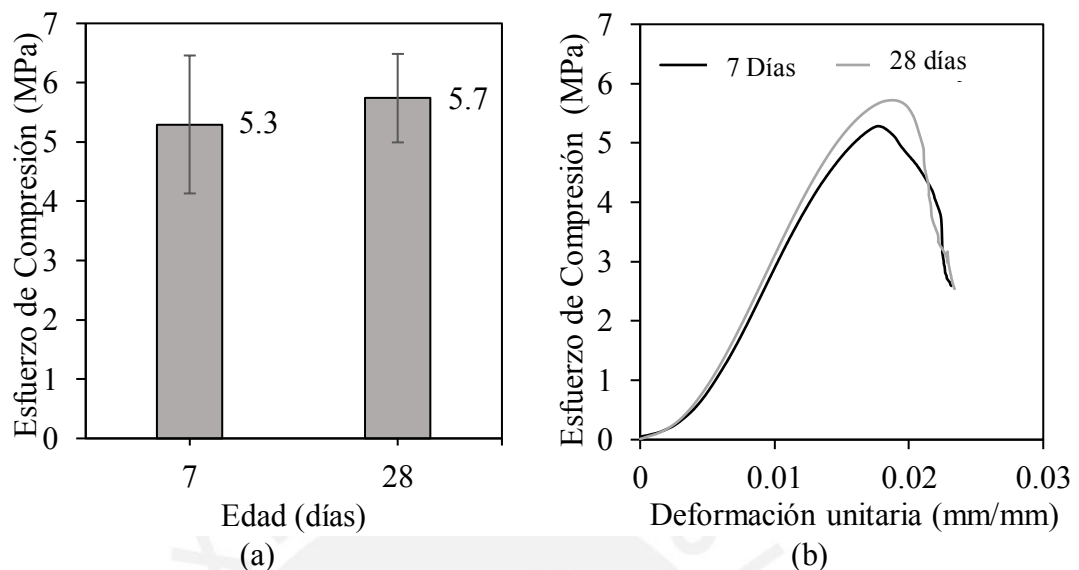


Figura 4.5. Caracterización mecánica del bloque ligero de geopolímero: (a) Esfuerzo de Compresión y (b) curva esfuerzo vs deformación.

4.5 Análisis de la durabilidad bajo condiciones agresivas

4.5.1 Resistencia al fuego

La resistencia al fuego se evaluó siguiendo el método propuesto por Cheng y Chiu (2003). El ensayo consistió en aplicar una llama de 1000°C (figura 4.6a) sobre la superficie de un disco de geopolímero de 100 mm de diámetro y 10 mm de espesor (figura 4.6b) durante 30 min mientras la temperatura es medida en el lado opuesto. Finalmente, la llama se extingue y se continúa registrando la temperatura hasta alcanzar la temperatura del ambiente (22 °C). La temperatura fue medida con una pistola termométrica láser 30:1 BTMETER BT-1500 con una precisión de 0.1°C. La temperatura del lado opuesto es indicador del grado de capacidad de absorción de calor del material. La evaluación de esta prueba se realizó en tres muestras en dos etapas: La Etapa I evaluó el calentamiento del disco mientras que la Etapa II evaluó la fase de enfriamiento (figura 4.7).

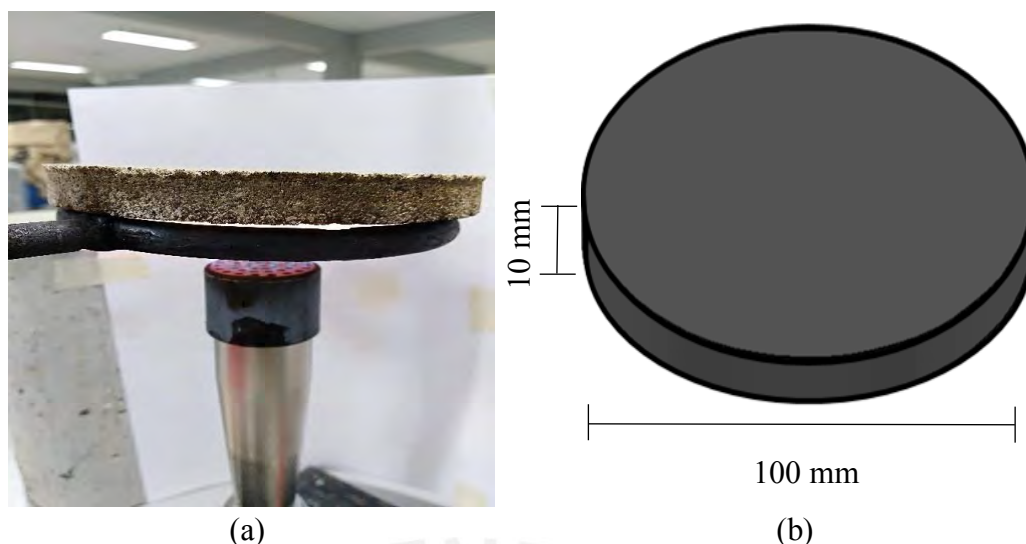


Figura 4.6. Ensayo de resistencia a fuego: (a) Realización del ensayo y (b) dimensiones del disco.

La tabla 4.4 muestra la máxima temperatura registrada en cada una de las muestras ensayadas, en ningún caso supera los 350°C lo que demuestra una retención de más del 65% del calor de la llama. Asimismo, se muestra que la máxima temperatura promedio que emite el material es de alrededor de 326.5°C la cual se alcanza a los 22 minutos, en promedio. Esta retención significativa de la transmisión de calor puede explicarse porque los poros desconectados atrapan el aire caliente evitando el flujo de calor de la llama a través de la muestra.

Tabla 4.4. Resumen de temperatura máxima.

Muestra	Temperatura máxima(°C)	Tiempo a temperatura máxima (min)
D Pzz 1	306.0	19
D Pzz 2	333.9	20
D Pzz 3	339.5	28
	326.5	22

La figura 4.7 muestra el registro de la temperatura del lado opuesto durante las pruebas de resistencia al fuego. Al principio de la Etapa I, el material sufrió un rápido cambio de temperatura, similar a una forma lineal, hasta alcanzar su temperatura máxima y permaneció constante hasta que la llama se extinguió. Mientras que en la Etapa II, el registro de la temperatura del lado opuesto indica que el disco se enfría ligeramente más lento en comparación del calentamiento. Esta anotación se basa en que durante la

etapa de calentamiento los discos tardan aproximadamente 28 min en alcanzar su máxima temperatura, mientras que durante la etapa de enfriamiento necesitan aproximadamente 40 min. volver a obtener la temperatura del ambiente, como se puede apreciar en la figura 4.7. Además, la temperatura de la fase de enfriamiento tiene una mayor uniformidad que la de calentamiento y los datos se ajustan a una caída exponencial de la temperatura.

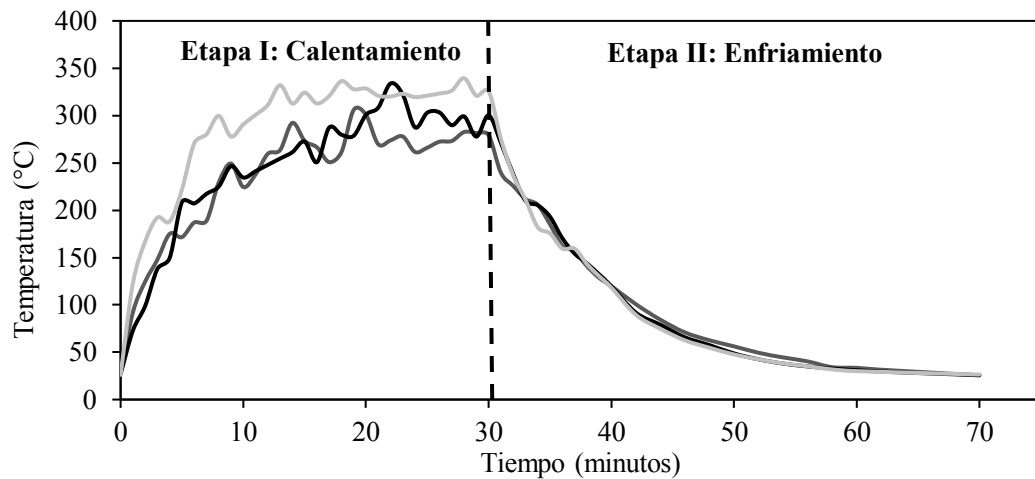


Figura 4.7. Temperatura del lado opuesto vs. tiempo de los ensayos de resistencia al fuego.

Como se muestra en la figura 4.8, los discos sometidos a la acción directa del fuego conservaron su forma sin deformaciones notables. Sin embargo, hay un cambio de color a uno más oscuro en comparación con la muestra inicial. Este cambio de color se debió a que en la superficie hubo una acción de abrasión por el efecto del contacto con el fuego, así mismo no se descarta que la coloración se haya producido por la impregnación del hollín de la combustión del propano. Otro factor que se puede observar en la imagen es que algunas fibras añadidas durante la producción siguen presentes en la muestra por estar recubiertas por el geopolímero, mientras las fibras que no tenían geopolímero fueron dañadas, como se aprecia en las circunferencias resaltadas, lo que indicaría que el geopolímero ligero actuaba como protector aislante frente a la acción del fuego.

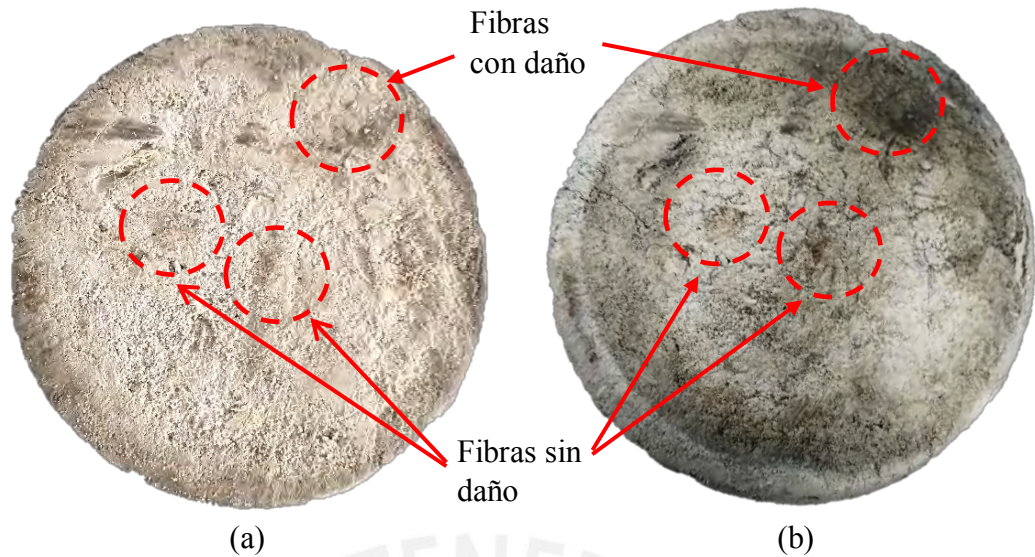


Figura 4.8. Disco de geopolímero ligero reforzado con fibra: a) Antes del ensayo y b) después del ensayo.

4.5.2 Resistencia a altas temperaturas

La resistencia a altas temperaturas se midió con el método propuesto por Ranjbar et al. (2014) y siguiendo las recomendaciones de RILEM 129-MHT (2000), para los cual se emplearon muestras cúbicas separadas en 5 grupos de 4 cubos, un grupo por cada temperatura. El método consistió en colocar 4 grupos en hornos distintos donde se calentaron utilizando una tasa de 10°C por minuto de calentamiento hasta alcanzar temperaturas de 300 , 500 , 800 y 1000°C , respectivamente, y se mantuvieron en estas temperaturas durante 2 horas, luego se descendieron las temperaturas con la misma tasa de 10°C por minuto hasta alcanzar la temperatura ambiente (figura 4.9). Posteriormente, se determinó la resistencia a la compresión uniaxial como indica la norma ASTM C 109 (2016a) y se midió la densidad aparente utilizando la norma ASTM D 7263 (2018b). Los resultados obtenidos de la densidad aparente y de la resistencia a la compresión de las muestras calentadas se compararon con los obtenidos en muestras mantenidas a temperatura ambiente (22°C).

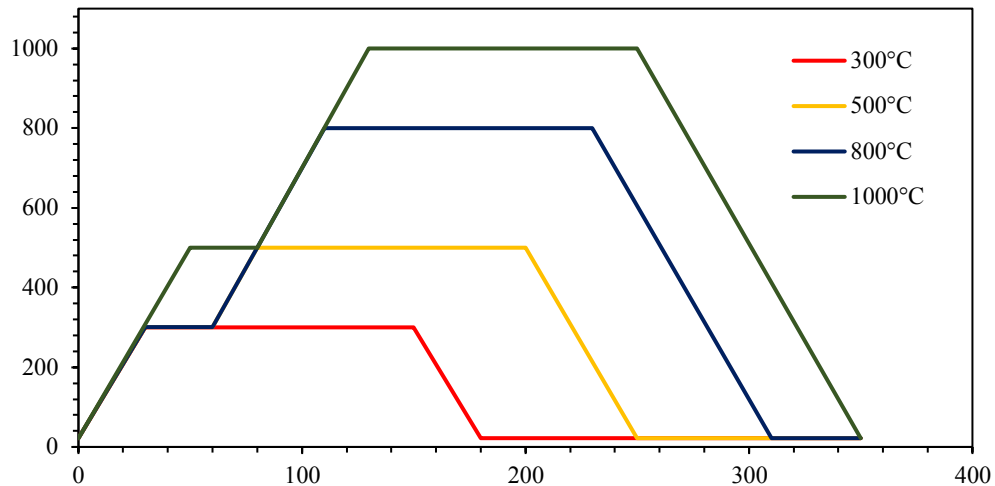


Figura 4.9. Patrones de calentamiento de los hornos.

Las figuras 4.10 muestra los grupos de cubos de geopolímero ligero luego de ser expuestos a las altas temperaturas. Se observó un cambio a un color más oscuro cuando la temperatura aumentó sin cambios volumétricos significativos hasta una temperatura de 800 °C. Este cambio de color se debió a que las superficies de las muestras sufrieron una abrasión causado por el calor irradiado en el horno. Esto demuestra que el mortero geopolímero no se ve gravemente afectado por la exposición a largo plazo a temperaturas de hasta 800 °C. Sin embargo, en el caso de especímenes expuestos a 1000°C, se observó una pérdida significativa de la forma inicial. La figura 4.10e muestra la vista de la sección transversal de una muestra en cubo expuesta a una temperatura de horno de 1000°C. Se observa un aumento en el tamaño de los poros causado por un nuevo proceso de expansión. Abdulkareem et al. (2014) describe en su investigación que cuando los geopolímeros son expuesto a una temperatura elevada muestran un aumento del contenido y tamaño de vacíos del interior, por lo que este comportamiento es lo esperado en este tipo de ensayos.

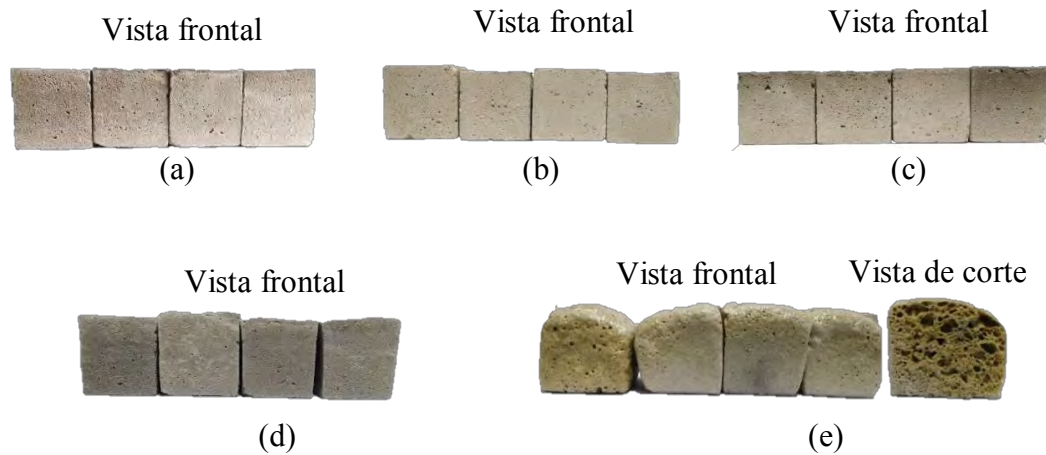


Figura 4.10. Cubos expuestos a altas temperaturas: (a) Temperatura ambiente; (b) 300°C; (c) 500°C; (d) 800°C y (e) 1000°C.

Los resultados de la caracterización mecánica y física de los cubos se muestran en la figura 4.11. Los resultados de los ensayos de compresión uniaxial (figura 4.11a) muestran que la resistencia a la compresión del mortero de geopolímero ligero reforzado con fibra no varía significativamente hasta los 800 °C, considerando las desviaciones estándar. No obstante, la menor resistencia a compresión se obtuvo en las muestras expuestas a 1000°C (4.65 MPa). La reducción considerable de la resistencia se debe al incremento del volumen de los poros lo que debilita el material. Por otro lado, en la figura 4.11b se puede observar que la densidad de las muestras permanece constante hasta una temperatura de 500°C, mientras que la densidad más baja (0.66 g/cm³) se registra de nuevo a 1000°C. La razón por la que la densidad no cambia drásticamente hasta los 800°C puede explicarse porque no hay liberación adicional de agua libre de la muestra ya que fue liberada durante el largo período de curado (7 días a 65°C), y es a partir de esta temperatura que la muestra tiende a perder su forma hasta perderla totalmente a los 1000°C a causa de la expansión de los poros. Al igual que el análisis cualitativo, la evaluación mecánica y física indica que el mortero geopolímero ligero reforzado con fibra es bastante estable hasta 800°C. Es apreciable que los dramáticos cambios volumétricos debido a la expansión de los poros resultan en una disminución significativa tanto de la resistencia a la compresión como de la densidad a 1000 °C. Comparando este resultado con ensayos similares realizados a muestras de concreto (Hussin et al., 2015) o de pasta (Pan et al., 2014) a base de

OPC, el comportamiento de las muestras a base de OPC tienden a reducir su resistencia a temperaturas mayores a 200°C y a la misma temperatura se empiezan a formar fisuras. No obstante, no existe mayor cambio de la forma de las muestras y la pérdida de densidad tampoco es mayor debido a que las muestras son más consistentes al tener menor cantidad de poros. Por otra parte, geopolímeros como los desarrollados por Ranjbar et al. (2014) a base de ceniza de aceite de palma y ceniza volante muestran una buena resistencia a compresión hasta temperaturas de 300 °C y a mayor temperatura esta desciende drásticamente, o de simplemente ceniza volante elaborado por Abdulkareem et al. (2014) que obtiene que a temperaturas mayores de 400 °C la resistencia decae significativamente. En ambos estudios la densidad desciende pasado las mismas temperaturas. Por lo que, comparando los resultados de este estudio con ambos casos, OPC y geopolímeros, el comportamiento que tiene es mejor, ya que es necesario una temperatura mucho mayor para notar un cambio significativo en las muestras de geopolímero ligero.

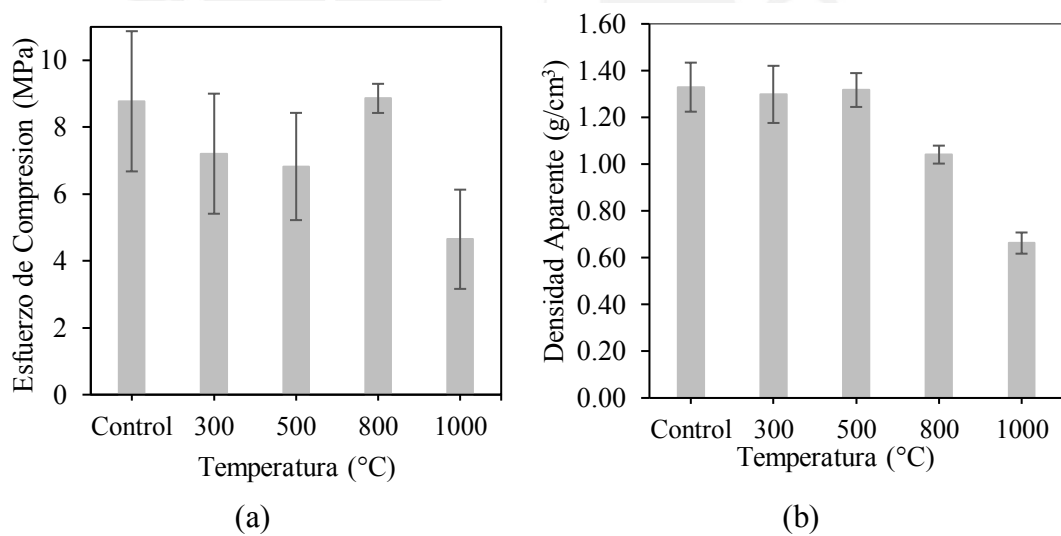


Figura 4.11. Caracterización mecánica y física de morteros de geopolímero ligero reforzado con fibras, expuestos a altas temperaturas: (a) Resistencia a la compresión y (b) densidad aparente.

4.5.3 Resistencia a la erosión del agua

La resistencia a erosión al agua se estudió mediante el análisis de los ensayos de humectabilidad y resistencia a erosión por un chorro de agua.

i. Ensayo de humectabilidad

La humectabilidad se analizó midiendo el ángulo de contacto usando un telescopio-goniómetro de ángulo de contacto Ramé-hart (figura 4.12a) (Aguilar et al., 2016). La prueba consistió en colocar una gota de 10 μL de agua en la superficie de las muestras de mortero geopolimérico ligero reforzado con fibra (prismas de 50 x 25 x 10 mm) y medir el ángulo de contacto (figura 4.12b). Los materiales de baja y alta humectabilidad se clasifican en función del ángulo de contacto: alta humectabilidad si el ángulo de contacto es inferior a 90° y baja humectabilidad si el ángulo de contacto es superior a 90° (Yuan & Lee, 2013).

Las pruebas del ángulo de contacto mostraron un ángulo de contacto de $43,31^\circ \pm 9,06^\circ$ (figura 4.12b). Por lo tanto, el geopolímero ligero reforzado con fibra a base de puzolana fue clasificado como un material de alta humectabilidad. Además, se pudo observar que las gotas de agua utilizadas para la prueba fueron absorbidas en un promedio de 3 segundos, lo que demuestra la alta tasa de absorción del material. La alta humectabilidad es una propiedad conocida de los materiales porosos que tienden a mojarse fácilmente en comparación con los más densos.

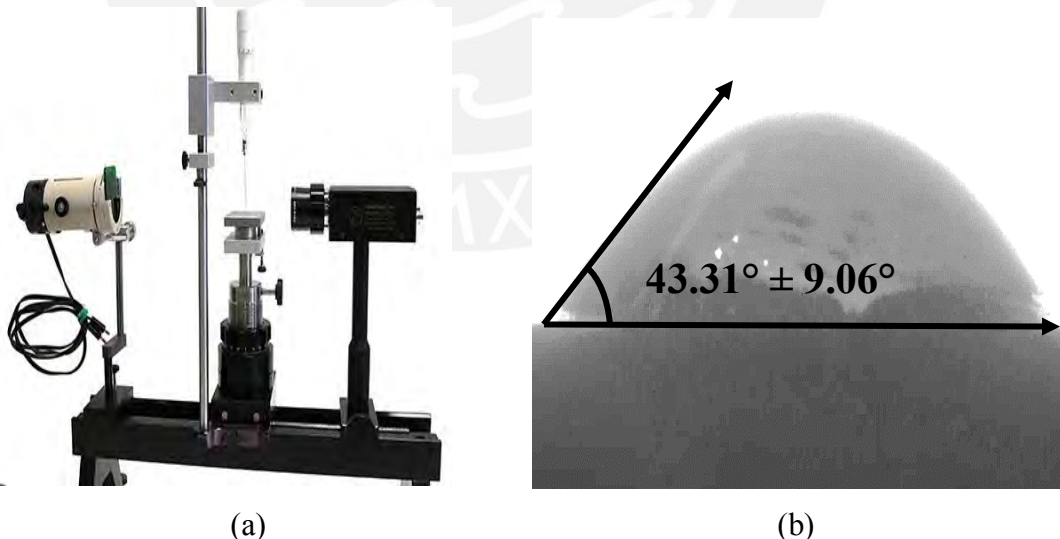


Figura 4.12. Ensayo de humectabilidad: (a) Telescopio-goniómetro de ángulo de contacto Ramé-hart y (b) medición del ángulo de contacto.

ii. Ensayo de resistencia a erosión por chorro de agua

La prueba de erosión por chorro de agua se realizó siguiendo la metodología propuesta por Benites, Sánchez y Ruiz (2018). La prueba consistió en aplicar un chorro de agua de forma perpendicular con una presión de 200 psi a una distancia de 300 mm (figura 4.13a) sobre una superficie de una muestra de mortero de geopolímero ligero reforzado con fibra (placas de 300 x 200 x 100 mm) durante 1, 5, 10 y 15 minutos. El estado de la superficie después del chorro de agua indica el nivel de erosión causado por la exposición al agua a altas presiones.

Las figuras 4.13b muestran las superficies de las muestras antes y después de la prueba de erosión por chorro de agua, respectivamente. El chorro de agua presurizado no causó penetración en la superficie de las muestras. No obstante, hay una ligera erosión sobre la superficie causada por la presión del chorro y las salpicaduras de agua. Las marcas tienen un diámetro de aproximadamente 1,5 cm y solo son superficiales. Aunque en la prueba anterior se demostró que el mortero geopolímero ligero reforzado con fibra es altamente humectable, este material demostró una notable resistencia a la erosión por agua.

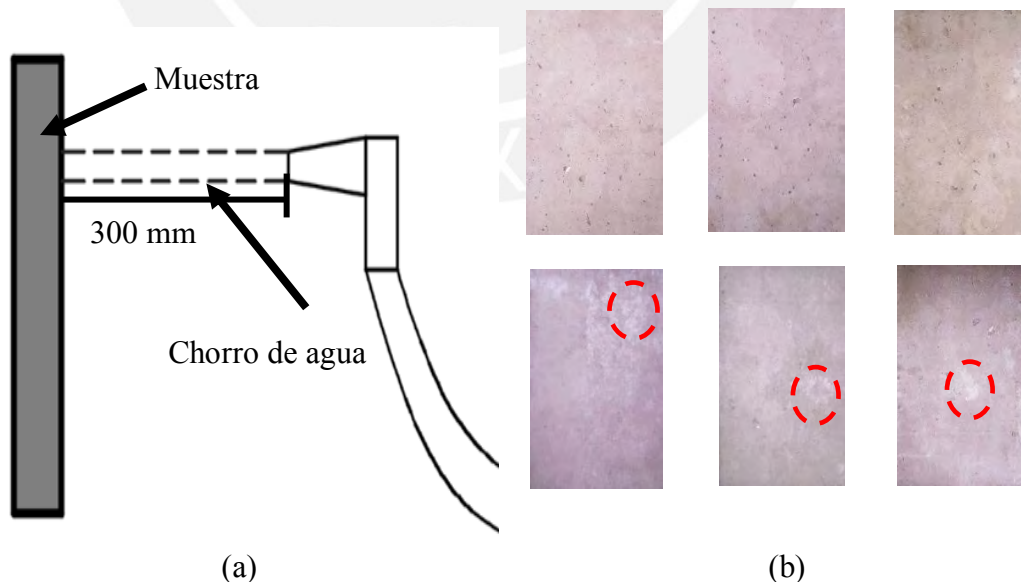


Figura 4.13. Ensayo de chorro de agua a presión: (a) Esquema de ensayo y (b) superficies de las muestras sometidas a la erosión por chorro de agua.

CAPÍTULO 5

5. CONCLUSIONES



En la presente tesis se realizó una investigación de los geopolímeros para aumentar el conocimiento de este material y fomentar su uso como material alternativo a los tradicionales en la construcción. A continuación, se aborda las conclusiones a las que se llegó con los resultados obtenidos en el análisis de la caracterización de la pasta de geopolímero a base de ceniza volante y el desarrollo y análisis de los bloques de geopolímero ligero a base de puzolana reforzados con fibra natural de yute.

Análisis y optimización del geopolímero de ceniza volante:

La optimización del geopolímero a base de ceniza volante se realizó mediante el análisis de la influencia de cinco parámetros estudiados: El módulo de sílice (M_s), concentración de óxidos de sodio ($\%Na_2O$), el contenido de agua (w/b), la temperatura y tiempo de curado. El valor óptimo para el M_s obtenido fue de 1.00 con el cual alcanza una resistencia de 23.55 MPa, para valores menores a este la resistencia decae significativamente y para valores mayores decae en menor proporción. La densidad muestra que aumenta considerablemente conforme aumenta el valor, mientras el pulso ultrasónico muestra que entre mayor sea la resistencia a compresión mayor será la velocidad de propagación de las ondas. El valor óptimo para $\%Na_2O$ obtenido fue 8% con el cual alcanza una resistencia de 23.93 MPa, para valores menores a este la resistencia decae severamente y para valores mayores decae en menor proporción. La densidad muestra que aumenta significativamente conforme aumenta la concentración, mientras el pulso ultrasónico muestra que entre mayor sea la resistencia a compresión mayor será la velocidad de propagación de las ondas. El valor óptimo para W/B obtenido fue 0.26 con el cual alcanza una resistencia de 24.56 MPa, para valores menores la resistencia decae ligeramente y para valores mayores decae significativamente. La densidad muestra que no existe demasiada variación entre resultados, mientras el pulso ultrasónico muestra que existe una ligera relación entre que mayor sea la resistencia a compresión mayor será la velocidad de propagación de las ondas. La temperatura óptima de curado obtenida fue 80°C, aunque posiblemente pudo ser mayor, con la cual alcanza una resistencia de 24.75 MPa, para valores menores la resistencia decae significativamente lo que indica el geopolímero gana resistencia con un curado en horno. La densidad muestra una sustancial caída conforme la temperatura aumenta, mientras el pulso ultrasónico muestra que entre

mayor sea la resistencia a compresión mayor será la velocidad de propagación de las ondas. Finalmente, el tiempo óptimo de curado fue 7 días, demostrando nuevamente que la exposición moderada al calor ayuda a aumentar la resistencia, con la cual alcanza una resistencia de 34.01 MPa. La densidad muestra una relevante caída conforme el tiempo de exposición es mayor, mientras el pulso ultrasónico muestra que entre mayor sea la resistencia a compresión mayor será la velocidad de propagación de las ondas.

Análisis de los bloques de geopolímero ligeros:

El análisis de los bloques de geopolímero ligero se realizó mediante la caracterización física y mecánica. Las características físicas muestran que los bloques de geopolímero ligero obtienen una densidad de 1.27 gr/cm³, lo que demostraría que se trata de un material ligero. Debido a que se utiliza un agente espumante para reducir la densidad se formó un material poroso y la porosidad aparente corrobora esta afirmación con un valor de 24.27%. Asimismo, al ser un material poroso tiende a captar fácilmente las moléculas de agua y quedar atrapadas en los poros interiores, los cálculos obtuvieron un valor de absorción de 19.13% afirmando tal argumento. La gravedad específica de los bloques de geopolímero ligero obtienen un valor de 1.676, valor mucho menor al 3.1 del concreto a base de OPC, lo que muestra que el geopolímero es igualmente de menor densidad sin la formación de los poros. Por otro lado, la caracterización mecánica muestra que los bloques de geopolímero ligero obtienen una resistencia a compresión de 5.3 y 5.7 MPa a 7 y 28 días de edad, respectivamente, este resultado demuestra que los bloques de geopolímero ligero pueden ser utilizados en la fabricación de un sistema estructural no portante. Además, este resultado muestra que la mayor ganancia de resistencia se obtiene durante la etapa de curado en horno. También, se aprecia que los bloques de geopolímero ligero poseen un comportamiento dúctil cuando son esforzados a compresión que puede deberse a la incorporación de las fibras de yute dentro de la mezcla. Este comportamiento dúctil se confirma observando la gráfica de esfuerzo vs deformación donde se aprecia un rápido crecimiento de la resistencia hasta alcanzar la máxima y luego una caída lenta.

Evaluación del geopolímero ligero de puzolana reforzado con fibra ante condiciones agresivas:

En esta etapa de la investigación se realizó un análisis del comportamiento del geopolímero ligero reforzado con fibra natural antes condiciones agresivas, las cuales fueron contacto con fuego, exposición a altas temperaturas y acción del agua. El ensayo de resistencia al fuego muestra una importante capacidad de absorción de calor por parte del geopolímero ligero. Se aprecia una reducción de la temperatura emitida, una reducción de más 650°C de la temperatura de la llama equivalente a una absorción del 65% del calor irradiado, también se apreció un cambio de color del material a uno más oscuro sin presentar cambio significativo en su forma. Además, es apreciables que las fibras utilizadas en la mezcla se encuentran presentes, lo que indicaría la capacidad de aislamiento térmico por parte del geopolímero. Por su parte el ensayo a altas temperaturas resalta su capacidad de soportar altas temperaturas sin presentar cambios significativos. Los resultados que a temperaturas de 300 y 500 °C conservan sus características como son su forma, esfuerzo a compresión y la densidad. Para temperaturas de 800 °C la densidad tiende a decaer significativamente, aunque el esfuerzo a compresión y su forma se mantienen sin cambios importantes. El cambio más importante ocurre a la temperatura de 1000°C, pierde significativamente la forma y decae significativamente sus propiedades, densidad y esfuerzo a compresión, está perdida en las características se debe a una expansión del tamaño de los poros. No obstante, comparando estos resultados con ensayos realizados a otros geopolímeros y muestras a base de OPC, se observa que posee un mejor comportamiento al mantener sus características en temperaturas mas elevadas. Finalmente, los ensayos de humectabilidad y erosión por chorro de agua a presión muestran dos factores importantes acerca del geopolímero ligero. El ensayo de humectabilidad resulta en la medición de un ángulo de $43,31^\circ \pm 9,06^\circ$, que al ser menor de 90° el material es fácilmente humectable o, dicho de otro modo, tiene pocas capacidades de impermeabilidad. En cambio, el ensayo de erosión por chorro de agua a presión muestra que el geopolímero tiene buenas capacidades de resistencia a ser degradado por el agua.

REFERENCIAS

- Abdulkareem, O. A., Mustafa Al Bakri, A. M., Kamarudin, H., Khairul Nizar, I., & Saif, A. A. (2014). Effects of elevated temperatures on the thermal behavior and mechanical performance of fly ash geopolymer paste, mortar and lightweight concrete. *Construction and Building Materials*, 50, 377–387.
- Abdullah, M. M. A. B., Hussin, K., Bnhussain, M., Ismail, K. N., Yahya, Z., & Razak, R. A. (2012). Fly ash-based geopolymer lightweight concrete using foaming agent. *International Journal of Molecular Sciences*, 13(6), 7186–7198.
- Aguilar, R., Nakamatsu, J., Ramírez, E., Elgeggen, M., Ayarza, J., Kim, S., Pando, M. A., & Ortega-San-Martin, L. (2016). The potential use of chitosan as a biopolymer additive for enhanced mechanical properties and water resistance of earthen construction. *Construction and Building Materials*, 114, 625–637.
- Ahmaruzzaman, M. (2010). A review on the utilization of fly ash. *Progress in Energy and Combustion Science*, 36(3), 327–363.
- Allahverdi, A., & Najafi Kani, E. (2009). Construction wastes as raw materials for geopolymer binders. *International Journal of Civil Engineering*, 7(3), 154–160.
- Allahverdi, Ali, Mehrpour, K., & Kani, E. N. (2008). Taftan Pozzolan-based Geopolymer Cement. *IUST International Journal of Engineering Science*, 19(3), 1–5.
- Amran, Y. H. M., Farzadnia, N., & Ali, A. A. A. (2015). Properties and applications of foamed concrete; A review. *American Society for Testing Materials*, 101, 990–1005.
- ASOCEM. (2019). *Reporte Estadístico Anual*. Asociación de Productores de Cemento. http://www.asocem.org.pe/estadisticas-nacionales/reporte_estadistico_2019
- ASTM International. (2014). ASTM C 129–14a, Standard Specification for

Nonloadbearing Concrete Masonry Units. *American Society for Testing Materials*.

ASTM International. (2015). ASTM C 20-00, Standard Test Methods for Apparent Porosity, Water Absorption, Apparent Specific Gravity, and Bulk Density of Burned Refractory Brick and Shapes by Boiling Water. *American Society for Testing Materials*.

ASTM International. (2016a). ASTM C 109/C 109M-16a, Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in . or [50-mm] Cube Specimens). *American Society for Testing Materials*.

ASTM International. (2016b). ASTM C 597-16, Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete. *American Society for Testing Materials*.

ASTM International. (2016c). ASTM C 90-16a, Standard specification for loadbearing concrete masonry units. *American Society for Testing Materials*.

ASTM International. (2017). ASTM C 618-17a, Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use. *American Society for Testing Materials*.

ASTM International. (2018a). ASTM C 67/C 67M-18, Standard Test Methods for Sampling and Testing Brick and Structural Clay Tile. *American Society for Testing Materials*.

ASTM International. (2018b). ASTM D 7263-09, Standard Test Methods for Laboratory Determination of Density (Unit Weight) of Soil Specimens. *American Society for Testing Materials*.

Atiş, C. D., Görür, E. B., Karahan, O., Bilim, C., Ilkentapar, S., & Luga, E. (2015). Very high strength (120 MPa) class F fly ash geopolymer mortar activated at different NaOH amount, heat curing temperature and heat curing duration. *Construction and Building Materials*, 96, 673–678.

Bakharev, T. (2005a). Durability of geopolymer materials in sodium and magnesium

- sulfate solutions. *Cement and Concrete Research*, 35(6), 1233–1246.
- Bakharev, T. (2005b). Geopolymeric materials prepared using Class F fly ash and elevated temperature curing. *Cement and Concrete Research*, 35(6), 1224–1232.
- Benites, V., Sánchez, J., & Ruiz, G. (2018). Efecto del extracto de Cabuya en la resistencia al agua del bloque de adobe para edificación. *Proceedings of the LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology*.
- Brus, J., Abbrent, S., Kobera, L., Urbanova, M., & Cuba, P. (2016). Advances in ²⁷Al MAS NMR Studies of Geopolymers. In *Annual Reports on NMR Spectroscopy* (Vol. 88, pp. 79–147). Elsevier Ltd.
- Castañeda, D. (2019). *Desarrollo de bloques de construcción ligero mediante el uso de geopolímeros a base de puzolana natural (Tesis de Maestría)*. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Cheng, T. W., & Chiu, J. P. (2003). Fire-resistant geopolymer produce by granulated blast furnace slag. *Minerals Engineering*, 16(3), 205–210.
- Criado, M., Fernández-Jiménez, A., & Palomo, A. (2007). Alkali activation of fly ash: Effect of the SiO₂/Na₂O ratio. Part I: FTIR study. *Microporous and Mesoporous Materials*, 106(1–3), 180–191.
- Davidovits, J. (1978). *Geopolymer: Chemistry and Applications*.
- Davidovits, J. (2005). *Geopolymer, green chemistry and sustainable development solutions*. Institute Geopolymer.
- Djobo, J. N. Y., Elimbi, A., Tchakouté, H. K., & Kumar, S. (2017). Volcanic ash-based geopolymer cements/concretes: the current state of the art and perspectives. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(5), 4433–4446.
- Duxson, P., & Provis, J. L. (2008). Designing precursors for geopolymer cements.

Journal of the American Ceramic Society, 91(12), 3864–3869.

- El-Naggar, K. A. M., Amin, S. K., El-Sherbiny, S. A., & Abadir, M. F. (2019). Preparation of geopolymer insulating bricks from waste raw materials. *Construction and Building Materials*, 222, 699–705.
- Fernández-Jiménez, A., & Palomo, A. (2007). Factors affecting early compressive strength of alkali activated fly ash (OPC-free) concrete | Factores que afectan al desarrollo inicial de resistencias a compresión en hormigones de ceniza volante activados alcalinamente (sin OPC). *Materiales de Construcción*, 57(287), 7–22.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2010). *Future fibres*.
- Habert, G. (2013). Assessing the environmental impact of conventional and “green” cement production. In *Eco-Efficient Construction and Building Materials: Life Cycle Assessment (LCA), Eco-Labeling and Case Studies* (pp. 199–238).
- Hardjito, D., & Rangan, B. V. (2005). *Development and properties of low-calcium fly ash-based geopolymer concrete*. Curtin University of Technology.
- He, J., Jie, Y., Zhang, J., Yu, Y., & Zhang, G. (2013). Synthesis and characterization of red mud and rice husk ash-based geopolymer composites. *Cement and Concrete Composites*, 37, 108–118.
- Hussin, M. W., Bhutta, M. A. R., Azreen, M., Ramadhansyah, P. J., & Mirza, J. (2015). Performance of blended ash geopolymer concrete at elevated temperatures. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 48(3), 709–720.
- Jackson, M., Deocampo, D., Marra, F., & Scheetz, B. (2010). Mid-Pleistocene pozzolanic volcanic ash in ancient Roman concretes. *Geoarchaeology*, 25(1), 36–74.
- Juenger, M. C. G., Winnefeld, F., Provis, J. L., & Ideker, J. H. (2011). Advances in alternative cementitious binders. *Cement and Concrete Research*, 41(12), 1232–

1243.

- Khale, D., & Chaudhary, R. (2007). Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development: A review. *Journal of Materials Science*, 42(3), 729–746.
- Kim, Y. Y., Lee, B. J., Saraswathy, V., & Kwon, S. J. (2014). Strength and durability performance of alkali-activated rice husk ash geopolymer mortar. *Scientific World Journal*, 2014.
- Krishnan, L., Karthikeyan, S., Nathiya, S., & Suganya, K. (2014). Geopolymer Concrete an Eco-Friendly Construction Material. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 03(11), 164–167.
- Lemougna, P. N., MacKenzie, K. J. D., & Melo, U. F. C. (2011). Synthesis and thermal properties of inorganic polymers (geopolymers) for structural and refractory applications from volcanic ash. *Ceramics International*, 37(8), 3011–3018.
- Li, Z., Zhang, S., Zuo, Y., Chen, W., & Ye, G. (2019). Chemical deformation of metakaolin based geopolymer. *Cement and Concrete Research*, 120, 108–118.
- Lionetto, F., & Maffezzoli, A. (2009). Polymer Characterization by Ultrasonic Wave Propagation. *Advances in Polymer Technology*, 27(2), 63–73.
- McLellan, B. C., Williams, R. P., Lay, J., Van Riessen, A., & Corder, G. D. (2011). Costs and carbon emissions for geopolymer pastes in comparison to ordinary portland cement. *Journal of Cleaner Production*, 19(9–10), 1080–1090.
- Miller, S. A., John, V. M., Pacca, S. A., & Horvath, A. (2018). Carbon dioxide reduction potential in the global cement industry by 2050. *Cement and Concrete Research*, 114, 115–124.
- Moon, J., Bae, S., Celik, K., Yoon, S., Kim, K. H., Kim, K. S., & Monteiro, P. J. M. (2014). Characterization of natural pozzolan-based geopolymeric binders. *Cement and Concrete Composites*, 53, 97–104.

MTS. (2015). *Machine Technology Systems*.

Muñoz, J. F., Easton, T., & Dahmen, J. (2015). Using alkali-activated natural aluminosilicate minerals to produce compressed masonry construction materials. *Construction and Building Materials*, 95, 86–95.

Nagalia, G., Park, Y., Ph, D., Asce, M., Abolmaali, A., Ph, D., Asce, M., Aswath, P., & Ph, D. (2016). Compressive Strength and Microstructural Properties of Fly Ash – Based Geopolymer Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 28(12), 1–11.

Oyun-Erdene, G., & Temuujin, J. (2019). Effect of mechanical activation of fluidized bed fly ash on geopolymer properties. *Solid State Phenomena*, 288, 51–58.

Palomo, A., Grutzeck, M. W., & Blanco, M. T. (1999). Alkali-activated fly ashes: A cement for the future. *Cement and Concrete Research*, 29(8), 1323–1329.

Pan, Z., Sanjayan, J. G., & Collins, F. (2014). Effect of transient creep on compressive strength of geopolymer concrete for elevated temperature exposure. *Cement and Concrete Research*, 56, 182–189.

Ranjbar, N., Mehrali, M., Alengaram, U. J., Metselaar, H. S. C., & Jumaat, M. Z. (2014). Compressive strength and microstructural analysis of fly ash/palm oil fuel ash based geopolymer mortar under elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, 65, 114–121.

RILEM TECHNICAL COMMITTEES. (2000). Recommendations of RILEM TC 129-MHT: Test methods for mechanical properties of concrete at high temperatures. Part 8: Steady-state creep and creep recovery for service and accident conditions. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 33(225), 6–13.

Rodríguez Camacho, R. E., & Uribe Afif, R. (2002). Importance of using the natural pozzolans on concrete durability. *Cement and Concrete Research*, 32(12), 1851–1858.

- Ryu, G. S., Lee, Y. B., Koh, K. T., & Chung, Y. S. (2013). The mechanical properties of fly ash-based geopolymer concrete with alkaline activators. *Construction and Building Materials*, 47, 409–418.
- Santaella Valencia, L. E. (2001). Caracterización física, química y mineralógica de las cenizas volantes. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 10, 47–62.
- Schneider, M., Romer, M., Tschudin, M., & Bolio, H. (2011). Sustainable cement production-present and future. *Cement and Concrete Research*, 41(7), 642–650.
- SENCICO. (2006). Norma Técnica de Edificaciones E.070 Albañilería. *El Peruano*, 295–309.
- Silva, G., Castañeda, D., Kim, S., Castañeda, A., Bertolotti, B., Ortega-San-Martin, L., Nakamatsu, J., & Aguilar, R. (2019). Analysis of the production conditions of geopolymer matrices from natural pozzolana and fired clay brick wastes. *Construction and Building Materials*, 215, 633–643.
- Silva, G., Salirrosas, J., Ruiz, G., Kim, S., Nakamatsu, J., & Aguilar, R. (2019). Evaluation of fire, high-temperature and water erosion resistance of fiber-reinforced lightweight pozzolana-based geopolymer mortars. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 706.
- Soria Santamaría, F. (1983). Las puzolanas y el ahorro energético en los materiales de construcción. *Materiales de Construcción*, 33(190–191), 69–84.
- Suksiripattanapong, C., Horpibulsuk, S., Chanprasert, P., Sukmak, P., & Arulrajah, A. (2015). Compressive strength development in fly ash geopolymer masonry units manufactured from water treatment sludge. *Construction and Building Materials*, 82, 20–30.
- Tchadjíé, L. N., Djobo, J. N. Y., Ranjbar, N., Tchakouté, H. K., Kenne, B. B. D., Elimbi, A., & Njopwouo, D. (2016). Potential of using granite waste as raw material for geopolymer synthesis. *Ceramics International*, 42(2), 3046–3055.
- Thokchom, S., Ghosh, P., & Ghosh, S. (2009). Acid Resistance of Fly ash based

- Geopolymer mortars. *International Journal of Recent Trends in Engineering*, 1(6), 36–40.
- Turner, L. K., & Collins, F. G. (2013). Carbon dioxide equivalent (CO₂-e) emissions: A comparison between geopolymer and OPC cement concrete. *Construction and Building Materials*, 43, 125–130.
- U.S. Geological Survey. (2020). *Mineral Commodity Summaries 2019*.
- Valenzuela Herrera, M. E. (2013). *Estudio Experimental De Las Propiedades De Geopolímeros Sintetizados a Partir De Puzolana Natural (Memoria para optar al título de ingeniero civil)*. UNIVERSIDAD DE CHILE.
- Vásquez, A., Cárdenas, V., Robayo, R. A., & de Gutiérrez, R. M. (2016). Geopolymer based on concrete demolition waste. *Advanced Powder Technology*, 27(4), 1173–1179.
- Yan, L., Kasal, B., & Huang, L. (2016). A review of recent research on the use of cellulosic fibres, their fibre fabric reinforced cementitious, geo-polymer and polymer composites in civil engineering. *Composites Part B: Engineering*, 92, 94–132.
- Yuan, Y., & Lee, T. R. (2013). Contact Angle and Wetting Properties. *Surface Science Techniques*, 51(1), 3–34.