**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTÍN DE AREQUIPA**

**ESCUELA DE POSGRADO**

**UNIDAD DE POSGRADO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE PROCESOS**

# "ESTUDIO COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO, FÍSICO Y MICROESTRUCTURAL DE MORTEROS GEOPOLIMÉRICOS OBTENIDOS A PARTIR DE CENIZA VOLCÁNICA Y MORTEROS DE CEMENTO PORTLAND DE USO TRADICIONAL"

**TESIS PRESENTADA POR LA BACHILLER:**

**Hermoza Gutiérrez, Marián Alicia**

**PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE:**

**Maestra en Ciencias con mención en Ingeniería Ambiental**

**Asesor: Mag. Almirón Baca, Jonathan Joseph**

**AREQUIPA – PERÚ**

**2019**

## DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTO

*A la mayor gloria de Dios, al que doy gracias por tanto bien recibido.*

*A mi abuela, María Romero, por su amor infinito.*

*A mis padres, Miriam Gutiérrez y Alcides Hermoza, por su cariño, comprensión y soporte constante.*

*A mis tíos y demás familiares, por el aliento incondicional.*

*A mis amigos, hermanos de pastoral y a cada persona que, en algún momento, me motivaron a luchar por mis sueños.*

*Al Mag. Jonathan Almirón y a la Ing. Pamela Tupayachi por el asesoramiento, exigencia y apoyo en el desarrollo de la presente investigación.*

**INDICE**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTÍN** ..... **i**

**DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTO** ..... **ii**

**INDICE** ..... **iii**

**LISTA DE TABLAS** ..... **v**

**LISTA DE FIGURAS** ..... **vi**

**RESUMEN** ..... **ix**

**ABSTRACT** ..... **x**

**CAPÍTULO 1** ..... **1**

**INTRODUCCIÓN** ..... **1**

1.1 Formulación del problema ..... 3

1.2 Justificación ..... 5

1.3 Hipótesis ..... 6

1.4 Objetivos ..... 6

1.4.1 Objetivo General ..... 6

1.4.2 Objetivos Específicos ..... 6

**CAPÍTULO 2** ..... **7**

**MARCO TEÓRICO** ..... **7**

2.1 Marco filosófico o epistemológico de la investigación ..... 7

2.1.1 Historia de los morteros ..... 8

2.2 Antecedentes de la investigación ..... 10

2.3 Bases Teóricas ..... 17

2.3.1 Cemento Portland ..... 17

2.3.2 Pasta de Cemento ..... 23

2.3.3 Morteros ..... 23

2.3.5 Agregado para morteros ..... 25

2.3.6 Geopolímero ..... 25

2.3.7 Ceniza Volcánica ..... 33

**CAPÍTULO 3** ..... **47**

**METODOLOGÍA** ..... **47**

3.1 Descripción del desarrollo experimental ..... 47
3.2 Variables ..... 48
*3.2.1 Variables independientes ..... 48*
*3.2.1 Variables dependientes ..... 48*
3.3 Planificación de la experimentación ..... 48
3.4 Materiales ..... 49
*3.4.1 Cemento Multi-propósito de alta durabilidad YURA IP ..... 50*
*3.4.2 Ceniza Volcánica ..... 52*
*3.4.3 Agregado Fino Local ..... 55*
*3.4.4 Solución activadora ..... 57*
3.5 Procedimiento de obtención de morteros ..... 59
*3.5.1 Fabricación de morteros de cemento ..... 62*
*3.5.2 Fabricación de morteros geopoliméricos ..... 65*
*3.5.3 Caracterización de morteros de cemento y morteros geopoliméricos ..... 68*
**CAPÍTULO 4 ..... 73**
**RESULTADOS Y DISCUSIÓN ..... 73**
4.1 Determinación de la mejor relación S:S en morteros de cemento y agregado fino por método automatizado ..... 73
4.2 Evaluación de las propiedades mecánicas, físicas y microestructurales de morteros ..... 74
*4.2.1 Propiedades mecánicas: Resistencia a la compresión ..... 74*
*4.2.2 Propiedades físicas: Absorción, densidad aparente y densidad real ..... 76*
*4.2.3 Propiedades estructurales y morfológicas: ..... 79*
**CONCLUSIONES ..... 84**
**RECOMENDACIONES ..... 86**
**REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS ..... 87**
**ANEXOS ..... 98**

# LISTA DE TABLAS

**Tabla 1. Centros poblados localizados en áreas de influencias por caídas de ceniza y piedra pómez** ....4
**Tabla 2. Historia bibliográfica de activación alcalina de cementos** ....9
**Tabla 3.** Revisión de metodologías para la obtención y evaluación de resistencia a la compresión de geopolímeros ....14
**Tabla 4. Composición del clinker Portland.** ....17
**Tabla 5. Usos de morteros y sus resistencias** ....24
**Tabla 6. Granulometría del agregado fino** ....25
**Tabla 7. Propiedades de diferentes GPM's** ....31
**Tabla 8. Composición química de materiales de morteros geopoliméricos obtenidos mediante ensayo de FRX** ....32
**Tabla 9.** Modelo experimental para desarrollo de morteros de estudio ....47
**Tabla 10. Variables independientes de la investigación** ....48
**Tabla 11. Composición química de Cemento CY determinado por FRX** ....51
**Tabla 12. Composición química de la ceniza volcánica determinada por FRX** ....53
**Tabla 13. Composición química de arena fina local determinada por FRX** ....55
**Tabla 14. Diseño de mezcla para la fabricación de morteros de cemento** ....62
**Tabla 15. Diseño de mezcla para fabricación de morteros geopoliméricos con agregado fino local** ....65
**Tabla 16. Valores de resistencia a la compresión (MPa) a 7, 14 y 28 días de ensayo** L/S = 1:1 y S:S = 1:1 ....75
**Tabla 17. Propiedades físicas de los morteros fabricados** ....76

## LISTA DE FIGURAS

**Figura 1. Etapas de la fabricación del cemento Portland. .....20**
**Figura 2. Consumo de Cemento Peruano 2010 - 2017 (TM).....23**
**Figura 3. Diagrama esquemático de la formación de geopolímero .....27**
**Figura 4. Representaciones de Polisialatos.....29**
**Figura 5. Clasificación de los materiales puzolánicos.....31**
**Figura 6. Puzolanas naturales.....33**
**Figura 7. Principales Volcanes activos del Sur del Perú.....34**
**Figura 8. Vulcanismo activo en la Zona Volcánica Central (ZVC) de América del Sur ....35**
**Figura 9. Mapa de Distribución de Cenizas Volcánicas en el Perú.....36**
**Figura 10. a) Fotografía del Volcán Ubinas en actividad. b) Mapa de ubicación de las estaciones de Red Sísmica Telemétrica del Volcán Ubinas.....37**
**Figura 11. Desarrollo de suelos con presencia de materiales volcánicos .....40**
**Figura 12. Montaña afectada por flujo piroclástico después de una erupción volcánica ..41**
**Figura 13. Procesos que ocurren dentro de las plumas volcánicas y liberación de componentes soubles en aguas superficiales.....42**
**Figura 14. Vegetación afectada por dispersión de ceniza volcánica .....44**
**Figura 15. Diagrama del pulmón que muestra la anatomía del pulmón y las vías respiratorias y la penetración de partículas de ceniza de diferentes tamaños asociadas con sus posibles efectos en la salud.....45**
**Figura 16. Secuencia de pre tratamiento de material precursor y agregado fino para fabricación de probetas .....49**
**Figura 17. Cemento Multi-propósito de alta durabilidad YURA IP .....50**
**Figura 18. Patrón DRX de cemento (CY) .....51**
**Figura 19. Curva termogravimétrica de Cemento (CY) determinada por TGA .....52**
**Figura 20. Ceniza del volcán Ubinas. A) Ceniza en estado natural B) Ceniza Molida. .....53**
**Figura 21. Patrón DRX de ceniza volcánica (CV) .....54**
**Figura 22. Curva termogravimétrica de ceniza volcánica CV .....54**
**Figura 23. Agregado fino SUPERMIX. .....55**
**Figura 24. Patrón DRX de agregado fino local (AL) .....56**
**Figura 25. Curva termogravimétrica de agregado fino (AL) determinada por TGA .....56**
**Figura 26. Procedimientos de preparación de solución activadora .....58**
**Figura 27. Mezcladora marca Yu Feng, modelo Cement Mortar MixerJJ-5 .....59**
**Figura 28. Mezcla en molde pistón para compactación.....60**

**Figura 29. Registro de peso inicial de probeta conformada .....60**
**Figura 30. Registro de medidas de probeta conformada (diámetro/altura=1/2) .....61**
**Figura 31. Estufa Memmert .....61**
**Figura 32. Incubadora industrial Memmert .....62**
**Figura 33. Pre-curado en estufa de probetas de cemento (CY) .....63**
**Figura 34. Curado de morteros de cemento (CY) .....63**
**Figura 35. Procedimiento de preparación de morteros de cemento por el método de compactado en molde pistón.....64**
**Figura 36. Conformación de mortero geopolimérico en molde pistón.....65**
**Figura 37. Morteros geopoliméricos de ceniza volcánica y agregado fino local (CV-AL-NaOH).....66**
**Figura 38. Procedimiento de preparación de morteros geopoliméricos por el método de compactado en molde pistón.....67**
**Figura 39. Máquina Hidráulica de Compresión ELE Interntational .....69**
**Figura 40. Ensayo de determinación de densidad por método de Arquímides .....70**
**Figura 41. Mortero fracturado en trozos .....71**
**Figura 42. Disposición de la muestra en porta-muestras de .....71**
**Figura 43. Preparación de las muestras de morteros para el ensayo de Difracción de Rayos X.....72**
**Figura 44. Microscopio Electrónico de Barrido .....72**
**Figura 45. Resistencia a la compresión de morteros de cemento CY y agregado fino a diferentes relaciones S:S .....73**
**Figura 46. Resistencia a la compresión de morteros de cemento CY y morteros geopoliméricos MGP alcalinamente activados .....75**
**Figura 47. Absorción de morteros de cemento (CY) y morteros geopoliméricos (CV+AL) .....77**
**Figura 48. Densidad aparente y densidad real (por método de Árquímides) de morteros de Cemento (CY) y morteros geopoliméricos (CV + AL).....78**
**Figura 49. Patrón DRX de mortero de cemento Cem+AF+$H_2O$ .....79**
**Figura 51. Patrón DRX de mortero geopolimérico CV+AL+NaOH.....80**
**Figura 53. Patrón DRX de mortero geopolimérico CV+AL+$Na_2SiO_3$ .....81**
**Figura 50. Microfotografía SEM y mapeo de composición de fase, usando análisis EDS de mortero de cemento .....82**
**Figura 52. Microfotografía SEM y mapeo de composición de fase, usando análisis EDS de mortero geopolimérico CV+AL+NaOH.....82**

**Figura 54. Microfotografía SEM y mapeo de composición de fase, usando análisis EDS de mortero geopolimérico CV+AL+NaOH+$Na_2SiO_3$ ..... 83**

# RESUMEN

En el presente trabajo se fabricaron morteros de cemento Portland (CY) y morteros geopoliméricos a partir de ceniza del volcán Ubinas (CV) con agregado fino local (AL), activados alcalinamente con hidróxido de sodio (NaOH) e hidróxido de sodio con adición de silicato de sodio (NaOH + $Na_2SiO_3$), ambas soluciones con NaOH a 12M. Usando el método de compactado en molde pistón, se lograron conformar especímenes con relaciones líquido-sólido (L/S) de 0.1, sólido:sólido de 1:1 y la probeta con una relación diámetro/altura (d/H) de 1/2.

Se determinó el comportamiento mecánico de los especímenes mediante el ensayo de resistencia a la compresión a los 7, 14 y 28 días de curado, en el cual los morteros de cemento presentaron resistencias promedio de hasta 29.36 MPa, en los morteros CV+AL+NaOH se registraron un promedio de 24.59 MPa y los morteros CV+NaOH+$Na_2SiO_3$ mostraron resistencias de hasta 14.15 MPa a los 28 días de ensayo.

Luego, se evaluaron las propiedades físicas de los morteros, determinando que la mayor porosidad fue obtenida por los morteros con adición de silicato de sodio en el activador, atribuido a una baja reactividad. Se evidenció una proporcionalidad inversa de la densidad de todos los grupos de morteros en relación a la absorción.

En los morteros de cemento se observaron fases cristalinas determinadas por difracción de rayos x (DRX) que corresponden a portlandita y vaterita, los morteros geopoliméricos activados alcalinamente poseen estructuras mineralógicas del tipo andesina, augita y anortita, óxido de silicio y diopside.

Los morteros geopoliméricos observados por microscopía electrónica de barrido (SEM/EDS) presentan una matriz homogénea contínua y fuerte interacción de los componentes reactantes. Los morteros geopoliméricos activados con adición de silicato de sodio, evidenciaron presencia de poros y partículas de ceniza y agregado no reaccionantes.


**Palabras clave:** Geopolímero, ceniza volcánica, mortero, cemento, Portland.

## ABSTRACT

In the present work, Portland cement mortars (CY) and geopolymeric mortars were made from ash from Ubinas volcano (CV) with local fine aggregate (AL), activated alkaline with sodium hydroxide (NaOH) and NaOH + sodium silicate ($Na_2SiO_3$), both 12M solutions. Using the piston mold compaction method, it was possible to comply with specifications of L/S ratios of 0.1, Solid:Solid of 1:1 and the specimen with a diameter/height ratio of 1/2.

The mechanical behavior of the mortars was determined by means of the compressive strength test, where the cement mortars show resistances of up to 29.36 MPa at 28 days of test, the CV + NaOH mortars in function of minor minor resistances. (24.59 MPa) than cement mortars and mortars of CV + NaOH + Na2SiO3 resistances up to 17.46 MPa at 7, 14 and 28 days of testing.

Then, the physical properties of the mortars were evaluated, and it was determined that most of the mortar energy was due to a low reactivity. An inverse proportionality of the density of all the mortar groups in relation to the absorption was evidenced.

In the cement mortars, the crystalline phases are determined by X-ray diffraction (XRD) corresponding to a portlandite and vaterite, the geopolymeric mortars activated alkaline mineralogical structures of the andesine, augite and anortite type, silicon oxide and dioxide.

The geopolitical mortars observed by scanning electron microscopy (SEM / EDS) present a continuous homogeneous matrix and strong interaction of the reactant components. Activated geopolymer mortars with the addition of sodium silicate, evidence of the presence of pores and non-reactive ash and aggregate particles.


**Keywords:** geopolymer, volcanic ash, mortar, cement, Portland.

# CAPÍTULO 1

# INTRODUCCIÓN

La contaminación ambiental es uno de los más graves problemas que afecta progresivamente a los componentes físicos, químicos y biológicos con los que interactúan los seres vivos. Esto se debe, principalmente, a las inadecuadas prácticas industriales que traen como consecuencia la explotación de recursos naturales y/o la generación de residuos peligrosos. Uno de los mayores retos para luchar contra la contaminación ambiental deriva del sector de la construcción, el cual es responsable de gran parte de los impactos ambientales relevantes, siendo uno de sus principales pilares la producción de cemento, pues el mundo está ávido de este material (Fahim Huseien, Mirza, Ismail, Ghoshal, & Abdulameer Hussein, 2017).

La fabricación de cemento Portland ordinario (CPO) es un proceso energético intensivo que requiere de la quema de grandes cantidades de combustible y la descomposición de la piedra caliza, lo que resulta en emisiones excesivas de dióxido de carbono que ascienden a 6 - 7% de la totalidad del índice de emisiones mundiales y se estima que la demanda mundial de CPO aumentará a casi 200% en el año 2050 (Shi & Jiménez, 2011).

Entre las tecnologías más limpias consideradas para reducir y mitigar las emisiones de $CO_2$ generados en los procesos de producción del cemento y los problemas asociados a ellos, se aplica la sustitución de materias primas desarrollando nuevos tipos de materiales verdes, sostenibles y amigables con el medio ambiente llamados geopolímeros (Xie & Ozbakkaloglu, 2015). Una de las mayores ventajas que se le puede atribuir al desarrollo de geopolímeros es que las materias primas pueden ser subproductos de desechos industriales de bajo costo (ceniza volante, humo de sílice, escoria, ceniza de cáscara de arroz, barro rojo, etc.) ricos en silicio (Si) y aluminio (Al).

Los concretos polimérico inorgánicos, concretos geopoliméricos (CGP), cementos alcalinos o geocementos, son materiales emergentes con diversas aplicaciones desde la gestión de residuos hasta para su utilización en la industria

de la construcción. (Phair, Van Deventer, & Smith, 2004). Mientras que los cementos puzolánicos generalmente dependen de la presencia de calcio, los CPI no utilizan la formación de calcio-silica-hidratado (CSH) para la formación de la matriz. (C. K.-B. Yip, 2014). En cambio, estos utilizan la policondensación de los precursores ricos en sílica y alúmina y un alto contenido de álcalis para alcanzar fuerza estructural (Sofi, van Deventer, Mendis, & Lukey, 2007). Generalmente, los morteros geopoliméricos (MGP) son reportados como más sostenibles que los de CPO debido a que requieren menor energía para su producción con significativamente menos emisiones de $CO_2$ (Duxson, Provis, Lukey, & van Deventer, 2007).

El Perú ocupa el sexto lugar en la producción de cemento en Latinoamérica luego de México, Brasil, Argentina, Colombia y Venezuela. La industria de cemento en el Perú produce los tipos y clases de cemento que son requeridos en el mercado nacional, según las características de los diferentes procesos que comprende la construcción de la infraestructura necesaria para el desarrollo, la edificación y las obras de urbanización (Janet, Saavedra, & Semana, 2011).

A partir de estas premisas, surgen estudios que plantean reemplazar el cemento Portland ordinario por el uso de ceniza volcánica, un material ampliamente disponible en la naturaleza, aprovechando la larga cadena de volcanes situada al sur del territorio peruano. Esta zona comprende la parte septentrional de la Zona Volcánica Central (ZVC) de América del Sur; es así que en nuestro país se han identificado más de 400 volcanes, estando la mayoría de ellos inactivos. En la última década se ha identificado actividad en volcanes de los departamentos de Arequipa (Misti y Sabancaya), Moquegua (Ubinas, Huaynaputina y Ticsani) y Tacna (Tutupaca y Yucamane), los cuales han presentado erupciones históricas, por este motivo es que estos grandes cuerpos geológicos son constantemente monitoreados (Macedo, 2013).

El volcán Ubinas es considerado el volcán más activo del sur del Perú por sus 25 eventos de alta actividad fumarólica registrados desde el siglo XVI, acompañada de emisiones de ceniza y rocas que han afectado fuertemente la actividad agrícola de los más de 3500 habitantes del valle de Ubinas (Macedo, 2013). El alcance que tiene la ceniza alrededor del volcán o en una dirección determinada por la

influencia de los vientos dominantes, da lugar a zonas afectadas en las que disminuyen los efectos a medida que se alejan del cráter (González Cárdenas, 2006).

Esta tesis se desarrolló como parte del proyecto “Fabricación, caracterización y evaluación de geopolímeros obtenidos a partir de ceniza volcánica para aplicación en construcción" en el marco de financiamiento otorgado por CONCYTEC (Contrato N° 121-2016-CIENCIACTIVA) el cual fue desarrollado en los laboratorios del Instituto de Energía y Medio Ambiente (IEM) de la Universidad Católica San Pablo (UCSP), en convenio con el Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET) y la Universidad Carlos III de Madrid (UC3M).

El objetivo principal de la presente investigación es evaluar el comportamiento mecánico de morteros geopoliméricos elaborados a partir de ceniza volcánica en comparación con los morteros obtenidos a partir del cemento Portland de uso tradicional, con el fin de darle un valor agregado a elementos naturales como la ceniza volcánica, cuya dispersión natural genera alteraciones en las localidades poblacionales aledañas, debido a los peligros y riesgos para la biogeografía.

## 1.1 Formulación del problema

La región sur del Perú presenta una zona volcánica con manifestaciones históricas de fenómenos eruptivos caracterizados por su notable explosividad, los cuales han venido siendo monitoreados y estudiados con mayor interés en los últimos años, siendo el volcán Ubinas considerado como uno de los más activos del Perú (Macedo, 2013). Cuando un volcán hace erupción, este lanza una variada gama de materiales piroclásticos al aire. Los fragmentos más grandes de material (entre 2 a 10 mm de diámetro), raramente alcanzan más de 2 km de distancia desde el cráter. Sin embargo, el material fino conocido como ceniza (menor a 2 mm de diámetro) puede ser arrastrado por corrientes de aire localizadas justo encima de la columna de erupción del volcán y luego se deposita sobre la superficie terrestre debido a las corrientes de aire descendientes (GNS Science, 2012).

Existen factores locales atribuibles a las erupciones volcánicas que influyen determinantemente en las características naturales de la biósfera, en la que viven y se desarrollan numerosos centros poblados aledaños al distrito de Ubinas de la

provincia General Sánchez Cerro, de coordenadas 16°23′12″S 70°51′21″O, con una extensión de 874.571,12 km$^2$ los que pueden ser directa e indirectamente afectados por la formación de depósitos de ceniza en la zona **(Tabla 1)**. El clima en verano es fresco, árido y de poca duración, mientras que en invierno es frío. Seco y mayormente despejados; asimismo, durante el transcurso del año, la temperatura varía de 0 °C a 18 °C (Weather Spark, 2016). La población en riesgo en el radio de 14 Km. del volcán es de 2325 habitantes (810 familias) y en el radio de 45 Km. del volcán es de 9073 habitantes (2642 familias) que se dedican principalmente a la agricultura y ganadería (Instituto Nacional de Defensa Civil & Comité Regional de Defensa Civil de Moquegua, 2006).

**Tabla 1. Centros poblados localizados en áreas de influencias por caídas de ceniza y piedra pómez**

| Ubicación | | Nro. De Localidades | Cantidad de Personas | Cantidad de Hogares | Cantidad de Viviendas |
|---|---|---|---|---|---|
| **REGION** | **AREQUIPA** | **85** | **1,325** | **423** | **697** |
| **PROVINCIA** | **AREQUIPA** | **85** | **1,325** | **423** | **697** |
| DISTRITO | SAN JUAN DE TARUCANI | 85 | 1,325 | 423 | 697 |
| **REGION** | **MOQUEGUA** | **199** | **20,073** | **6,142** | **7,358** |
| **PROVINCIA** | **GRAL. SANCHEZ CERRO** | **199** | **20,073** | **6,142** | **7,358** |
| DISTRITO | OMATE | 32 | 4,128 | 1,357 | 1,596 |
| DISTRITO | CHOJATA | 15 | 1,635 | 507 | 554 |
| DISTRITO | COALAQUE | 15 | 1,513 | 428 | 586 |
| DISTRITO | ICHUÑA | 12 | 283 | 60 | 122 |
| DISTRITO | LA CAPILLA | 19 | 1,184 | 311 | 401 |
| DISTRITO | LLOQUE | 11 | 1,152 | 225 | 239 |
| DISTRITO | MATALAQUE | 21 | 1,301 | 397 | 422 |
| DISTRITO | PUQUINA | 29 | 3,176 | 1,056 | 1,540 |
| DISTRITO | QUINISTAQUILLAS | 4 | 378 | 118 | 153 |
| DISTRITO | UBINAS | 27 | 3,987 | 1,310 | 1,334 |
| DISTRITO | YUNGA | 14 | 1,336 | 373 | 411 |
| | **TOTAL** | **284** | **21,398** | **6,565** | **8,055** |

**Fuente:** INEI – Censo X de Población y V de Vivivenda del 2005

La dispersión de la ceniza trasladada por los vientos dominantes determinará el área de impacto; asimismo, las circunstancias locales pueden disminuir o acrecentar estos efectos; del mismo modo, los suelos generados sobre rocas volcánicas son propicios para el desarrollo de especies agrícolas y la densidad poblacional del entorno se dedica casi exclusivamente a las prácticas agrarias, por lo que la proximidad del volcán y sus componentes eruptivos son perjudiciales y peligrosos (Macedo, 2013); de hecho, y debido a la bondad de los suelos generados sobre rocas volcánicas, el entorno de los volcanes suele estar

densamente poblado, dedicándose la mayor parte de esta población a las prácticas agrarias, precisamente en la proximidad de los volcanes más activos y peligrosos del planeta (González Cárdenas, 2006).

En el mundo se han producido cientos de miles de toneladas de residuos sólidos granulares procedentes de actividades industriales a los que se ha podido atribuir poco a poco un valor agregado para la generación de nuevos materiales especialmente enfocados al sector de los materiales para la construcción (Vite Torres, 2015). Procedimientos como estos generan oportunidades de investigación en cuanto al comportamiento de los productos granulares y naturales como la ceniza volcánica y sus posibles aplicaciones.

## 1.2 Justificación

Actualmente existe gran disponibilidad de materiales inorgánicos naturales como la ceniza volcánica que por sus características puede servir como sustituyente parcial o total de cementos tradicionales y también dar pie al desarrollo de estudios sobre posibles mejoras mecánicas de la mezcla para la fabricación de morteros. El desarrollo de morteros geopoliméricos (MGP's) obtenidos a partir de ceniza volcánica de características similares a las de morteros desarrollados a partir de cemento Portland ordinario representaría una alternativa de bajo costo, funcional y ambientalmente más amigable que los procesos productivos convencionales actuales (Martinez López, 2015).

Se ha demostrado que la ceniza volcánica dispersa en el ambiente, puede generar diversas alteraciones fisiológicas en el ser humano, que pueden ir desde trastornos leves como irritación en la piel y de las vías aéreas (Baxter, Ing, Falk, & Plikaytis, 1983) problemas de tipo respiratorio, estrés, aparición de fluorosis a nivel óseo y dental, hasta aspectos más graves asociados a enfermedades como el cáncer (Shane J. Cronin & Sharp, 2002).

Para el ser humano, la principal vía de exposición a los metales y metaloides la constituyen la ingestión de alimentos o agua, así como la inhalación (Varrica, Tamburo, Dongarrà, & Sposito, 2014). Por lo anterior, es posible que los alimentos, el agua potable y el aire circundante en las zonas aledañas a los volcanes puedan contribuir de manera diferente a la absorción de oligoelementos,

al esparcirse por el ambiente en forma de material particulado (Martinez López, 2015).

Generalmente, los morteros geopoliméricos (MGPs) son reportados como mucho más sustentables que el Cemento Portland Ordinario en términos de bajos requerimientos energéticos con significativamente menores emisiones de $CO_2$ (Duxson et al., 2007; Z. Zhang, Provis, Reid, & Wang, 2014).

## 1.3 Hipótesis

Debido a la disponibilidad de grandes cantidades de materiales piroclásticos compuestos principalmente por sílice y alúmina producto de los fenómenos eruptivos del volcán Ubinas, es posible aprovechar la ceniza volcánica como precursor en morteros geopoliméricos con características mecánicas comparables a las de los morteros de cemento Portland ordinario.

## 1.4 Objetivos

### 1.4.1 Objetivo General

Comparar el comportamiento físico, mecánico y microestructural de morteros geopoliméricos obtenidos a partir de ceniza volcánica con los morteros obtenidos a partir del cemento Portland.

### 1.4.2 Objetivos Específicos

- Fabricar morteros de ceniza volcánica activados alcalinamente.
- Elaborar morteros de cemento Portland de uso tradicional.
- Comparar las propiedades mecánicas, físicas y micro-estructurales de los morteros geopoliméricos con los de morteros cemento Portland.

# CAPÍTULO 2

# MARCO TEÓRICO

## 2.1 Marco filosófico o epistemológico de la investigación

El concepto de "geopolímero" fue introducido inicialmente por Joseph Davidovits en 1978. Esos polímeros inorgánicos de silicato de aluminio tridimensionales compuestos por iones tetraédricos $AlO_4$ y $SiO_4$ se prepararon principalmente a partir de desechos industriales. Davidovits, propuso que podía utilizarse un líquido alcalino que reaccionara eficientemente con el silicio (Si) y el aluminio (Al) presente en un material de origen geológico o en materiales secundarios como la ceniza volante y la cáscara de arroz para producir materiales con las características aglutinantes del cemento (Davidovits, 1991). Estos son conocidos como aluminosilicatos inorgánicos, pero también toman el nombre de geopolímeros sintéticos inorgánicos de aluminosilicatos (Palomo, Fernández-Jiménez, & Criado, 2004), los cuales son reconocidos por poseer buenas propiedades aglutinantes, así como por su excelente comportamiento mecánico (Martinez López, 2015).

Aunque el uso del término "material geopolimérico" ha sido introducido relativamente hace poco al mundo de la química de los materiales, el uso de los activadores alcalinos para estimular las propiedades puzolánicas de los minerales ha sido identificado a lo largo de la historia, las fechas de su aplicación corresponden al menos al tiempo de "Nabucodonozor", de la dinastía de Babilonia (1125 a. C. hasta 1103 a. C. aproximadamente). Las exploraciones de Malinowski, Langton y Roy, llevaron a encontrar construcciones de prolongada durabilidad en las antiguas ciudades de Egipto, Grecia, Chipre e Italia, confirmando como evidencia la presencia de morteros y concretos antiguos sometidos a condiciones naturales de corrosión por 2000 años que se mantienen estables hasta la actualidad, mientras que una estructura de concreto de cemento Portland moderno puede presentar daños después de los 10 años (Della M Roy, 1999). Fueron Langton y Roy quienes hallaron aluminosilicatos de sodio hidratado (analcita) en morteros y concretos desarrollados a partir de cemento puzolánico romano. Se encontraron proporciones similares de zeolitas en diferentes cementos antiguos, lo que sugiere que este mineral es una fase final y estable de conversión a largo plazo, que proviene a partir de fases constituyentes similares a la zeolita, ayudando así a incrementar la durabilidad de las estructuras de cemento (Delia M Roy & Langton, 1989).

### 2.1.1 Historia de los morteros

Es frecuente el uso del término “piedra” para referirse a materiales que son utilizados en la construcción o de uso industrial. Estas piedras pueden ser de dos tipos naturales y artificiales. Las piedras naturales refieren a los materiales de roca natural que es generalmente extraída de canteras o minas y empezó a usarse para estos fines hacia 8000 A.C., siendo Egipto el mejor ejemplo del mundo antiguo. Las piedras artificiales se caracterizan por ser productos manufacturados y, en ocasiones, de gran parecido a las piedras naturales. Los morteros, tapiales, adobes y hormigones se encuentran dentro de este tipo de piedras cuyo origen se localiza en Mesopotamia.

Se reporta que el primer mortero se trató de un mortero de barro de hace 10000 años en Çatal Hüyüc la región de Turquía (Mortimore, Marshall, Almond, Hollins, & Matthews, 2004), cuyo uso fue básicamente para revestimiento; mientras que los primeros hormigones fueron de barro y aparecieron en la zona de Macedonia hacia el 450 a.C. y usados para cementar estructuras edificadas mediante la colocación manual de los materiales conformaban los zócalos de las viviendas. Estos dos tipos de piedras artificiales se diferencian porque el mortero está formando por aglomerante, un árido (tamaño arena) y agua, mientras que los hormigones tienen, además un segundo tamaño de árido, la grava. Los áridos (tamaños arenas y grava) proceden de materiales que tienen forma de granos o que la adoptan por fragmentación mediante machaqueo y son de naturaleza sedimentaria, metamórfica y/o ígnea que debe estar limpia de arcilla y salitre. En cuanto a aglomerantes, estos son muy variados, siendo los más comunes la cal aérea que da origen a los morteros y hormigones hidráulicos (Varas, de Buergo, & Fort, 2007).

Fue en la década de los ‘80 que empezaron a fabricarse cementos activados alcalinamente para ser comercializados como cemento tipo F, es el caso de Finlandia bajo la marca Pyrament, así como el de los llamados “geocementos” de Ucrania (Davidovits, 2002; Forss, 1983).

La **Tabla 2**, muestra cronológicamente algunas referencias importantes en el desarrollo de activadores y cementos alcalinos.

Debido al gran atractivo comercial que representa el desarrollo de estos nuevos materiales, varias empresas han empezado a prestar especial atención en investigación relacionada a la obtención de nuevos productos para distintas aplicaciones en el mercado. Es el caso de empresas como Lone Star Industries (EU), Huls Troisdorf AG (Alemania)

y, en Francia, Geopolymere Sarl (Davidovits, 1991); asimismo existe una empresa australiana llamada Zeobond (Zeobond, 2012) que ya desarrolla productos como concretos y piezas prefabricadas haciendo uso de estos materiales bajo distintas marcas comerciales.

**Tabla 2. Historia bibliográfica de activación alcalina de cementos**

| Autor (es) | Año | Importancia |
|---|---|---|
| **Feret** | 1939 | Escoria usada para cemento |
| **Purdon** | 1940 | Combinaciones de escoria |
| **Glukhovsky** | 1959 | Fundamento teórico y desarrollo de cementos alcalinos |
| **Glukhovsky** | 1965 | Primer nombre de "cementos alcalinos" a causa de las sustancias naturales usadas como componentes. |
| **Davidovits** | 1979 | El término "Geopolímero" enfatiza una polimerización elevada |
| **Malinowski** | 1979 | Acueductos antiguos caracterizados |
| **Forss** | 1983 | Cemento F (escoria superplastificada) |
| **Langton y Roy** | 1984 | Materiales caracterizados de construcciones antiguas (Roma, Grecia) Patente |
| **Davidovits y Sawyer** | 1985 | Patente de "Pyrament" |
| **Krivenko** | 1986 | Tesis, Me2O-MeO-Me2O3-SiO2-H2O |
| **Malolepsy y Petri** | 1986 | Activación de escoria de melilita sintética |
| **Malek** | 1986 | Cemento de escoria para contenedores de desechos rediactivos |
| **Davidovits** | 1987 | Comparación de concretos antiguos y modernos |
| **Deja y Malolepsy** | 1989 | Resistencia a cloruros |
| **Causal** | 1989 | Desechos nucleares adiabáticos curados formados de mezclas alcalinas incluyendo la formación de zeolita |
| **Roy y Langton** | 1989 | Concretos análogos antiguos |
| **Majumdar** | 1989 | Activación de escoria-C12A7 |
| **Talling y Brandstetr** | 1989 | Escoria –activada |
| **Wu** | 1990 | Activación de cemento de escoria |
| **Roy** | 1991 | Ajuste rápido de cementos altivados |
| **Roy y Silsbee** | 1992 | Cementos activados |
| **Palomo y Glasser** | 1992 | CBC con metacaolín |
| **Roy y Malek** | 1993 | Cementos de escoria |
| **Glukhovsky** | 1994 | Antiguos, modernos y futuros concretos |
| **Krivenko** | 1994 | Cementos alcalinos |
| **Wang y Scrivener** | 1985 | Microestructura de escoria y escoria activada |

**Fuente:** (Villa García, 2013)

## 2.2 Antecedentes de la investigación

El término y concepto de geopolímero fue originalmente introducido como un nuevo material por Joseph Davidovits en 1978 (Davidovits, 1991). Se prepararon estos polímeros de silicatos de aluminio tridimensionales inicialmente a partir de desechos industriales, observándose que se formaban iones tetraédricos de $AlO_4$ y $Si_2O_4$ en la composición del nuevo material. Debido a que forman estructuras únicas de red de óxido tridimensional, las cuales se originan a partir de un fenómeno llamado policondensación inorgánica, los materiales geopoliméricos poseen varias características interesantes tales como alta resistencia, resistencia a la corrosión, resistencia al agua, resistencia a altas temperaturas, iones metálicos encapsulados, etc. (S. Zhang, Gong, & Lu, 2004). En la década de los 70's, Joseph Davidovits desarrolló una nomenclatura específica para los enlaces atómicos formados, haciendo una exploración exhaustiva de las distintas formas de aplicación que tendrían estos nuevos productos patentados por él mismo (Davidovits, 1988). A partir de entonces existen numerosos estudios que se han dedicado a optimizar la resistencia de estos materiales tratando de entender el mecanismo de geopolimerización para cada tipo.

Bernal estudió la evolución estructural de pastas producidas a partir de escoria granulada de alto horno y metacaolín activados con silicato alcalino, en donde se puede apreciar que la adición de metacaolín conduce al aumento del tiempo de fraguado total, reduce la liberación de calor y provee al material de una cantidad adicional de Al, afectando así el mecanismo de reacción general. El efecto es mucho mayor cuando el módulo de silicato es más alto, produciendo un ligero decremento en la resistencia mecánica final de los morteros pero un aumento significativo en el tiempo de fraguado, que es valioso en el desarrollo de aglutinantes de escoria activados alcalinamente, pues se sabe que a veces endurecen más rápidamente de lo deseable (Bernal, Provis, Rose, & Mejía de Gutierrez, 2011).

Jaydeep S. y Chakravarthy B. J. utilizaron un material alternativo como las cenizas volantes como material ligante en vez del cemento. Esta ceniza volante reaccionó con una solución alcalina de NaOH y silicato de sodio (a concentraciones de 3M, 5M, 7M y 9M) para formar un gel que se une a agregados finos y gruesos. Se intentó encontrar una mezcla óptima para el hormigón geopolimerizado y se prepararon cubos cuya resistencia fue determinada a los 7 y 28 días de curado. Reportan que cuando se compara con el

hormigón convencional resulta siendo mucho más ventajoso, económico y ecológico (Jaydeep & Chakravarthy, 2013).

En otro estudio, se investiga el efecto de $Al_2O_3$ y $SIO_2$ sobre el comportamiento de fraguado y las características de desarrollo temprano de la fuerza de los sistemas de $Na_2O$-$Al_2$ $O_3$-$SiO_2$-$H_2O$ curados a baja temperatura. También se exploró el desarrollo relacionado a la fase mineral y microestructural, analizando mezclas de geopolímeros con cantidades variables de $SiO_2$ y $Al_2O_3$ con proporciones molares $H_2O/Na_2O$ constantes preparadas, usando metacaolín activado por álcalis y curados a 40 °C por 72 horas.- Mediante técnicas de DRX (difracción de rayos X) y SEM-EDX (Microscopía electrónica de barrido – energía dispersiva de rayos X) se realizó la caracterización de los especímenes. Se determinó que el tiempo de fraguado de los geopolímeros (0.5, 1, 2, 4, 8, 24 and 72 h) está controlado principalmente por $Al_2O_3$ y que aumentaba al incrementarse la relación $SiO_2/Al_2O_3$. Sin embargo, la cantidad de Si parece jugar un papel importante en el posterior desarrollo de la fuerza, llegando a 23 MPa. El aumento de las relaciones molares de $SiO_2/AlO_3$ de hasta 3.4-3.8 es en gran parte responsable de las altas ganancias de resistencia observadas en etapas posteriores (P De Silva & Sagoe-Crenstil, 2008).

Con los años, los geopolímeros se han explotado como materiales de revestimiento de protección para el hormigón marino y las infraestructuras de transporte. Sin embargo, la fuerza de enlace entre el sustrato el hormigón y el material de reparación (Momayez, Ehsani, Ramezanianpour, & Rajaie, 2005) desempeñan un papel decisivo al seleccionar los geopolímeros como materiales de reparación. Las propiedades del concreto geopolimérico (CGP), incluyendo el módulo de elasticidad, la relación de Poisson y la resistencia a la tracción son similares a las del hormigón de cemento Portland ordinario. Esto muestra claramente la compatibilidad entre CGP y concreto CPO, además de que ambos pueden curar a temperatura ambiente (Nath & Sarker, 2014).

Los morteros geopoliméricos (MGPs) son reportados como más sustentables que los de cemento Portland ordinario debido a la baja energía requerida para su producción, registrando cantidades menores de emisiones de $CO_2$ (Duxson et al., 2007; Z. Zhang et al., 2014). Estudios han determinado que la producción de morteros u hormigones geopoliméricos basados en ceniza volante libera de 80 a 90% menos emisiones de $CO_2$ que sus homólogos de cemento Portland ordinario (Davidovits, 1994; Sommerfeld, Buys, Mengersen, & Vine, 2017).

En otro estudio, se reporta la influencia de las diferentes temperaturas de curado, contenido de calcio y distintos tipos de activadores alcalinos en morteros geopoliméricos (MGP's) elaborados a partir de residuos industriales y de agricultura, tales como escoria granulada de alto horno (GBFS), ceniza volante (FA) y ceniza de combustible de aceite de palma (POFA), de los cuales se prepararon tres tipos de mezclas usando soluciones activadoras de hidróxido de sodio con silicato de sodio, solo silicato de sodio y silicato de sodio con agua. La concentración de la solución de hidróxido de sodio fue de 8 molar (8M), con una proporción de líquido-aglutinante de 0.3, una relación de silicato-hidróxido de 3.0, una relación de aglutinante-agregado fino de 1.5 a diferentes temperaturas de curado de 27, 60 y 90 °C. Los resultados revelaron que los activadores alcalinos formaron un hidrato de calcio cristalino (CSH) que coexistió con gel amorfo. La mejora observada en cuanto a resistencia a la compresión y la microestructura de los geopolímeros a temperatura ambiente se atribuyó a la creación de CSH adicional con el aumento de contenido de calcio. (Ghasan Fahim Huseien, Mirza, Ismail, & Hussin, 2016).

Varios materiales cementantes suplementarios, como la escoria granulada de alto horno (GBFS), el metacaolín (MK) y la ceniza volante (FA) se utilizan comúnmente como materiales precursores en la elaboración de geopolímeros, debido a su fácil disponibilidad y a que las propiedades mecánicas que presentan resultan favorables (Fahim Huseien et al., 2017). Se ha informado que la FA con alto contenido de calcio también es un ingrediente adecuado para producir buenos MGP's. La mezcla de geopolímero con ceniza volante de alto contenido de calcio se puede curar a temperatura ambiente mediante la reacción del contenido de calcio. Sin embargo, la muy lenta geopolimerización de la ceniza volante con alto contenido de calcio sin aditivos en condiciones ambientales es responsable de su baja fuerza de unión. En este sentido, el cemento Portland ordinario (CPO) como aditivo mejora la fuerza de geopolímeros de ceniza volante con alto contenido de calcio. Además de la formación de hidrato de silicato de calcio, el calor generado a partir del cemento Portland y el agua ayudan al proceso de geopolimerización y mejora la fuerza de unión. Al agregar cemento Portland a 25 °C, se fabricó un geopolímero rico en calcio con una resistencia a la compresión de 65 MPa (Pangdaeng, Phoo-ngernkham, Sata, & Chindaprasirt, 2014).

En otros trabajos, se estudiaron los efectos del uso de metacaolín en lugar de cemento sobre las propiedades mecánicas de morteros, alta temperatura, reacción álcali-sílice, resistencia al sulfato, capacidad de absorción y permeabilidad. En el estudio, 0, 5, 10, 15

y 20% de cemento fue reemplazado por metacaolín en peso para diseñar cinco tipos diferentes de mortero. Se determinaron las resistencias a la compresión y flexión de 1, 3, 7, 28, 56, 90 y 180 días y la capacidad de absorción de 28 días. El mortero control para uso comparativo compuesto solamente por cemento y arena estandarizada, mostró un valor de 48 MPa de resistencia a la compresión a los 28 días y de 10 MPa de resistencia a la flexión en el mismo tiempo de evaluación (Arel & Anuk, 2014).

En el 2018 se realizaron ensayos a especímenes geopoliméricos desarrollados a partir de la ceniza del volcán Ubinas, cuyas propiedades físicas y mecánicas muestran buenos resultados, a partir de los cuales se puede afirmar que los nuevos materiales geopoliméricos obtenidos están provistos de gran potencial pues presentan elevadas resistencias a los 28 días de fabricadas con hidróxido de sodio como activador alcalino en concentraciones de 6, 8, 10, 12, 14 y 16 molar, obteniéndose resistencias desde 27 hasta 64 MPa. Esta investigación aporta significativamente a futuros estudios sobre los recursos de la región sur del Perú, generando expectativas alentadoras en cuanto a la obtención de morteros geopoliméricos con mejores características como material para la construcción (J. Camacho, 2018).

Actualmente, existen estudios que proporcionan una visión general sobre el desarrollo, progreso reciente y perspectivas futuras para la obtención de morteros geopoliméricos (MGP's) en el sector de la construcción **(Tabla 3)**, en los cuales se enfatiza la viabilidad de explorarlos como materiales de reparación efectivos para la protección del concreto deteriorado y la estructura en general. También se aborda el potencial que tienen los geopolímeros como materiales de construcción sostenibles en cuanto a ahorro de energía y emisiones de $CO_2$ reducidas, para su uso en entornos hostiles; mencionando el uso efectivo de materiales reciclables. Los resultados obtenidos acerca de la durabilidad del geopolímero en términos de resistencia de la unión entre el material de reparación y el concreto deteriorado se presentan mediante el uso de pruebas de tracción y corte inclinado. De igual manera, se afirma que el rendimiento que presentan los geopolímeros como materiales de reparación puede destacarse por su fuerza de adhesión (Fahim Huseien et al., 2017).

**Tabla 3.** Revisión de metodologías para la obtención y evaluación de resistencia a la compresión de geopolímeros

| Paper/Tesis | Autor(es) | Materia Prima | Agregado | Solución Alcalina | Molaridad | Temperatura de curado | Condiciones de curado | Resistencia compresión |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Reactivity of volcanic ash in alkaline médium, microstructural and strength characteristics of resulting geopolymers under different synthesis conditions (2007) | Jean Noel Yankwa Djobo, Antoine Elimbi, Hervé Kouamo Tchakouté, Sanjay Kumar | Ceniza volcánica | - | NaOH | 8 M, 10 M y 12 M | 27, 60 y 80 °C | Curado en estufa por 24h, desmoldado y envuelto en plástico hasta el ensayo | 28 MPa a 80 °C |
| Microestructure of geopolymer materials base don fly ash (2006) | Frantisek Skvara, Lubomir Kopecky, Jiri Nemecek, Zdenek Bittnar | Ceniza volante | Arena silicia (1:2 a 1:4) | NaOH | 6M a 10M | 60 – 90 °C | 4 a 16 horas de curado | 63 MPa a 360 días |
| Preparation and characterisation of fly ash based | J. Temuujina, A. van Riessen, K.J.D. MacKenzie | Ceniza volante | Arena de albañilería (10%, 20%, 30%, 40%, 50%) | NaOH y $Na_2SiO_3$ | 14 M | 70 °C y temperatura ambiente | Moldes plásticos cilíndricos de 25 mm de diámetro y 50 mm de altura. | Hasta 60 MPa |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| geopolymer mortars (2010) | | | | | | | Durante 24 h a 70°C, luego a T° ambiente por 3 días seguido del desmolde. | |
| Efect of sodium hydroxide concentration on fresh properties and compressive strenght of self-compacting geopolymer concrete (2013) | Fareed Ahmed Memon, Muhd Fadhil Nuruddin, Sadaqatullah Khan, Nasir Shafiq, Tehmina Ayub | Ceniza volante | Arena de río | NaOH y $Na_2SiO_3$ | 8 M a 14 M | 70 °C | Curado en estufa por 48 h | 45 MPa |
| Mechanical and microstructural properties of the fly-ash based geopolymer paste and mortar (2012) | Radamor Zejak, Irena Nikoli, Dragoljub Ble, Vuk Radmilovi, Velimir Radmilovi | Ceniza volante | Arena caliza | NaOH y $Na_2SiO_3$ (1; 1.5 y 2) | 7 M, 10 M y 13 M | 65 °C | 65 °C por 58h | Los morteros superan en 58.7 % en resistencia a la compresión a las pastas. |
| Mechanical properties and durability of volcanic ash based geopolymer mortars (2016) | Jean Noël Yankwa Djobo, Antoine Elimbi, Hervé Kouamo | Ceniza volcánica | Arena de río (2:1) | NaOH y $Na_2SiO_3$ | 12 M | 27 °C y 80 °C | Las de 80°C se desmoldaron a 24 h; las de 27°C, después de 7 días porque aún no habían endurecido. Se | A 27°C, 20.5 MPa a 28 días. A 80°C, 37.6 MPa a 90 días. |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Tchakouté, Sanjay Kumar | | | | | | mantuvieron en bolsas de plástico hasta la prueba. | |
| Strength, durability and micro-structural aspects of high performance volcanic ash concrete (2007) | K.M.A. Hossain, M. Lachemi | Cemento Portland, ceniza volcánica (0% - 20%) | Arena de río | $H_2O$ | - | 27 °C | Sumergidos en agua por 4 semanas y luego a temperatura ambiente | Hasta 86 MPa con el 5% de agregado |
| Combination formation in the reinforcement of metakaolin geopolymers with quartz sand (2017) | Qian Wan, Feng Rao, Shaoxian Song, Diana F. Cholico-Gonzáles | Metacaolín | Area de cuarzo, arena de rutilo | NaOH | 12 M | 60 °C | Curado por 6 h. | 31.2, 52.2 y 41.5 MPa |
| Characteristic study of geopolymer fly ash sand as replacement to natural river sand (2017) | U.S. Agravwal, S.P. Wanjari, D.N. Naresh | Ceniza volante | Ceniza volante y arena de río | NaOH, $Na_2SiO_3$ | 6 M, 8 M, 10 M y 12 M | 25 °C | Ensayos a 28 días. | 23.94 MPa y 22.406 MPa |

**Fuente:** Elaboración propia

## 2.3 Bases Teóricas

### 2.3.1 Cemento Portland

El cemento es un polvo de color gris, más o menos verdoso, de gran valor como material estructural, a consecuencia de alcanzar dureza pétrea después de ser amasado con agua, es también un aglomerante hidráulico por excelencia (Janet et al., 2011). Es usado como aglomerante, pues posee la capacidad de unir a los demás componentes del concreto y también de formar la pasta. Para que ello suceda se produce un proceso de hidratación con agua (Sotil Levy & Zegarra Riveros, 2015).

El cemento Portland es el producto obtenido de la pulverización del clinker resultante de la calcinación hasta una fusión incipiente de una mezcla debidamente dosificada de materiales silíceos, calcáreos y férricos, a la que se le adiciona yeso hidratado. Está compuesto principalmente por cal (CaO), sílice (SiO2), alúmina ($Al_2O_3$) y óxido de hierro ($Fe_2O_3$). Debido a que son pocas las veces en que se puede encontrar un cemento se encuentra en forma natural, se hace necesario mezclar sustancias minerales como calizas por el aporte en cal y las arcillas por el alúmina y óxido de hierro (Gutiérrez de López, 2003; NTP 334.001, 2001)

En la **Tabla 4** se muestra la composición del clinker.

**Tabla 4. Composición del clinker Portland.**

| Componente | Fórmula Química | Porcentaje |
|---|---|---|
| **Silicato tricálcico** | $3CaO{\cdot}SiO_2$ | 36% |
| **Silicato bicálcico** | $2CaO{\cdot}SiO_2$ | 33% |
| **Aluminato tricálcico** | $3CaO.\ AI_2O_3$ | 21% |
| **Otros** | - | 10% |

**Fuente:** (Saavedra Vera, 2011).

Bajo el rubro de otros componentes se encuentran: óxido de fierro ($Fe_2O_3$), óxido de magnesio (MgO), azufre en forma de óxido cálcico (Saavedra Vera, 2011).

El cemento se caracteriza por presentar propiedades de adherencia y cohesión, haciendo posible la unión de todos los fragmentos minerales que lo conforman, dándose un proceso constante de naturaleza química ("ASOCRETO - Asociación Colombiana de Productores de Concreto", 2009). Otras propiedades importantes de este material son las de fraguado

rápido y endurecimiento más lento, buena adherencia a otro tipo de materiales, y buena resistencia en general (ciclos humedad-sequedad, variaciones de temperatura, entre otros) (Crespo Escobar, 2009).

#### 2.3.1.1 Proceso productivo del cemento Portland

La Federación Interamericana del Cemento (2009), indica que el proceso de fabricación del cemento comprende 10 etapas principales. Estas pueden apreciarse en la **Figura 1**:

1. **Extracción de materias primas:** El proceso de fabricación del cemento se inicia con la explotación de los yacimientos de materia prima, en tajo abierto. El material resultante de la voladura es transportado en camiones para su trituración, los mismos que son cargados mediante palas o cargadores frontales de gran capacidad (Saavedra Vera, 2011). Durante esta etapa se realiza la extracción de la roca caliza en la cantera, constituyéndose como la principal materia prima para la elaboración del cemento Portland. A partir de procedimientos que implican el uso de explosivos, se obtienen piedras de gran tamaño que serán transportados por fajas o camiones hasta la zona de trituración (Federación Interamericana del Cemento, 2009).

2. **Triturado:** Mediante dos trituradoras se reducen las rocas hasta alcanzar un tamaño apropiado para su adecuación en las siguientes etapas. Esta caliza triturada de calidad controlada, se dirige por cintas a un stock llamado escombrera. En la escombrera se extrae la piedra caliza por cinta y es conducida hacia las tolvas de molino de materia prima (Federación Interamericana del Cemento, 2009).

3. **Pre-homogeneización y molienda:** La caliza se muele junto con otros componentes minoritarios para formar un polvo llamado harina cruda. En esta etapa los sistemas de muestreo y los posteriores análisis con equipos de alta tecnología juegan un rol fundamental, puesto que permiten mantener las especificaciones de calidad bajo control. La harina cruda obtenida, es transportada a los silos donde es homogeneizada y posteriormente transportada al horno (Federación Interamericana del Cemento, 2009).

4. **Pre-calentamiento:** La harina cruda ya homogeneizada, ingresa por la parte superior de la torre de intercambio de calor y desciende por la misma iniciándose los

procesos de deshidratación y descarbonatación (Federación Interamericana del Cemento, 2009).

5. **Pre-calcinación**: En esta etapa el material baja en contracorriente con los gases calientes del horno, produciéndose la primera transformación llamada pre-calcinación (Federación Interamericana del Cemento, 2009).

6. **Clinkerización en horno rotatorio:** El material pre-calcinado ingresa al horno rotatorio, en el cual la temperatura asciende hasta alcanzar los 1450 °C, generándose las reacciones químicas más importantes en el crudo y la formación del clinker, que es el material básico para la producción de cemento. Durante esta se producen las reacciones de formación de los cuatro componentes principales del clinker tales como: Silicato tricálcico ($C_3S$), silicato dicálcico ($C_2S$), aluminato tricálcico ($C_3A$), y ferroaluminato tetracálcico ($C_4AF$).

7. **Enfriamiento y almacenamiento:** El clinker que sale del horno es enfriado rápidamente con el aire frío para bajar su temperatura a 1000 °C asegurando el estado vítreo. Posteriormente, el clinker frío se almacena en un lugar adecuado denominado "parque del clinker" para su uso.

8. **Mezcla:** El material es extraído del parque del clinker para llevar a cabo un proceso de mezcla, y seguidamente es transportado a los silos que alimentan los molinos de cemento.

9. **Molienda de cemento:** Hasta este lugar llegan el clinker, el yeso y el componente mineral adecuado a la obtención del cemento portland. La molienda de clinker para cemento es uno de los procesos principales y, al mismo tiempo, el final de las operaciones tecnológicas en la fabricación del cemento. La manera como se realice esta etapa es decisiva para la calidad del cemento. Durante el proceso de molienda, el producto molido debe cumplir ciertos estándares de granulometría y obtener con ello las mejores condiciones para los procesos de endurecimiento.

10. **Almacenado en silos:** El cemento se almacena en las torres denominadas silos, los cuales permiten alimentar las embolsadoras automáticas y el despacho a granel.

**Figura 1. Etapas de la fabricación del cemento Portland.**

**Fuente:** (Federación Interamericana del Cemento, 2009)

Las tres etapas más importantes del proceso son: obtención y adecuación de materiales de partida, producción del Clinker, y molienda y mezcla del Clinker (Benhelal, Zahedi, Shamsaei, & Bahadori, 2013), ya que influyen ampliamente en el producto final. Durante la etapa de pre-calentamiento de la piedra caliza o cal con arcilla, se producen nódulos duros de clinker que luego se muelen con un poco de yeso mediante molienda de bolas.

El proceso de cocción consume una cantidad considerable de carbón o de petróleo como combustible. Las consecuencias medioambientales del proceso están relacionadas con el deterioro rápido del entorno de los yacimientos de la materia prima, tales como la producción de polvo durante el transporte, la generación de ruido durante la extracción de la cantera y del procesamiento de la materia prima del cemento (Fahim Huseien et al., 2017).

La liberación de cantidades significativas de $CO_2$, ocurre en dos etapas: a través de la quema de combustible para producir las altas temperaturas del horno rotatorio; y a través de una reacción química de calcinación que ocurre cuando la piedra caliza se calienta. Incluso las plantas más eficientes aún liberan 60 por ciento o más de $CO_2$ a partir de esta reacción química inevitable. La molienda en la etapa de clinker que consume una cantidad significativa de energía eléctrica es otra preocupación ambiental importante (Fahim Huseien et al., 2017).

Innegablemente, la durabilidad del CPO está relacionada con las propiedades de sus componentes que, entre otros, son alrededor de 60-65% CaO, mientras que su producto de hidratación contiene aproximadamente 25% de $Ca(OH)_2$. En la superficie, la evolución del $CO_2$ al reaccionar con el $Ca(OH)_2$ conduce a una rápida erosión del hormigón o morteros basados en CPO. El agrietamiento y la corrosión de CPO afectan significativamente los ciclos de vida útil, durabilidad, vida de diseño y seguridad del producto. Dichos inconvenientes notables del CPO persuaden a los investigadores a encontrar un nuevo aglutinante como una alternativa al tradicional CPO simplemente para lograr sostenibilidad ambiental y garantizar la durabilidad de las estructuras (Fahim Huseien et al., 2017).

Todos los tipos de cementos se clasifican según las resistencias basadas en la medición de la energía de disociación de enlace. La energía de disociación de enlace es la cantidad de energía que se requiere para fracturar o romper un enlace químico y, a menudo, es utilizada para medir la resistencia en un enlace químico. La fuerza de los enlaces Si-O es relativamente alta (energía de disociación de ~ 452 KJ/mol) y puede proporcionar la estabilidad térmica y la resistencia química de la mayoría de los compuestos de silicato. Al unir el silicato con el oxígeno para formar enlaces Si-O-Si, los grupos tetraédricos pueden polimerizarse. El enlace Si-O-Si tiene una energía de disociación de 191 kcal / mol a 25 ° C y el enlace C - C tiene una energía de disociación de 145 kcal/mol. La subclase N se refiere a cementos con desarrollo de resistencia normal, siendo los cementos de endurecimiento rápido los de clase R. Cuanto mayor sea la energía de disociación del enlace, más exotérmica será la reacción, lo que dará como resultado tiempos de curado más rápidos (Fitzpatrick- et al., 2015).

#### 2.3.1.2 Tipos de Cemento Portland

Hay diferentes tipos de cemento Portland, la norma ASTM C-150 los clasifica en 5 grupos:

- Tipo I: Cemento Portland común, apto para toda obra que no requiera cementos con requisitos especiales. (ASTM, 2017).
- Tipo II: Cemento Portland de moderado calor de hidratación y moderada resistencia a los sulfatos, con un contenido máximo de 8% de $C_3A$*. (ASTM, 2017).
- Tipo III: Cemento Portland de alta resistencia inicial (ASTM, 2017).

- Tipo IV: Cemento Portland de bajo calor de hidratación, con contenidos máximos de 35% de $C_3S$ y 7% de $C_3A$* (ASTM, 2017).
- Tipo V: Cemento Portland resistente a los sulfatos, con un contenido máximo de 5% de $C_3A$* y la suma de $C_4AF$* + $2C_3A$*, menor o igual a 20% (ASTM, 2017).

*Cuando los compuestos son expresados como, C = CaO, S = $SiO_2$, A = $Al_2O_3$, F = $Fe_2O_3$. Por ejemplo, $C_3A = 3CaO \cdot Al_2O_3$ (ASTM, 2017).

#### 2.3.1.3 Propiedades del Cemento

En general, el cemento está provisto de una serie de propiedades, las cuales se describen a continuación (Saavedra Vera, 2011):

**a) Finura**

La finura de molido o de molturación en los materiales, se aprecia por medio de los análisis granulométricos, que consiste en hacerlos pasar a través de tamices, cribas o zarandas, apreciando los porcentajes en peso que atraviesan el material. El grado de finura es una propiedad muy importante, porque se ha determinado que el agua no actúa sino en una profundidad de 0.1mm de los granos, y como el agua es indispensable para el fraguado, se comprende la necesidad de que el cemento posea la finura conveniente a fin de que la película de agua que rodea cada grano lo atraviese. Las especificaciones usuales señalan que más del 78% en peso del material cementante pase la malla N° 200 (Saavedra Vera, 2011).

**b) Firmeza**

Es la propiedad que exige que el cemento no se deforme o desintegre después del fraguado por variación del volumen y en el caso especial del cemento por aumento del volumen (Saavedra Vera, 2011).

**c) Peso Específico**

El cemento debe tener un peso específico superior a 3.10 $g/c^3$ (Saavedra Vera, 2011).

#### 2.3.1.4 Comercialización de Cemento en el Perú

De acuerdo al reporte estadístico elaborado por la Asociación de Productores de Cemento del Perú (ASOCEM), el consumo de cemento compuesto por la suma del Despacho

Nacional + Importaciones, alcanzó las 10 168 mil TM el 2017, mostrando una variación positiva del 0.2% con respecto al del año 2016 **(Figura 2)**. Este resultado se debe al incremento de las importaciones de cemento que obtuvo un 20.9% de crecimiento al término del año 2017 (ASOCEM, 2017).

**Figura 2. Consumo de Cemento Peruano 2010 - 2017 (TM).**

**Fuente:** (ASOCEM, 2017)

### 2.3.2 Pasta de Cemento

La mezcla de un aglomerante y agua se denomina pasta y se dice de consistencia normal cuando la cantidad de agua de amasado es igual a los huecos del aglomerante suelto. Si la cantidad de agua es menor, la pasta será seca; si es mayor, será fluida, llamándose lechada cuando se amasa con mucha agua (Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Agrícola de Ciudad Real, 2005).

### 2.3.3 Morteros

Los morteros son mezclas obtenidas con un aglomerante, arena y agua, que sirven para unir las piedras o ladrillos que integran las obras de fábrica y para revestirlos con enlucidos o revocos. Se denominan según sea el aglomerante, así se tienen morteros de yeso, de cal o de cemento. Principalmente es utilizado para enlucidos y como pegamentos para bloques y cerámicas (Coppiano Gutiérrez, 2016).

### 2.3.3.1 Tipos y usos de morteros

Los morteros se denominan según sea el aglomerante. Así se tienen morteros de yeso, de cal o de cemento. Los morteros bastardos son aquéllos en los que intervienen dos aglomerantes, como por ejemplo, yeso y cal, cemento y cal, etc.

De acuerdo a su endurecimiento, los morteros pueden ser: Aéreos, que son aquellos que endurecen por pérdida de agua durante el secado al aire y fraguan lentamente por un proceso de carbonatación; mientras que otro tipo de morteros son los hidráulicos, que endurecen bajo el agua debido a que su composición les permite desarrollar resistencias iniciales relativamente altas (Gutiérrez de López, 2003). En la **Tabla 5** se muestran los diferentes tipos de morteros de acuerdo a la proporción de sus componentes y las resistencias estimadas para cada uno.

**Tabla 5. Usos de morteros y sus resistencias**

| Características de Morteros de Cemento y Agregado Fino | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| **Tipo** | **Proporción de volumen** | | **Kg cemento por $m^3$ de mortero** | **Empleo preferente** | **Resistencia $kg/cm^2$** |
| | **Cemento** | **Arena** | | | |
| **Ricos** | 1 | 1 | 800 | Bruñidos y revoques impermeables. | 160 |
| | 1 | 2 | 600 | Enlucidos, revoque de zócalos, corrido de cornisas | |
| | 1 | 3 | 450 | Bóvedas tabicadas, muros muy cargados, enlucidos de pavimento, enfoscados. | |
| **Ordinarios** | 1 | 4 | 380 | Bóvedas de escalera, tabiques de rasilla. | 130 |
| | 1 | 5 | 300 | Muros cargados, fábrica de ladrillos, enfoscados. | 98 |
| **Pobres** | 1 | 6 | 250 | Fábricas cargadas. | 75 |
| | 1 | 8 | 200 | Muros sin carga. | 50 |
| | 1 | 10 | 170 | Rellenos para solado. | 30 |

**Fuente:** (Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Agrícola de Ciudad Real, 2005).

### 2.3.5 Agregado para morteros

#### 2.3.5.1 Agregado fino

El agregado fino consiste en arena natural o arena de piedra triturada. Debe ser duro, duradero y limpio y estar libre de materia orgánica, etc. El agregado fino no debe contener ninguna cantidad apreciable de bolas de arcilla e impurezas dañinas tales como álcalis, sales, carbón, vegetación podrida, etc. El contenido de limo no debe exceder el 4% (Jaydeep & Chakravarthy, 2013).

Generalmente la arena de río es usada como agregado fino por el componente inerte de MGPs. La gravedad específica de la arena de río es de 2.51 y el tamaño máximo es de 4.75 mm. De acuerdo con el ensayo de la norma ASTM C128, la absorción de agua de la arena del río es de aproximadamente 1.48% (ASTM C128/1997) (Fahim Huseien et al., 2017). La granulometría del agregado fino comprende los límites de la **Tabla 6**.

**Tabla 6. Granulometría del agregado fino**

| Tamiz | Porcentaje que pasa |
|---|---|
| 9,5 mm (3/8 pulg) | 100 |
| 4,75 mm (No. 4) | 95 a 100 |
| 2,36 mm (No. 8) | 80 a 100 |
| 1,18 mm (No. 16) | 50 a 85 |
| 600 μm (No. 30) | 25 a 60 |
| 300 μm (No. 50) | 05 a 30 |
| 150 μm (No. 100) | 0 a 10 |

**Fuente:** (NTP 400.037, 2014)

### 2.3.6 Geopolímero

Los geopolímeros son una nueva clase de material conformado por aluminosilicatos álcali-activados formados bajo una reacción geosintética alcanzada a bajas temperaturas. Los geopolímeros han despertado el interés a la comunidad científica, y al público en general, pues exhiben excelentes propiedades como resistencia química, térmica y mecánica, además de tener una amplia variedad de aplicaciones potenciales (Davidovits, 1991). Estas propiedades se deben básicamente a la estructura de cada material, que pueden adaptarse a diferentes aplicaciones, por lo que la geopolimerización podrá verse afectada por características como la composición mineralógica, relación sílice/alúmina,

concentración de álcalis, morfología del reactivo, superficie específica, entre otras (Xu & Van Deventer, 2000).

Para la producción de geoolímeros se pueden emplear diversas materias primas. Algunas comúnmente utilizadas son la escoria de alto horno, la escoria granulada de fósforo, la escoria de acero, escorias no ferrosas, la ceniza volante de carbón, el humo de sílice, el metacaolín, entre otras. Para que las propiedades del geopolímero sean mejores se busca que las materias primas o precursor sean vítreos en la mayor medida posible y que tengan un tamaño de partícula pequeño para que haya mayor área superficial.

#### 2.3.6.1 Activación alcalina

La activación alcalina de materiales consiste en un proceso que, a concentraciones altamente alcalinas y cortos periodos de curado, permite obtener materiales con buen comportamiento cementante (Škvára, Jílek, & Kopecký, 2005).

Los activadores alcalinos son aquellos cuya función es acelerar la solubilización de la fuente de aluminosilicato, así como de ayudar en la formación de hidratos estables de baja solubilidad y promover la formación de una estructura sólida. Tales activantes pueden tratarse de compuestos alcalinos o alcalinotérreos, entre ellos: hidróxidos (ROH, R $(OH)_2$), sales de ácido débil ($R_2CO_3$, $R_2S$, RF), sales de ácido fuerte ($Na_2SO_4$, $CaSO_4.2H_2O$) y sales silícicas del tipo $R_2O(n)$ $SiO_2$ donde R es un ión alcalino del tipo Na, K o Li. Cabe mencionar que los activadores más empleados son el NaOH o KOH, silicatos y carbonatos (Rodríguez, Mejía de Gutiérrez, Bernal, & Gordillo, 2009).

Existen varias fuentes que pueden ser empleadas como insumo para la activación alcalina. Entre las fuentes principales se encuentran los minerales de composición básica de sílice y alúmina en estado amorfo, que le permite adquirir una alta reactividad (Davidovits, 2002). Se incluyen como posibles fuentes residuos industriales: cenizas volantes, diferentes tipos de escorias, arcillas, así como materiales con altos contenidos de calcio (escorias siderúrgicas) los cuales pueden conferir mejoras en el desempeño mecánico de los materiales (C. K. Yip, Lukey, Provis, & van Deventer, 2008; C. K. Yip, Lukey, & Van Deventer, 2005).

Así mismo, diversos autores han demostrado que la activación alcalina de materiales silicoaluminosos de estado amorfo o de fase vítrea con disoluciones bajo condiciones

fuertemente alcalinas y tras un breve periodo de curado a baja temperatura (50-100ºC), produce un material con buenas propiedades cementantes (Fernández-Jiménez & Palomo, 2005; Škvára et al., 2005).

La formación de geopolímero implica las mezclas de fases sólidas y líquidas como se indica en la **Figura 3.** En esta mezcla, el sólido es la forma en polvo de fuentes de silicato de alúmina con una proporción adecuada de sílice altamente reactivo más alúmina, mientras que el líquido es altamente solución alcalina concentrada.

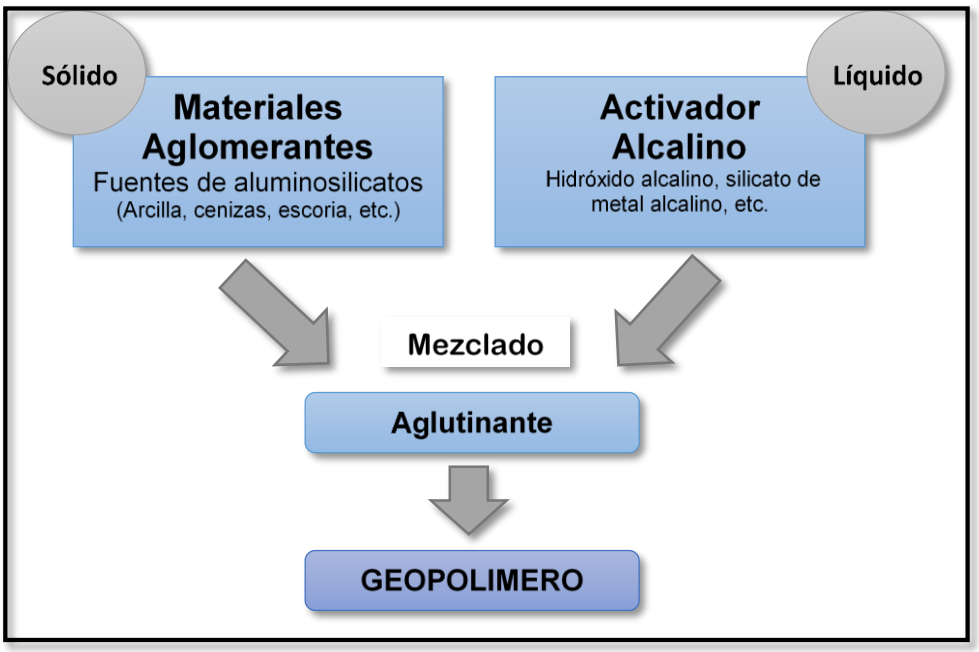


**Figura 3. Diagrama esquemático de la formación de geopolímero**

**Fuente:** (C. K. Yip et al., 2005)

### 2.3.6.2 Mecanismo de geopolimerización

La Geopolimerización consiste en un proceso exotérmico que se lleva a cabo a través de oligómeros (dímeros, trímeros) que proporcionan las estructuras necesarias para la construcción de la macromolécula tridimensional (Davidovits, 1988). Los pasos básicos de la geopolimerización implican:

1. Disolución de sólidos de óxido de alumino-silicato en solución MOH (M: álcali metal). Esta etapa es fundamental, cumpliendo una doble función: En primer lugar, las especies que forman polisialatos son liberadas de los materiales iniciales de forma similar a como sucede en la formación de los precursores de la zeolita (Grutzeck & Siemer, 1997) (Duxson, y otros, 2007). En segundo lugar, la disolución activa la

superficie y las reacciones de unión toman lugar contribuyendo de forma significativa a la resistencia final del material.

Bajo condiciones alcalinas, los aluminosilicatos adquieren una gran reactividad, y en términos generales se cree que el proceso inicia gracias a la participación de iones hidroxilo. Se ha encontrado que a mayor cantidad de iones hidroxilo se facilita más la disolución de diferentes especies de silicato y aluminato, lo que a su vez origina la polimerización adicional (Davidovits J. , Long term durability of hazardous toxic and nuclear waste disposals., 1988a).

Por el contrario, si las condiciones alcalinas son muy altas (superiores al 30% en moles de $Na_2O$) la conectividad de los aniones de silicato puede ser reducida, resultando por lo tanto en una pobre polimerización. Algunos estudios han señalado incluso que el grado de disolución es mayor cuando se usa NaOH en lugar de KOH, debido al tamaño más pequeño del $Na^+$ que puede estabilizar mejor los monómeros y dímeros de silicato presentes en la solución, mejorando la velocidad de disolución de minerales (Xu & van Deventer, 2000).

2. La difusión o el transporte de complejos de Al y Si disueltos desde la superficie de la partícula al espacio inter-partícula.

3. La formación de una fase de gel resultante de la polimerización entre la solución de silicato añadido y los complejos de Al y de Si.

4. El endurecimiento de la fase de gel (Xu, Geopolymerisation of aluminosilicate minerals, 2001).

#### 2.3.6.3 Estructura de los geopolímeros

En términos generales los geopolímeros consisten en una red de sialatos, los cuales están conformados por moléculas tetraédricas de $SiO_4$ y $AlO_4$, enlazados de modo alterno con átomos de oxígeno compartidos; el conocimiento de su modelo estructural aun representa un desafío, por lo que el mecanismo exacto de su configuración y endurecimiento se encuentran en investigación (Álvarez, 2010).

Los anillos o cadenas de polímeros con $Si^{4+}$ y $Al^{4+}$ en número de coordinación IV con oxígeno se denominan polisialatos, y de acuerdo con su estructura pueden ser expresados

mediante la siguiente fórmula (Rodriguez Martinez, Mejia de Gutierrez, Bernal, & Gordillo, 2009) (Davidovits J. , 1991)

$$Mn\text{-}((SiO_2)z - AlO_2)nwH_2O$$

Donde:

M hace referencia a un catión monovalente ($K^+$ o $Na^+$)

n es el grado de policondensación.

z puede tomar valores entre 1, 2 o 3, de este modo si z=1 es de tipo polisialato, si z=2 la red será poli (sialato-siloxo), y si vale 3, la red será poli (sialato-disiloxo), como se muestra en la **Figura 4.**

Es importante destacar que los iones que poseen carga positiva denominados cationes, tales como el $Na^+$, $K^+$ o $Ca2^+$, cumplen un rol fundamental al neutralizar la carga negativa del $Al^{3+}$ y se alojan en las cavidades de la estructura (Rodriguez Martinez, Mejia de Gutierrez, Bernal, & Gordillo, 2009).

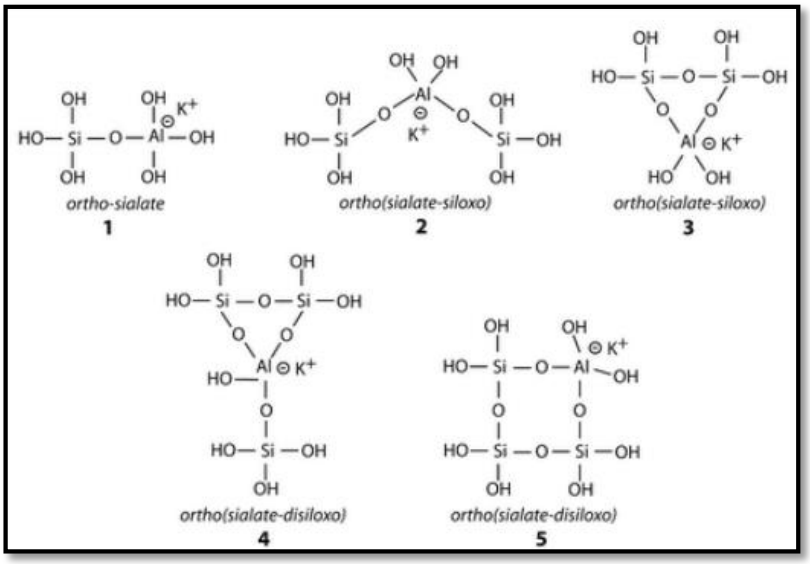


**Figura 4. Representaciones de Polisialatos**

**Fuente:** (Villamor Lora, 2016)

### 2.3.6.4 Propiedades de los geopolímeros

Las propiedades y microestructura de los geopolímeros, están fuertemente asociadas a la naturaleza de los materiales de partida incluso aunque las características macroscópicas de los geopolímeros basados en alumino-silicato parezcan similares, debido a que

presentan la misma fase de gel y unión Si-Al. Dicha influencia de los materiales de partida en la homogeneidad de la microestructura de los geopolímeros ha sido demostrada mediante análisis microestructurales, encontrándose además que puede afectar propiedades como la conductividad térmica, y la resistencia a la comprensión. Ésta última es fundamental si se tiene en cuenta que es extensamente empleada como herramienta para evaluar el éxito de la geopolimerización, y que es un indicador de la utilidad de los materiales en diferentes aplicaciones en la industria de la construcción (Komnitsas & Zaharaki, 2007).

La temperatura que se requiere para el proceso de geopolimerización es de alrededor de 25 a 80ºC, mientras que la presión no es tan fundamental, aunque a veces se requiere, en especial en aquellos casos en los cuales la porosidad del producto final deba ser más baja de lo normal. En ocasiones y según sean las condiciones del sistema, la integridad estructural y la fuerza se desarrollan en un periodo muy corto de tiempo (6 minutos), sin embargo, por lo general el 70% de la resistencia a la compresión final que se desarrolla ocurre en un tiempo de 4 horas de fraguado (Davidovits J. , Properties of geopolymers cements, 1994) (Palomo & Glasser, Chemically-bonded cementitious materials based on metakaolin, 1992). De este modo, la resistencia a la comprensión final a 28 días puede llegar a alcanzar entre 70 y 100 MPa (Hardjito, Wallah, & Rangan, Research into engineering properties of geopolymer concrete) (Hermann, Kunze, Gatzweiler, Kieig, & Davidovits, 1999).

Las propiedades de los materiales para la obtención de GPMs pueden observarse en la **Tabla 7**, donde se diferencian los diferentes tipos de morteros desarrollados en investigaciónes durante los últimos años.

#### 2.3.6.5 Materiales Geopoliméricos

Para la fabricación de morteros geopoliméricos es necesario el uso de materiales precursores que en su composición contengan sílice y alúmina, para luego ser activados alcalinamente. Varios materiales “cementantes” se utilizan comúnmente como fuentes precursores de geopolímeros.

Las puzolanas son materiales que poseen contenido de sílice y/o alúmina en su composición química, adquiriendo comportamiento cementante al entrar en contacto con cal y agua, convirtiéndose en materiales fundamentales para la producción de cemento

Portland (Coppiano Gutiérrez, 2016). Entre las puzolanas de origen natural se encuentran diferentes tipos de cenizas y tobas, provenientes de actividades volcánicas. Las puzolanas artificiales son productos o sub productos de actividades industriales, en este grupo se encuentran las cenizas de combustible, arcillas cocidas, escorias molidas de alto horno, ceniza de cascarilla de arroz, entre otras (Indian Institute of Science, 1987) **Figura 5**.

**Tabla 7. Propiedades de diferentes GPM's**

| Materiales | Materiales de Morteros Geopoliméricos con alto contenido de calcio | Materiales de Morteros Geopoliméricos con alto contenido de sílice | Materiales de Morteros Geopoliméricos con alto contenido de alúmina |
|---|---|---|---|
| Aglutinante | EGAH, CVAC | CV, CCA | MC |
| Tiempo de curado | Muy corto | Muy largo | Medio |
| Trabajabilidad | Bajo | Muy alto | Alto |
| Resistencia temprana | Muy alto | Bajo | Medio |
| Durabilidad | Alto | Muy alto | Alto |
| Temperatura de curado | Ambiente | Estufa | Estufa |
| Calidad de reparación | Muy alto | Bajo | Medio |

**Fuente:** (Fahim Huseien et al., 2017)

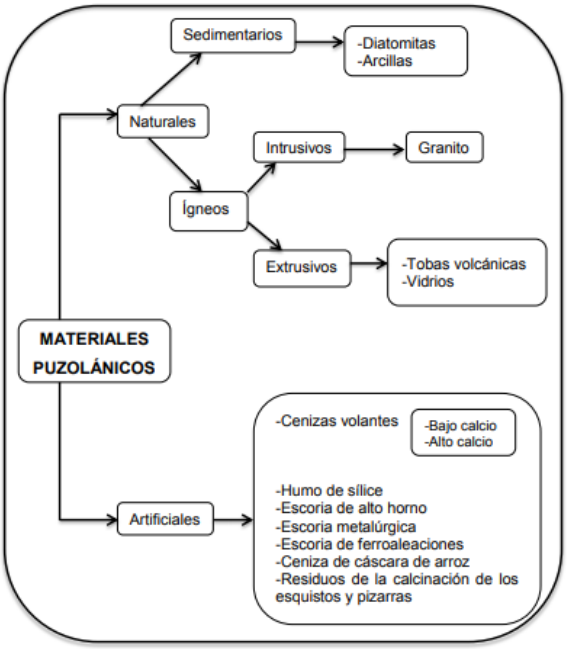


**Figura 5. Clasificación de los materiales puzolánicos**

**Fuente:** (Juárez Quevedo, 2012)

Numerosos trabajos han experimentado el uso de mezclas compuestas por diferentes tipos de materiales precursores para el desarrollo y estudio de morteros geopoliméricos. La

composición química de los materiales que utilizaron algunos de estos estudios son mostrados en la **Tabla 8**.

**Tabla 8. Composición química de materiales de morteros geopoliméricos obtenidos mediante ensayo de FRX**

| Referencia | Material | $SiO_2$ | $Al_2O_3$ | $Fe_2O_3$ | CaO | MgO | LOI |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| (Ghasan F Huseien, Mirza, Ismail, Ghoshal, & Ariffin, 2016) | EGAH | 30.53 | 13.67 | 0.33 | 46.02 | 5.09 | 0.22 |
| | MC | 52.22 | 41.41 | 0.49 | 0.08 | 0.26 | 1.66 |
| (Ghasan Fahim Huseien et al., 2016) | EGAH | 30.80 | 10.9 | 0.64 | 51.80 | 4.57 | 0.22 |
| | CV | 57.20 | 28.80 | 3.67 | 5.16 | 1.48 | 0.12 |
| | CCA | 64.20 | 4.25 | 3.13 | 10.20 | 5.90 | 1.73 |
| (Phoo-ngernkham, Sata, et al., 2015) | CVAC | 29.32 | 12.96 | 15.64 | 25.79 | 2.94 | 0.30 |
| | CPO | 20.80 | 4.70 | 3.40 | 65.30 | 1.50 | 0.90 |
| (Phoo-ngernkham, Maegawa, Mishima, Hatanaka, & Chindaprasirt, 2015) | CV | 52.31 | 27.04 | 6.85 | 3.32 | 1.23 | 1.60 |
| | EGAH | 30.53 | 13.67 | 0.33 | 46.0 | 5.09 | 0.22 |
| (H. Y. Zhang, Kodur, Qi, & Wu, 2015) | MC | 51.85 | 44.84 | 0.98 | 0.13 | 0.48 | - |
| | CV | 48.66 | 24.80 | 21.10 | 3.30 | 1.10 | - |
| (Hawa, Tonnayopas, Prachasaree, & Taneerananon, 2013) | MC | 50.30 | 41.02 | 1.05 | 0.33 | - | 1.72 |
| | CMC | 2.57 | 0.53 | 0.56 | 41.19 | 4.52 | 23.7 |
| | CMP | 38.37 | 1.48 | 3.01 | 13.84 | 3.0 | 20.4 |
| (Vasconcelos, Fernandes, de Aguiar, & Pacheco-Torgal, 2013) | MC | - | - | - | - | - | - |
| | CaOH | - | - | - | - | - | - |
| (Dai et al., 2013) | CV | 64.30 | 13.40 | 12.30 | 6.20 | - | - |
| | EGAH | 20.90 | 8.20 | 0.70 | 66.60 | - | - |
| | CRSM | 8.10 | 4.20 | 4.60 | 64.5 | - | - |
| (Hu, Wang, Zhang, & Ding, 2008) | MC | 53.10 | 30.90 | 1.6 | 0.1 | 0.30 | 11.30 |
| | EGAH | 15.00 | 6.70 | 15.40 | 44.20 | 10.90 | 0.60 |
| (Torgal, Gomes, & Jalali, 2006) | CRMT | 53.48 | 16.66 | 12.33 | - | 1.27 | 2.20 |
| | CaOH | - | - | - | - | - | - |

**Fuente:** (Fahim Huseien et al., 2017)

En cuanto a las puzolanas naturales, estas son productos sialíticos, adquiriendo esa denominación por su alto contenido en silicio y aluminio. Este tipo de puzolanas son esencialmente cenizas volcánicas que resultaron de una actividad volcánica reciente. Para el procesamiento de los materiales puzolánicos, usualmente es necesario realizar operaciones unitarias como trituración, molienda y selección por tamaño de partículas; en ciertos casos es necesario realizar una activación térmica del material. A excepción de las diatomitas (de origen orgánico), todas las puzolanas naturales proceden de rocas y

minerales volcánicos (Juárez Quevedo, 2012). En la **Figura 6** se muestran 3 tipos de materiales puzolánicos naturales.

a) Piedra pómez y pumicita, es una materia prima; mineral de origen volcánico.

b) Puzolana color rojo.

c) Materiales puzolánicos después del proceso de molienda.

**Figura 6. Puzolanas naturales**

**Fuente:** (Juárez Quevedo, 2012)

### 2.3.7 Ceniza Volcánica

Es toda partícula producida durante erupciones volcánicas por la fragmentación mecánica del magma cuyo diámetro promedio es menor a 2 mm. La ceniza volcánica fina consiste en partículas menores a 64 um de diámetro promedio (Zimanowski, Wohletz, Dellino, & Büttner, 2003).

#### 2.3.7.1 Distribución geográfica y características de los suelos derivados de cenizas volcánicas en el Perú

La cadena de volcanes peruanos está localizada a lo largo de la costa sur peruana, formando parte de la Cordillera de los Andes, entre los que se encuentran el Chachani, Misti y Pichupichu en Arequipa; el Ubinas y el Omate o Huaynaputina en Moquegua y

el Tutupaca, Yucamani y Tacora en Tacna; en el norte también se encuentran una serie de volcanes apagados que forman parte del anillo del círculo volcánico del Pacífico (Aguilera, 1969). Se han llegado a catalogar más de 400 volcanes en el territorio peruano de los cuales la mayoría ya no representa ningún riesgo en cuanto a actividad volcánica (Observatorio Vulcanológico del Sur - OVS, n.d.-a).

Los principales volcanes activos son: Misti, Ubinas, Huaynaputina, Ticsani, Sabancaya, Coropuna, Tutupaca, Yucamane (**Figura 7**). Todos estos volcanes pertenecen a la Zona Central Volcánica de los Andes, que se extiende desde el Sur del Perú hasta el Norte de Chile **(Figura 8)**.

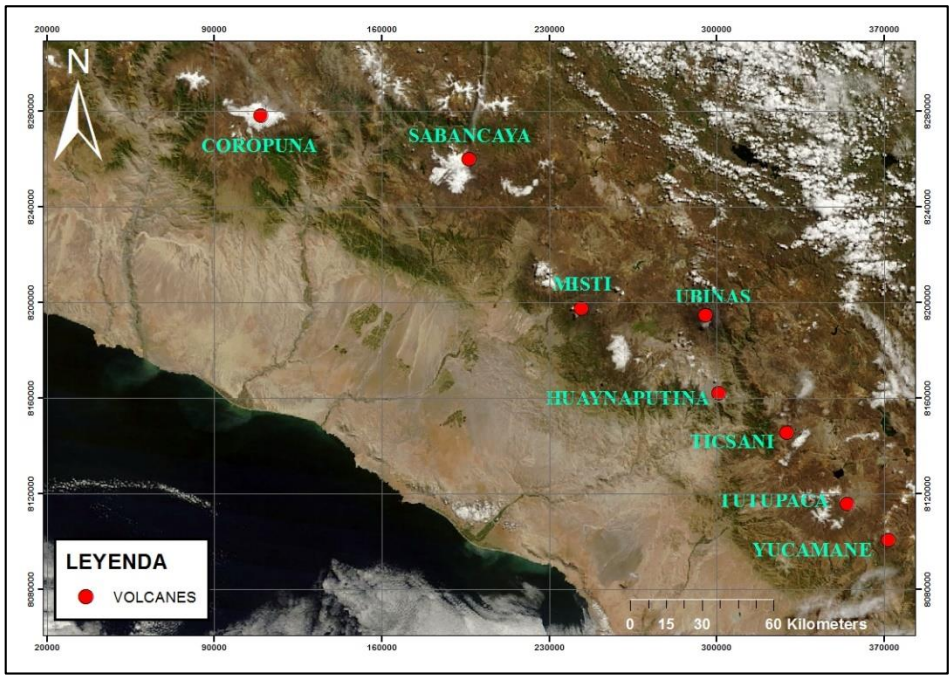


**Figura 7. Principales Volcanes activos del Sur del Perú**

**Fuente:** (Observatorio Vulcanológico del Sur - OVS)

Los suelos de origen volcánico incluyen no solamente los volcanes en sí mismos, sino también las afloraciones rocosas originadas por las actividades volcánicas a lo largo del tiempo y muchas formas de paisajes aluviales y coluviales como consecuencia indirecta de la actividad volcánica. Muchos de los suelos de la costa sur y de la sierra peruana están constituidos por formas de tierra de origen volcánico, cubierto por cenizas o materiales derivados.

La distribución del material volcánico y el desarrollo de los suelos están estrechamente correlacionados; debido a la topografía accidentada de la sierra peruana, solamente se

puede apreciar la acumulación de material volcánico en áreas monticuladas que ha servido como material madre para el desarrollo de suelos; mientras que en áreas completamente empinadas y muy accidentadas existen solo remanentes de cenizas volcánicas debido a la remoción de este material por efecto de erosión (Aguilera, 1969).

**Figura 8. Vulcanismo activo en la Zona Volcánica Central (ZVC) de América del Sur**

**Fuente:** (Macedo, 2013)

En Arequipa, por ejemplo, las rocas están ampliamente distribuidas y se componen de derrames y piroclásticos andesíticos, brechas de flujo, tufos y conglomerados. En Moquegua, las rocas de origen volcánico se encuentran ampliamente distribuidas. Las formaciones afloran en la parte baja y media del flanco andino. Los derrames son volcánicos andesíticos y riolíticos con intercalaciones de piroclásticos y miembros aislados de sedimentos detríticos. Las formaciones volcánicas más recientes se encuentran formando conos volcánicos que existen en las partes altas de los Andes, consistentes en derrames y tufos riolíticos que cubren a las anteriores. Los suelos volcánicos del Perú se pueden agrupar en (Aguilera, 1969):

A. Suelos de regiones áridas y templadas.
B. Suelos de regiones semiáridas y templadas.
C. Suelos de regiones demiáridas y frías.

D. Suelos de regiones subhúmedas y húmedas.

La distribución geográfica de los suelos volcánicos del Perú se presenta en la **Figura 9**.

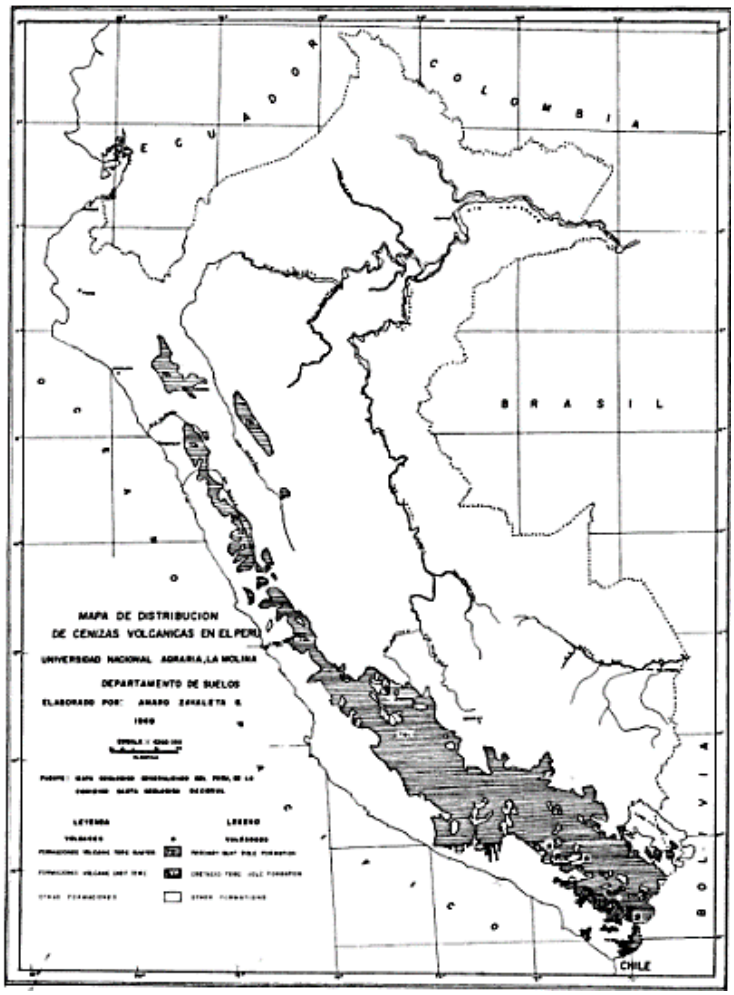


**Figura 9. Mapa de Distribución de Cenizas Volcánicas en el Perú**

**Fuente:** (Aguilera, 1969)

### 2.3.7.2 Volcán Ubinas

El volcán Ubinas (16° 22′ S, 70° 54′ O; 5762 msnm.) está ubicado en el departamento de Moquegua, a, aproximadamente, 70 km al este de la ciudad de Arequipa. Políticamente se encuentra en la jurisdicción de la Región Moquegua, provincia General Sánchez Cerro, en el Distrito de Ubinas. Este volcán tiene la forma de un cono truncado, posee una altura de 1400 m desde la base ubicada a 4270 msnm, y ocupa un área de 52 $km^2$ (Observatorio Vulcanológico del SUR - OVS, n.d.).

El volcán Ubinas ha sido protagonista de hasta 24 erupciones en los últimos 500 años, presentando actividad fumarólica y emisiones de cenizas y rocas. La primera semana de

septiembre del 2013 se dio una de las últimas erupciones de corto periodo, en que se presentaron explosiones de tipo freático, con emisiones de ceniza y vapor de agua en altas proporciones, acompañados de proyecciones de rocas, algunas de las cuales llegaron a sobrepasar los bordes de la caldera, provocando preocupación en los aproximadamente 3500 habitantes del valle de Ubinas y los poblados aledaños al volcán (Macedo, 2013).

Los 24 eventos de alta actividad fumarólica y actividad explosiva moderada registrada desde el año de 1550 en el volcán Ubinas se dieron en: 1550, 1599, 1600, 1662, 1677, 1778, 1784, 1826, 1830, 1862, 1865, 1867, 1869, 1906, 1907, 1912, 1923, 1936, 1937, 1951, 1956, 1969, 1996, 2006-2009. Ciertas erupciones (como la erupción de 1936, 1951 y 2006-2009) han afectado fuertemente la actividad agrícola en el valle de Ubinas (Macedo, 2013). El último importante y prolongado proceso eruptivo que se dio entre marzo del 2006 y junio del 2009, presentó fumarolas, cenizas, explosiones, sismicidad y deformaciones **(Figura 10)**.

a) Volcán Ubinas

b) Mapa de ubicación de las 4 estaciones de la Red Sísmica Telemétrica del volcán Ubinas

**Figura 10. a) Fotografía del Volcán Ubinas en actividad. b) Mapa de ubicación de las estaciones de Red Sísmica Telemétrica del Volcán Ubinas**

**Fuente:** (Macedo, 2013)

Tefra es un término general para todas las partículas producidas durante erupciones volcánicas por la fragmentación mecánica del magma y/o rocas locales (Zimanowski et al., 2003), los cuales se han clasificado de acuerdo a su tamaño, así: los fragmentos que son inferiores a 2 mm se denominan cenizas, los que se encuentran entre 2-64 mm se denominan lapilli y los fragmentos mayores a 64 mm se denominan bloques. De todos estos materiales, la ceniza volcánica se constituye precisamente como uno de los productos de más amplia distribución (Schmid, 1981).

Según el estudio de la estratigrafía del volcán Ubinas, se distinguen dos casos (Rivera, Mariño, & Thouret, 2011):

**1.** Emisiones de cenizas finas de moderado volumen (< 1 $km^3$), y materiales balísticos productos de erupciones freáticas, freatomagmáticas y vulcanianas que podrían cubrir un área aproximada de 60 $km^2$.

**a)** Los diversos depósitos de cenizas finas y bloques balísticos de origen vulcaniano, freático y freatomagmático distribuidos dentro de la caldera, en los flancos del volcán y los que afloran a 6 km del Ubinas (Quebrada Infiernillo). Los productos balísticos que yacen dentro de la caldera están constituidos de fragmentos lávicos con diámetros de hasta 2 m y los encontrados a una distancia de 2 km al este del cráter miden hasta 20 cm. Mientras que las cenizas son de colores grises y alcanzan espesores de hasta 10 cm a 6 km al Este del Ubinas.

**b)** En las cenizas del siglo XX reportadas hasta las inmediaciones de los poblados de Yalahua y Torata (Diario El Pueblo, 1925 y 1936), localizadas a 18 y 16 km al NE y E del volcán respectivamente. Asimismo en las cenizas emitidas durante la actividad eruptiva reciente ocurrida entre 2006-2009, donde cenizas cayeron en áreas distales como Omate, a 50 km al SE del Ubinas.

**2.** Abundantes depósitos de lapilli pómez producto de erupciones plinianas y subplinianas que podrían cubrir los flancos del volcán, hasta una distancia mayor de 20 km alrededor del cráter. Esta hipótesis está basada en:

**a)** En dos depósitos de caída pliniana de menos de 7000 años que afloran en la quebrada Infiernillo y en el poblado de Anascapa, ubicados a 6 km al SE y S del

cráter, respectivamente (áreas proximales), en donde miden más de 2 m de espesor. Dichos depósitos plinianos también afloran por los poblados de Pachas y Totora, ubicados a 40 km al SE (áreas distales), en donde tienen 25 cm de espesor.

#### 2.3.7.3 Ceniza volcánica como precursor geopolimérico

Estos materiales ya se han utilizado para activación alcalina o se usaron como relleno en ingeniería civil (Kamseu, Leonelli, Perera, Melo, & Lemougna, 2009). Las cenizas volcánicas pueden considerarse puzolanas naturales debido a su alto contenido de sílice, alúmina y óxido de hierro. Para la síntesis de geopolímeros, se deben examinar los parámetros que definen los criterios fundamentales durante la activación alcalina de aluminosilicatos, tales como la distribución del tamaño de partícula, superficie específica, composiciones químicas y mineralógicas, cantidad y disponibilidad de sílice y alúmina en la fase amorfa (Pre De Silva, Sagoe-Crenstil, & Sirivivatnanon, 2007). Otros parámetros, como la temperatura de curado, la edad de los geopolímeros, el tipo y la composición de la solución alcalina se tienen en cuenta para optimizar las características de los productos sintetizados. Además, las propiedades de los geopolímeros pueden diferir de un tipo de aluminosilicato a otro debido, entre otras cosas, a la cantidad y proporciones de alúmina y sílice en la fase amorfa (P De Silva, Sagoe-Crenstil, & Sirivivatnanon, 2007). Las composiciones químicas y mineralógicas de las cenizas volcánicas son variables y se sabe que tienen baja reactividad alcalina (Tchakoute, Elimbi, Yanne, & Djangang, 2013).

#### 2.3.7.4 Consideraciones ambientales relacionadas con la ceniza volcánica

Las erupciones volcánicas pueden causar varios tipos de repercusiones ambientales, afectando de manera simultánea muchos ciclos en el sistema de la tierra, impactando el agua, el suelo, los sedimentos superficiales (Jones & Gislason, 2008), además de generar perjuicios sobre la vegetación, el ganado y la salud humana (Witham, Oppenheimer, & Horwell, 2005). También se ha detectado que pequeñas cantidades de ceniza pueden afectar la infraestructura, como las redes de transporte, los suministros de electricidad y agua y de aguas pluviales y sistemas de alcantarillado (Blong, 2013; David M Johnston, Houghton, Neall, Ronan, & Paton, 2000). Debido al aporte natural de elementos químicos sobre la superficie terrestre se desarrollan impactos ambientales que tienen potencial alto

de toxicidad en los cuerpos receptores (Armienta, De la Cruz-Reyna, Morton, Cruz, & Ceniceros, 2002; Risacher & Alonso, 2001; Witham et al., 2005).

**a) Suelo**

Los suelos volcánicos, principalmente los denominados Andosoles (IUSS Working Group WRB, 2006), son escenarios particulares con propiedades específicas, que poseen una capacidad mucho más alta de unión con metales traza (Sugiyarto, 2013), los cuales presentan gran cantidad de aluminosilicatos amorfos neoformados y compuestos órgano-minerales (Fontes, Gonçalves, & Pereira, 2004). En algunos casos, los andosoles pueden llegar a resultar contaminados, y si son intensamente explotados para la agricultura, la situación es agravada, ya que la presión del uso del suelo genera también degradación y erosión (Gianfreda, Rao, Piotrowska, Palumbo, & Colombo, 2005).

**Figura 11. Desarrollo de suelos con presencia de materiales volcánicos**

**Fuente:** (Ugolini & Dahlgren, 2002)

Por otro lado, la deposición de la ceniza volcánica en el suelo, limita el flujo de oxígeno a la zona subyacente (Maun, 1998), por lo que hay menos disponibilidad para las plantas y organismos allí presentes. Este limitado flujo de oxígeno genera cambios sobre la actividad microbiana, el ciclo de nutrientes, y la regeneración de las plantas para sobrevivir.

**Figura 12. Montaña afectada por flujo piroclástico después de una erupción volcánica**

**Fuente:** (Ugolini & Dahlgren, 2002)

**b) Agua**

El aumento de la turbidez es otro impacto físico de la suspensión de cenizas, que hace que el agua no sea potable (Cuoco et al., 2013; Reimann et al., 2003; Weniger, Blaser, Gedrose, Lippy, & Juranek, 1983). Las partículas volcánicas frescas están recubiertas por un aerosol ácido que, en contacto con el agua, provoca su acidificación, excediendo los límites de agua potable para animales y personas (Shane J Cronin, Neall, Lecointre, Hedley, & Loganathan, 2003; D'Alessandro, 2006; Smithsonian Institution, 2000). La ceniza volcánica fresca en contacto con el agua también libera componentes solubles, potencialmente tóxicos para los organismos vivos (Madonia, Cangemi, Bellomo, & D'Alessandro, 2013).

El lixiviado de agua refleja la disolución de compuestos fácilmente solubles en agua adsorbidos sobre superficies de partículas de ceniza, formados directamente durante la desgasificación pasiva y / o eventos paroxísticos. La adsorción ocurre como consecuencia de la condensación / sublimación de los gases volcánicos en las superficies de las cenizas, en respuesta a las reacciones dependientes de la temperatura que ocurren a diferentes alturas en la nube volcánica (Óskarsson, 1980). Los procesos más comunes son la

conversión de SO2 gaseoso a ácido sulfúrico y la condensación de HCl y HF. Allí los compuestos ácidos interactúan principalmente con la fracción de vidrio de las partículas de ceniza volcánica, lixiviando metales alcalinos y alcalinotérreos (Censi et al., 2010; Delmelle, Lambert, Dufrêne, Gerin, & Óskarsson, 2007; Liotta et al., 2006).

Las cenizas volcánicas recién depositadas pueden liberar grandes cantidades de compuestos potencialmente dañinos debido a que los gases ácidos adsorbidos y las sales formadas por su reacción con el vidrio son fácilmente solubles (Witham et al., 2005). Incluso las antiguas cenizas volcánicas, que ya han interactuado con el agua de lluvia, mantienen un potencial menor pero significativo para liberar compuestos que podrían ser dañinos para el medio ambiente (Ruggieri, Saavedra, Fernandez-Turiel, Gimeno, & Garcia-Valles, 2010), porque las cenizas volcánicas están compuestas principalmente de vidrio volcánico que es, hasta ahora, el componente más resistente (Delmelle, Villiéras, & Pelletier, 2005).

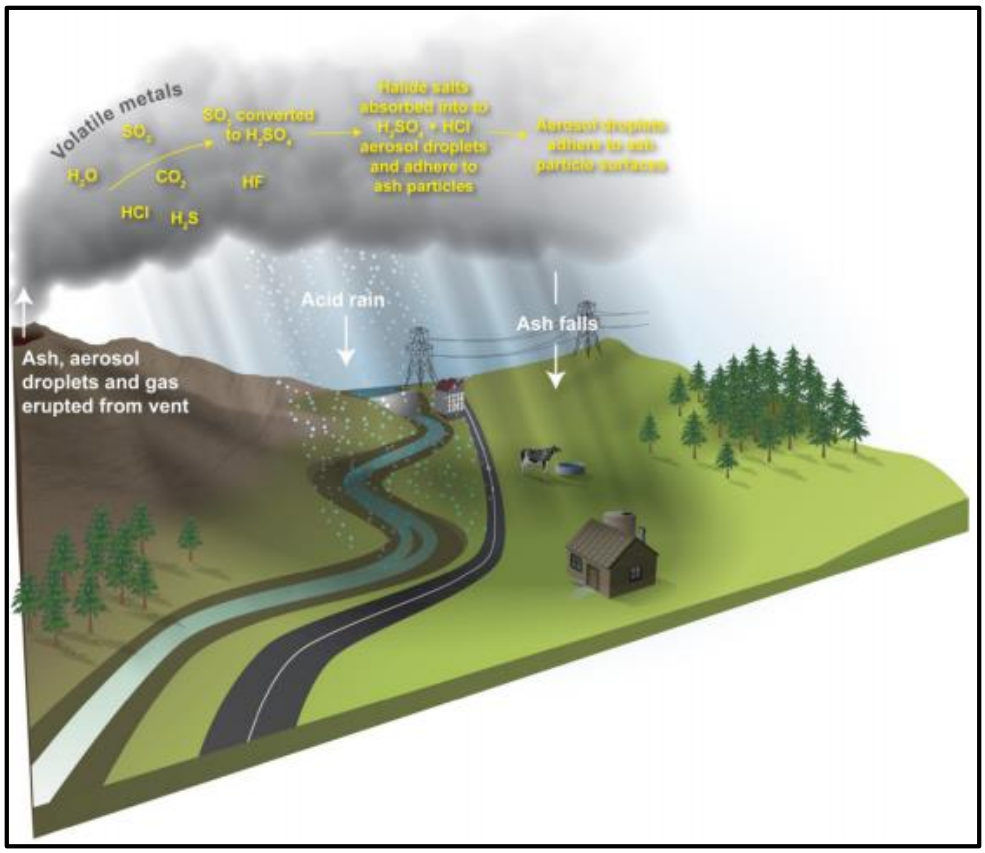


**Figura 13. Procesos que ocurren dentro de las plumas volcánicas y liberación de componentes solubles en aguas superficiales**

**Fuente:** GNS Science

Los metales, como muchos otros elementos traza, tienen un impacto en la salud humana de muchas maneras. Varias organizaciones gubernamentales y privadas han llevado a cabo evaluaciones de riesgos de productos químicos para humanos. La Organización Mundial de la Salud (OMS) ha establecido valores de toxicidad, denominados ingestas diarias admisibles (IDA) e ingestas diarias máximas tolerables provisionales (IDTDI). La Junta de Alimentos y Nutrición de los EE. UU. Del Instituto de Medicina se ha ocupado de la toxicidad estableciendo un nivel de ingesta superior tolerables (Goldhaber, 2003).

El agua potable es una fuente importante para tales elementos. Desde 1958, la OMS publicó los valores de referencia para el agua potable segura en la guía "Normas internacionales para la calidad del agua potable" que informan concentraciones admitidas máximas (MAC) para cada sustancia química. El riesgo químico relacionado con el consumo de agua potable no solo depende de la combinación de la frecuencia de exposición de una población y la concentración de sustancias químicas, sino también de la duración de la exposición (Cangemi et al., 2017).

**c) Vegetación**

La dispersión de la ceniza por los vientos dominantes en cuanto a la vegetación, es un factor crucial a la hora de delimitar áreas de impacto, y también para evaluarlo zonalmente. De una forma o de otra los efectos de las erupciones van a depender tanto de su dinámica, como de las características de la vegetación afectada, así como de circunstancias locales que pueden disminuir o acrecentar dichos efectos. Esta dispersión de ceniza alrededor del volcán o en una dirección determinada por la influencia de los vientos dominantes, da lugar a una zonación en las zonas afectadas en la que disminuyen los efectos a medidas que nos alejamos del cráter (González Cárdenas, 2006).

Después de una erupción, y en un periodo de tiempo generalmente largo, se lleva a cabo una recuperación de la vegetación. Esta puede producirse a partir de las especies que existían antes del evento, o con especies nuevas procedente de áreas alejadas del espacio afectado. En este último caso puede producirse una sustitución, al menos parcial, de las especies tradicionales por otras. Esto lleva a que después de un tiempo unas especies son sustituidas por otras. Las plantas, en el primer año de rebrote, es posible que tengan una menor altura, hasta un 75 % menor, así como una floración más pobre (González Cárdenas, 2006).

La supervivencia de la vegetación dependerá de diversos aspectos como la profundidad de enterramiento, la altura de la vegetación, la frecuencia de eventos de deposición, la época del año, la composición de la vegetación, la capacidad de las plantas para responder de diversas maneras, y la transferencia de nutrientes (Aradóttir, Petursdottir, Halldorsson, Svavarsdottir, & Arnalds, 2013; Maun, 1998).

**Figura 14. Vegetación afectada por dispersión de ceniza volcánica**

**Fuente:** (Ugolini & Dahlgren, 2002)

**d) Salud Humana**

Los volcanes pueden emitir grandes cantidades de ceniza fresca a la atmósfera, y los viejos materiales piroclásticos de grano fino que se encuentran en el suelo pueden ser removilizados por el viento. Las partículas volcánicas frescas y viejas, transportadas por el viento, pueden alcanzar áreas a cientos de kilómetros de distancia de sus fuentes, causando efectos adversos en ambientes tanto naturales como antrópicos. La inhalación o ingestión de cenizas volcánicas puede tener posibles efectos tóxicos. La inhalación de partículas volcánicas puede afectar el sistema respiratorio de humanos y animales. Horwell y Bexter (Horwell & Baxter, 2006) presentaron un estudio muy exhaustivo sobre los peligros para la salud respiratoria de la ceniza volcánica.

Estudios epidemiológicos y clínicos realizados después de las erupciones de ocho volcanes diferentes ubicados en todo el mundo, reportaron la presencia de patologías

respiratorias como el aumento del asma bronquial, una mayor mortalidad por bronquitis y enfisema, aumento de la tuberculosis e infecciones respiratorias en todos los territorios monitoreados (Cangemi et al., 2017).

De los principales elementos químicos disueltos en solución acuosa, el flúor es típico de los ambientes volcánicos. El flúor es un elemento esencial para el crecimiento animal y humano: se incorpora en las partes minerales de los huesos y los dientes como la fluorapatita. Una mayor incidencia de caries se ha relacionado con la deficiencia de flúor, y su ingesta excesiva causa fluososis dental o esquelética. La sobreexposición al flúor durante la infancia causa fluorosis dental, causando decoloración, ennegrecimiento, motas o calizas con los dientes. La ingesta de flúor por encima del límite de seguridad puede conducir a la fluorosis esquelética, con deformación severa y permanente de los huesos y las articulaciones (OMS, 2002).

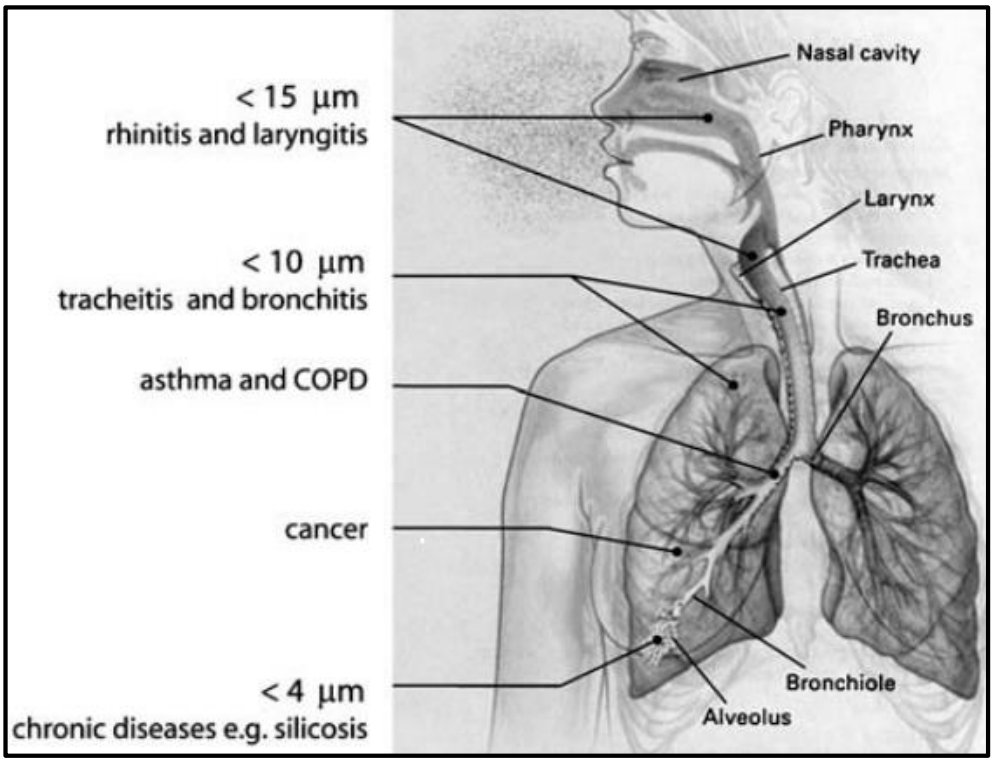


**Figura 15. Diagrama del pulmón que muestra la anatomía del pulmón y las vías respiratorias y la penetración de partículas de ceniza de diferentes tamaños asociadas con sus posibles efectos en la salud**

**Fuente:** (Wilson et al., 2012)

**e) Infraestructura**

El impacto de las cenizas volcánicas en los suministros de agua ha sido ampliamente divulgado en la literatura (S J Cronin et al., 2014; Olgun et al., 2013; Pellegriti et al., 2009; Stewart et al., 2006; Sutton, J., Elias, T., Hendley, J.W., Stauffer, 1997). El impacto

físico incluye las estructuras de entrada de agua obstruidas debido a la caída de cenizas (Blong, 2013)y el daño a las tuberías metálicas o al equipo eléctrico debido a la naturaleza corrosiva y abrasiva de las cenizas (Douglas M Johnston, 1997).

#### 2.3.6.5 Lixiviación de compuestos químicos

Según el Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS), se entiende por lixiviación por percolación a un proceso en el cual la solución lixiviante y las aguas de lavado pueden circular por efecto de la gravedad a través de las partículas de mineral en el interior de un tanque o en el suelo y disolver el metal de interés. Por lo tanto, los materiales solubles en el suelo tales como sales, nutrientes, pesticidas químicos o contaminantes, son lavados hacia capas más profundas del suelo o son disueltas y llevadas lejos por el agua.

# CAPÍTULO 3

# METODOLOGÍA

## 3.1 Descripción del desarrollo experimental

Para el desarrollo experimental del presente trabajo, se tomaron en cuenta los antecedentes de revisiones bibliográficas colectadas al inicio de esta investigación; se emplearon tesis, normas, artículos de investigación publicadas en revistas y plataformas científicas internacionales. Se establecieron condiciones de obtención, curado y caracterización para morteros de cemento y morteros geopolíméricos, que haga factible un modelo de comparación **(Tabla 9)**.

**Tabla 9.** Modelo experimental para desarrollo de morteros de estudio

| Precursor | Agregado | Activador | Relación S:S | Relación L/S | Curado en estufa | Resistencia (7, 14, 28 días) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Cemento (CY)** | Arena fina local (AL) | $H_2O$ | 1:1 | 0.1 | 48 h | MPa |
| **Ceniza volcánica (CV)** | Arena fina local (AL) | NaOH (12 M)<br>$NaOH+Na_2SiO_3$ (75 % - 25%) | 1:1 | 0.1 | 48 h | MPa |

**Fuente:** Elaboración propia

Se fabricaron morteros cilíndricos de cemento Portland (MCP) y morteros cilíndricos geopoliméricos (MGP). Determinando sus propiedades físicas, mecánicas y micro-estructurales mediante ensayos de absorción, densidad, resistencia a la compresión, difracción de rayos X (DRX) y microscopía electrónica de barrido (SEM).

La preparación y caracterización de los morteros se realizaron tanto en los laboratorios del Instituto de Energía y Medio Ambiente (IEM) y en el Laboratorio de Concreto y otros materiales de la Construcción de la Facultad de Ingeniería Civil, ambos pertenecientes a la Universidad Católica San Pablo – Campo Sucre.

## 3.2 Variables

### 3.2.1 Variables independientes

**Tabla 10. Variables independientes de la investigación**

| Variables | Tipo 1 | Tipo 2 |
|---|---|---|
| **Tipo de precursor del mortero** | Ceniza Volcánica | Cemento Portland |

### 3.2.1 Variables dependientes

Densidad (g/cm$^3$), absorción (%), resistencia a la compresión (MPa) composición mineralógica, morfología.

## 3.3 Planificación de la experimentación

**a)** Caracterización de la materia prima (cemento, ceniza volcánica, arena fina local)
- Fluorescencia de rayos X (FRX).
- Análisis termogravimétrico (TGA).
- Difracción de rayos X (DRX).

**b)** Fabricación de morteros de cemento
- Método automatizado.

**c)** Fabricación de morteros de ceniza volcánica activada alcalinamente
- Método automatizado.

**d)** Caracterización mecánica de morteros (morteros de cemento y morteros geopoliméricos)
- Ensayo de resistencia a la compresión.

**e)** Caracterización física (morteros de cemento y morteros geopoliméricos)
- Absorción.
- Densidad Aparente.
- Densidad Real.

**f)** Caracterización mineralógica y morfológica (morteros de cemento y morteros geopoliméricos)
- Difracción de Rayos X (DRX).
- Microscopía electrónica de barrido (SEM/EDS).

### 3.4 Materiales

Las materias primas utilizadas para la elaboración de morteros fueron Cemento Multi-propósito de Alta Durabilidad tipo IP de la marca YURA (CY) y ceniza volcánica procedente del sector base del volcán Ubinas (CV). Como material de agregado se empleó arena fina local (AL) de la marca SUPERMIX.

Los materiales fueron sometidos a secado para evitar variaciones en los resultados debido a la presencia de humedad atmosférica; para esto, se separaron los restos orgánicos y piedras de gran tamaño, se colocó el resto del material en una bandeja de acero para luego ser introducida en la estufa durante a 24 horas a una temperatura de 110 +/- 5 °C (NTP 339.127, 1999).

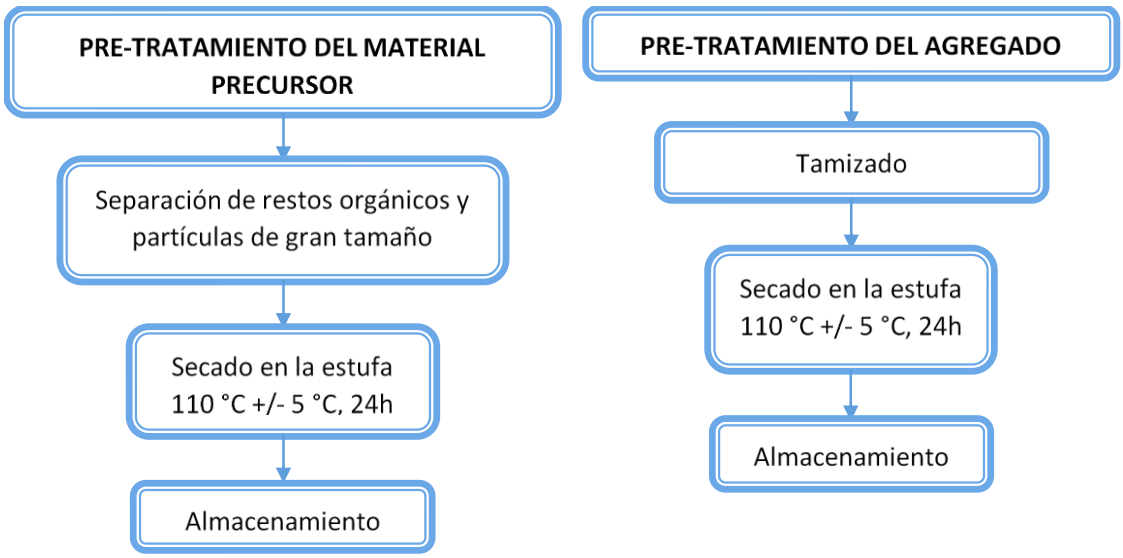


**Figura 16. Secuencia de pre tratamiento de material precursor y agregado fino para fabricación de probetas**

**Fuente:** Elaboración propia

Para la caracterización de los materiales precursores y agregados, se realizaron ensayos de fluorescencia de rayos X (FRX), difracción de rayos X (DRX) y análisis termogravimétrico (TGA).

**Fluorescencia de Rayos X (FRX)**

La composición química de los materiales fue determinada por fluorescencia de rayos X (FRX), empleando el equipo Spectro Xepos (Ametek Materials Analysis Division).

**Difracción de Rayos X (DRX)**

Las fases mineralógicas de los materiales se identificaron a través del difractómetro de rayos X Bruker modelo D8 Avance Davinci con fuente de radiación CuKα (λ = 0,1542 nm), una tensión de 40 kV y una corriente de 40 mA; las muestras se examinaron en el rango 2θ comprendido entre 10º y 80º con una velocidad de barrido de 2º/min.

**Análisis Termogravimérico (TGA)**

El TGA se realizó calentando la muestra desde una temperatura inicial de 50 °C hasta una temperatura final de 900 °C en un equipo STA6000 marca Perkin simultaneuous termal analyser con sistema de refrigeración Polyscience con N2 como gas protector con 20 ml/min de flujo.

### 3.4.1 Cemento Multi-propósito de alta durabilidad YURA IP

Este producto es fabricado en base a puzolana natural de origen volcánico de alta reactividad y yeso **(Figura 17)**. De color gris claro, presenta un alto grado de finura y puede ser utilizado en cualquier tipo de obras de infraestructura, especialmente para obras de alta exigencia de durabilidad (YURA, 2017). Este tipo de cemento se caracteriza por tener propiedades que le otorgan a los morteros alta durabilidad, resistencia e impermeabilidad, así como permite evitar reacciones químicas en los agregados (YURA, 2017).

**Figura 17.** Cemento Multi-propósito de alta durabilidad YURA IP

Los componentes y la tecnología utilizada en la fabricación de producto, hacen que este tipo de cemento posea propiedades especiales que le proporcionan a los morteros y concretos cualidades como alta durabilidad para resistir la acción agresiva del medio ambiente que lo rodea, permitiendo alargar su vida útil.

### 3.4.1.1 Composición Química

La composición química del cemento hidráulico está conformado por varios compuestos (**Tabla 11)**, principalmente: Óxido de Calcio (CaO), aportado por la cal, dióxido de silicio ($SiO_2$), el cual se encuentra en la arcilla junto con el óxido de aluminio ($Al_2O_3$) y el óxido de hierro ($Fe_2O_3$).

**Tabla 11. Composición química de Cemento CY determinado por FRX**

| | $SiO_2$ | CaO | $Al_2O_3$ | $Fe_2O_3$ | $K_2O$ | MgO | $P_2O_5$ | $TiO_2$ | MnO | $Na_2O$ | LOI* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **CY** | 44.32 | 41.77 | 8.84 | 2.95 | 2.06 | 0.6 | 0.24 | 0.23 | 0.06 | <0.014 | 38.81 |

**Fuente:** Universidad Carlos III de Madrid (UC3M)

### 3.3.1.2 Composición Mineralógica

El análisis de difracción de rayos X del Cemento Yura (CY) muestra la presencia de picos ubicados entre los 25° y 45° en 2Θ **(Figura 18)**, lo que indica la presencia de minerales como silicato tricálcico, conocido como Alita ($C_3S$), silicato dicálcico al que se denomina como Belita ($C_2S$), el ferrito aluminato tetracálcico ($C_4AF$) denominado ferrita y, como celita, al aluminato tricálcico ($C_3A$); todos ellos son generalmente producidos durante la fabricación del clinker, en la fase de sinterización (tratamiento térmico a temperatura menor que el punto de fusión) en la que se conforman los principales componentes que constituyen el 95 % del cemento.

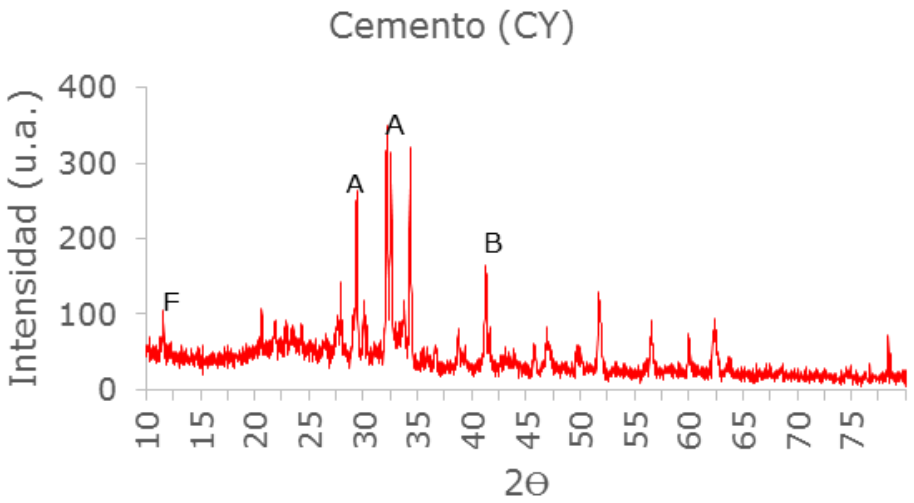


**Figura 18. Patrón DRX de cemento (CY)**

**Fuente:** Universidad Nacional de Ingeniería (UNI)

### 3.3.1.2 Análisis Termogravimétrico

Como se puede apreciar en la **Figura 19**, además de la curva de TGA, se recurrió a otro tipo de curvas con fines interpretativos (velocidad de variación de masa).

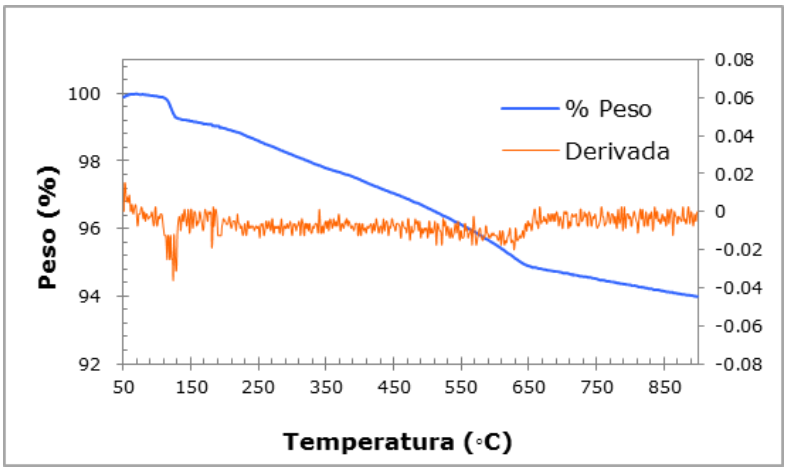


**Figura 19. Curva termogravimétrica de Cemento (CY) determinada por TGA**

**Fuente:** Universidad Carlos III de Madrid (UC3M)

La primera derivada de la curva de pérdida de peso (%) determinada por TGA en Cemento CY, indica que existiría una reacción endotérmica entre los 100 y 130 °C, la cual correspondería a la evaporación de agua del sulfato de calcio dihidratado o yeso (Flores Ledesma, Barceló Santana, Bucio Galindo, Arenas Alatorre, & Ruvalcaba Sil, 2016). En la carbonatación del cemento hidratado se produce vaterita y calcita normal. La vaterita se convierte a unos 460 °C en calcita II que se descarbonata y da un pico endotérmico a 600 y 750 °C (Ruiz de Gauna, 1976).

### 3.4.2 Ceniza Volcánica

La ceniza volcánica utilizada en el presente estudio proviene de la zona base del volcán Ubinas, cuyas coordenadas son latitud 297608, longitud 8196158 y 4600 msnm, ubicado en el departamento de Moquegua, Perú. Las muestras se encuentran almacenadas en contenedores herméticos, debidamente rotulados en las instalaciones del Instituto de Energía y Medio Ambiente (IEM), perteneciente a la Universidad Católica San Pablo (UCSP). La ceniza seca fue sometida a molienda haciendo uso de un Molino de bolas planetario para conseguir homogeneidad en el tamaño de partículas, de tal manera de que la ceniza molida adquiera mayor área superficial susceptible a reaccionar con los demás componentes que se le añaden para constituir el nuevo material (Skoog, West, & Holler,

1997). En la **Figura 20** se puede apreciar la ceniza del volcán Ubinas en estado natural y después de la molienda.

**Figura 20. Ceniza del volcán Ubinas. A) Ceniza en estado natural B) Ceniza Molida.**

**Fuente:** Elaboración propia

### 3.4.2.1 Composición Química

La composición química de la ceniza volcánica está reportada en la **Tabla 12**, en donde se muestra que la mayor cantidad de óxidos presentes son $SiO_2$, $Al_2O_3$ y $Fe_2O_3$, con una relación molar $SiO_2/Al_2O_3$ de 3.38. Esta composición es favorable, pues se encuentra dentro del rango de los requerimientos básicos de los materiales precursores utilizados para la elaboración de geopolímeros (Part, Ramli, Cheah, Ramli, & Cheah, 2017).

**Tabla 12. Composición química de la ceniza volcánica determinada por FRX**

| | $SiO_2$ | $Al_2O_3$ | $Fe_2O_3$ | CaO | MgO | $K_2O$ | $TiO_2$ | $P_2O_5$ | $Na_2O$ | MnO | LOI* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **CV** | 70.57 | 20.90 | 10.48 | 8.08 | 5.58 | 2.31 | 1.68 | 0.58 | 0.41 | 0.15 | 35.18 |

**Fuente:** Universidad Carlos III de Madrid (UC3M)

### 3.4.2.1 Composición Mineralógica

Las bandas formadas en los análisis de difracción de rayos X de la ceniza volcánia también indican la presencia de compuestos ricos en aluminio y silicio, así como minerales compuestos de calcio, sodio, potasio y algunas impurezas ricas en Fe y Ti. La composición mineralógica de la ceniza volcánica **(Figura 21)** muestra feldespato Na ($NaAlSi_3O_8$, PDF #89- 8575) y anortita (Ca ($Al_2Si_2O_8$), PDF #89-1459) como minerales principales. Esto se basa en las intensidades de los tres picos principales de estos minerales, que son los más altos en comparación con otros minerales. Otros minerales identificados son aluminios diópsidos ([Ca (Mg, Fe, Al) (Si, Al) $2O_6$], PDF #38-0466),

augita ($Ca_{0.61}Mg_{0.76}Fe_{0.49}$ $(SiO_3)_2$, PDF #76-0544), forsterite syn ($Mg_2SiO_4$, PDF#85-1357); diopsido Na ([($Ca_{0.52}Na_{0.29}Fe_{0.10}$ $Mg_{0.09}$) ($Mg_{0.057}Fe_{0.14}Al_{0.27}Mn_{0.01}Ti_{0.01}$) ($Si_2O_6$)], PDF # 85-1692), y hematites ($Fe_2O_3$, PDF #03- 0812).

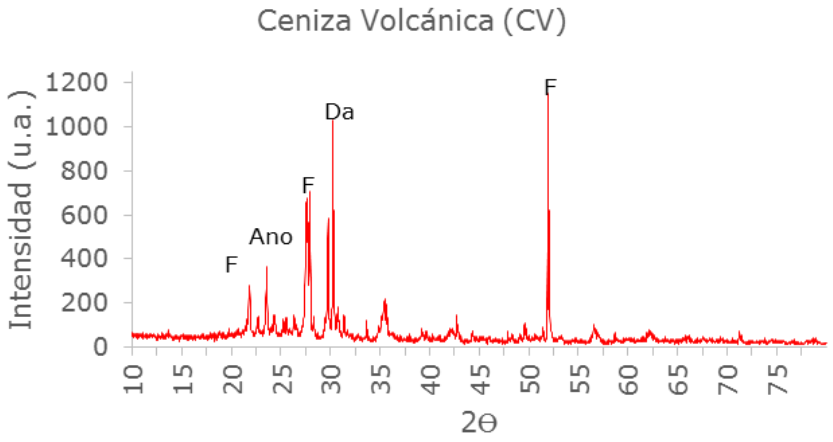


**Figura 21. Patrón DRX de ceniza volcánica (CV)**

**Fuente:** Universidad Nacional de Ingeniería (UNI)

### 3.4.2.1 Análisis Termogravimétrico

La curva termogravimétrica de la ceniza volcánica **(Figura 22)** presenta pérdidas de peso de 1.5%. La curva de la primera derivada muestra estabilidad en cuanto a la velocidad de pérdida de peso a través del tiempo de aumento de temperatura. La onda mostrada de 450 a 650 °C puede deberse a la descomposición de caolinita en meta caolinita en bajas proporciones (Serra, Conconi, Suarez, Aglietti, & Rendtorff, 2015).

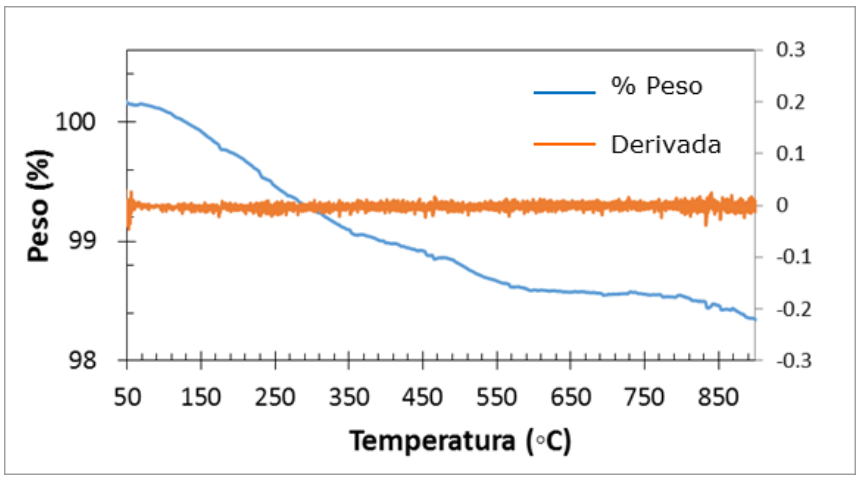


**Figura 22. Curva termogravimétrica de ceniza volcánica CV**

**Fuente:** Universidad Carlos III de Madrid (UC3M)

### 3.4.3 Agregado Fino Local

Se utilizó agregado fino de la marca SUPERMIX **(Figura 23)**, el cual se caracteriza por pasar el tamiz 3/8 y quedar retenido en la malla N° 200, siendo el más usual la arena resultante de la desintegración de rocas (Concretos Supermix, n.d.).

**Figura 23. Agregado fino SUPERMIX.**

#### 3.4.3.1 Composición Química

Como se puede apreciar en la **Tabla 13**, la arena fina local posee alto contenido de sílice ($SiO_2$) en un 70.22%, seguido del óxido de aluminio en un 22.58% ($Al_2O_3$), óxido ferroso ($Fe_2O_3$) en un 8.96 %, óxido de calcio (CaO) en un 8.17 % y óxido de potasio ($K_2O$) en un 1.82 %; lo cual confiere al agregado características químicas aceptables para la interacción con ligantes (Subaer, 2004). Los demás elementos presentes se encuentran en porcentajes bajos poco representativos.

**Tabla 13. Composición química de arena fina local determinada por FRX**

| | $SiO_2$ | $Al_2O_3$ | $Fe_2O_3$ | CaO | MgO | $Na_2O$ | $K_2O$ | $TiO_2$ | MnO | $P_2O_5$ | LOI* |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **AL** | 70.72 | 22.58 | 8.96 | 8.17 | 4.26 | 2.25 | 1.82 | 1.15 | 0.13 | 0.33 | 35.65 |

**Fuente:** Universidad Carlos III de Madrid (UC3M)

#### 3.4.3.1 Composición Mineralógica

El análisis de DRX del agregado fino confirma una composición rica en sílice y alúmina, correspondientes a feldespatos y anortitas entre los 20° y 30° 2Θ **(Figura 24)**.

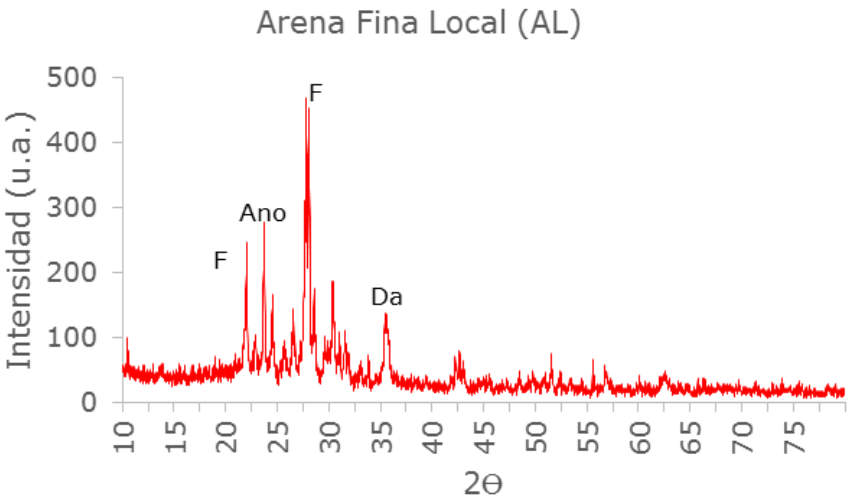


**Figura 24. Patrón DRX de agregado fino local (AL)**

**Fuente:** Universidad Nacional de Ingeniería (UNI)

### 3.4.3.1 Análisis Termogravimétrico

El resultado experimental mostró que hubo una pérdida de peso del 2.2 %, una pérdida de peso inicial correspondiente a la desecación de agua alrededor de los 100 a 200 °C. Existen efectos gravimétricos que no se deben a reacciones químicas ni a procesos de fusión. Al inicio del ensayo, es muy frecuente que exista un escalón de desecación, con una anchura de 100°C aproximadamente (Widmann, 2001).

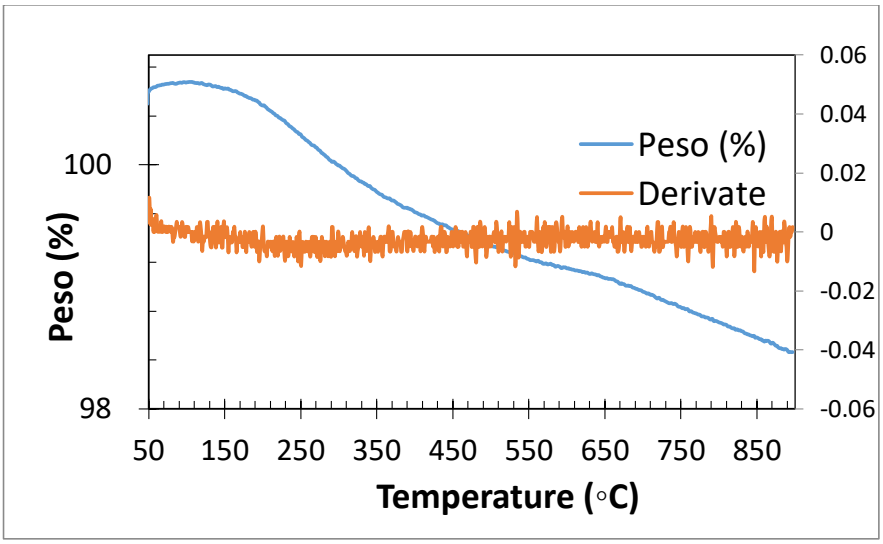


**Figura 25. Curva termogravimétrica de agregado fino (AL) determinada por TGA**

**Fuente:** Universidad Carlos III de Madrid (UC3M)

### 3.4.4 Solución activadora

Las soluciones activadoras utilizadas en este trabajo fueron:

- Solución de hidróxido de sodio (NaOH), 12 M.

- Solución compuesta por hidróxido de sodio (NaOH) 12 M y silicato de sodio ($Na_2SiO_3$) con una proporción de 75% - 25%, respectivamente.

**a) Cálculos para 500 ml de solución de Hidróxido de Sodio a concentración de 12 M**

Una solución de 12 molar de hidróxido de sodio tiene 12 moles de Hidróxido de Sodio (NaOH) por litro de solución.

En 1 litro hay 1000 mL, de manera que en 1000 ml de solución hay 12 moles de NaOH.

1000 ml solución 12 M ---------- 12 moles NaOH

500 ml solución 12 M ---------- x = 6 moles

Na = 23 g

O = 16 g

H= 1 g

Peso molecular de NaOH: 40 g.

1 mol NaOH ---------- 40 g NaOH

6 mol NaOH ---------- x = 240 g NaOH

Entonces, para la preparación de una solución de 500 mL de NaOH 12 M, se debe pesar 240 g de NaOH comercial y disolverlo en 500 mL de agua destilada.

**b) Preparación de solución activadora a 12 M**

Para la preparación de la solución activadora se ha de tener en cuenta la siguiente sucesión de pasos a seguir **(Figura 26)**:

- Con ayuda de una espátula, verter 240 gr de perlas de NaOH comercial en el vaso de precipitados, evitando derramar la sustancia sobre la balanza.
- Esperar que el valor de la masa mostrada en la balanza sea estable por 10 seg y retirar el recipiente que contiene las perlas de NaOH.

- Llenar un platillo de metal con agua hasta la mitad y colocar dentro el vaso de precipitados con las perlas de NaOH.
- Agregar agua destilada por las paredes interiores del vaso de precipitados y, con ayuda de una varilla de vidrio, disolver las perlas de NaOH en un volumen aproximado de 400 ml, teniendo cuidado del calentamiento producido por la reacción de la solución.
- Con ayuda de un embudo, verter la solución del vaso de precipitados a un matraz aforado de 500 ml por el borde de la pared interior y, haciendo uso de una pizeta, agregar agua hasta enrasar.
- Dejar enfriar, trasvasar a una botella limpia, cerrada y debidamente rotulada.

**Figura 26. Procedimientos de preparación de solución activadora**

**Fuente:** Elaboración propia

Para la preparación de la solución activadora con adición de silicato de sodio ($Na_2SiO_3$) se debe tener en consideración que la cantidad de silicato de sodio se calculará en base a la cantidad de hidróxido de sodio que hay en la solución a 12 M:

- Una vez preparada la solución activadora, se debe añadir la cantidad en gramos (gr) de silicato de sodio líquido, vertiendo lentamente y disolviendo en un recipiente con el hidróxido de sodio previamente pesado y tarado.
- Uso de la solución activadora en la fabricación de especímenes geopoliméricos.

Para la fabricación de 18 probetas con relación de sólido:sólido 1:1 y relación líquido/sólido (L/S) de 0.1 en el instrumento de compactación, la cantidad de solución activadora depende de la cantidad total de material sólido:

828 g de ceniza + 828 g de arena fina = 1656 g de materiales sólidos

1656 g de sólidos x 0.1 = 165.6 g

Son necesarios 165.6 g de activador a 12 M.

### 3.5 Procedimiento de obtención de morteros

Se empleó la metodología de elaboración de especímenes morteros por mezcla automatizada, compactación en molde pistón y curado a condiciones controladas de laboratorio validadas en estudios previos (Camacho Torres, 2018; Pérez Huamaní, 2018), en la cual se consideraron los siguientes procedimientos:

- Se pesaron los materiales precursores, agregados y soluciones activadoras necesarios para la elaboración de los morteros.

- La mezcla de materiales fue realizada en el mezclador automático marca Yu Feng modelo Cement Mortar Mixer JJ – 5 **(Figura 27)**.

**Figura 27. Mezcladora marca Yu Feng, modelo Cement Mortar MixerJJ-5**

**Fuente:** Propia, instalaciones del IEM-UCSP

- Se depositó parte de la mezcla (de acuerdo a las dimensiones deseadas) en el molde pistón para compactación en una Máquina de Compresión Universal marca Kinsgco modelo KJ – 106662 **(Figura 28)**.

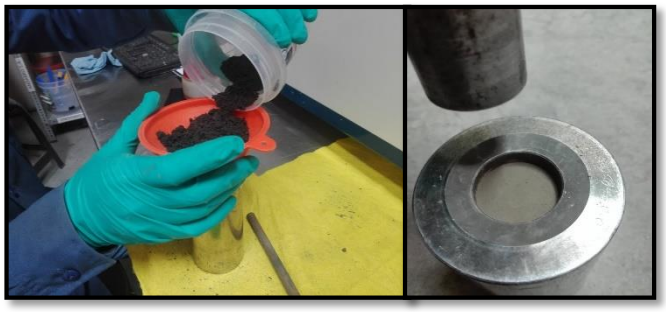

**Figura 28. Mezcla en molde pistón para compactación**

**Fuente:** Propia, instalaciones del IEM-UCSP

- Se procedió a desmoldar, registrar el peso de la probeta y cubrir con plástico para evitar la pérdida de humedad por desecación **(Figura 29 y Figura 30)**.

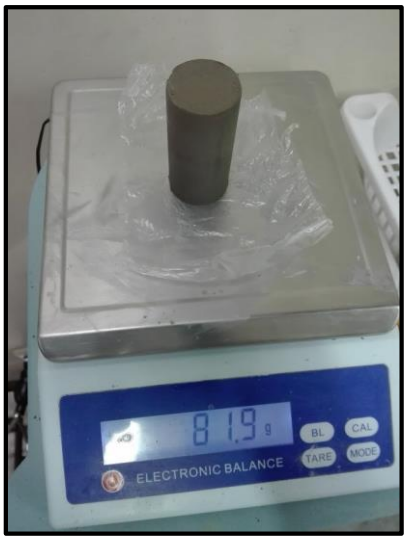


**Figura 29. Registro de peso inicial de probeta conformada**

**Fuente:** Propia, instalaciones del IEM-UCSP

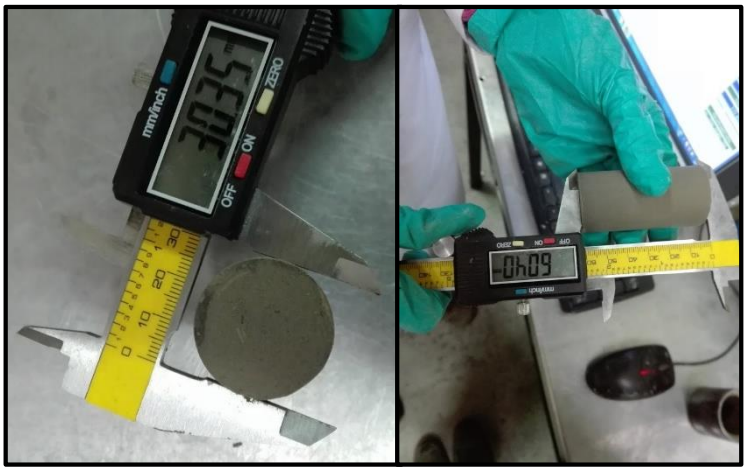


**Figura 30. Registro de medidas de probeta conformada (diámetro/altura=1/2)**

**Fuente:** Propia, instalaciones del IEM-UCSP

- El curado fue primeramente realizado a 80°C, por 48 horas en la Estufa Universal marca Memmert, modelo UN55; luego, las muestras se dejaron en una Incubadora Universal marca Memmert, modelo IF 110 a temperatura ambiente y humedad controlada **(Figura 31 y Figura 32)**.

**Figura 31. Estufa Memmert**

**Fuente:** Propia, instalaciones del IEM-UCSP

**Figura 32. Incubadora industrial Memmert**

**Fuente:** Propia, instalaciones del IEM-UCSP

### 3.5.1 Fabricación de morteros de cemento

Se fabricaron morteros de cemento a 1:1 y 1:2 (S:S) y 0.1 L/S con el fin de establecer la mejor relación de sólidos S:S para comparación entre las mezclas **(Tabla 14)**.

La cantidad de materiales para 18 especímenes (g), relación 0.1 L/S, será:

**Tabla 14. Diseño de mezcla para la fabricación de morteros de cemento**

| Relación Cemento / Arena | 1:1 | 1:2 |
|---|---|---|
| **Cemento** | 838.8 | 559.2 |
| **Arena** | 838.8 | 1118.4 |
| **Agua** | 167.76 | 167.76 |

**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 33. Pre-curado en estufa de probetas de cemento (CY)**

**Fuente:** Propia, instalaciones IEM-UCSP

**Figura 34. Curado de morteros de cemento (CY)**

**Fuente:** Propia, instalaciones IEM-UCSP

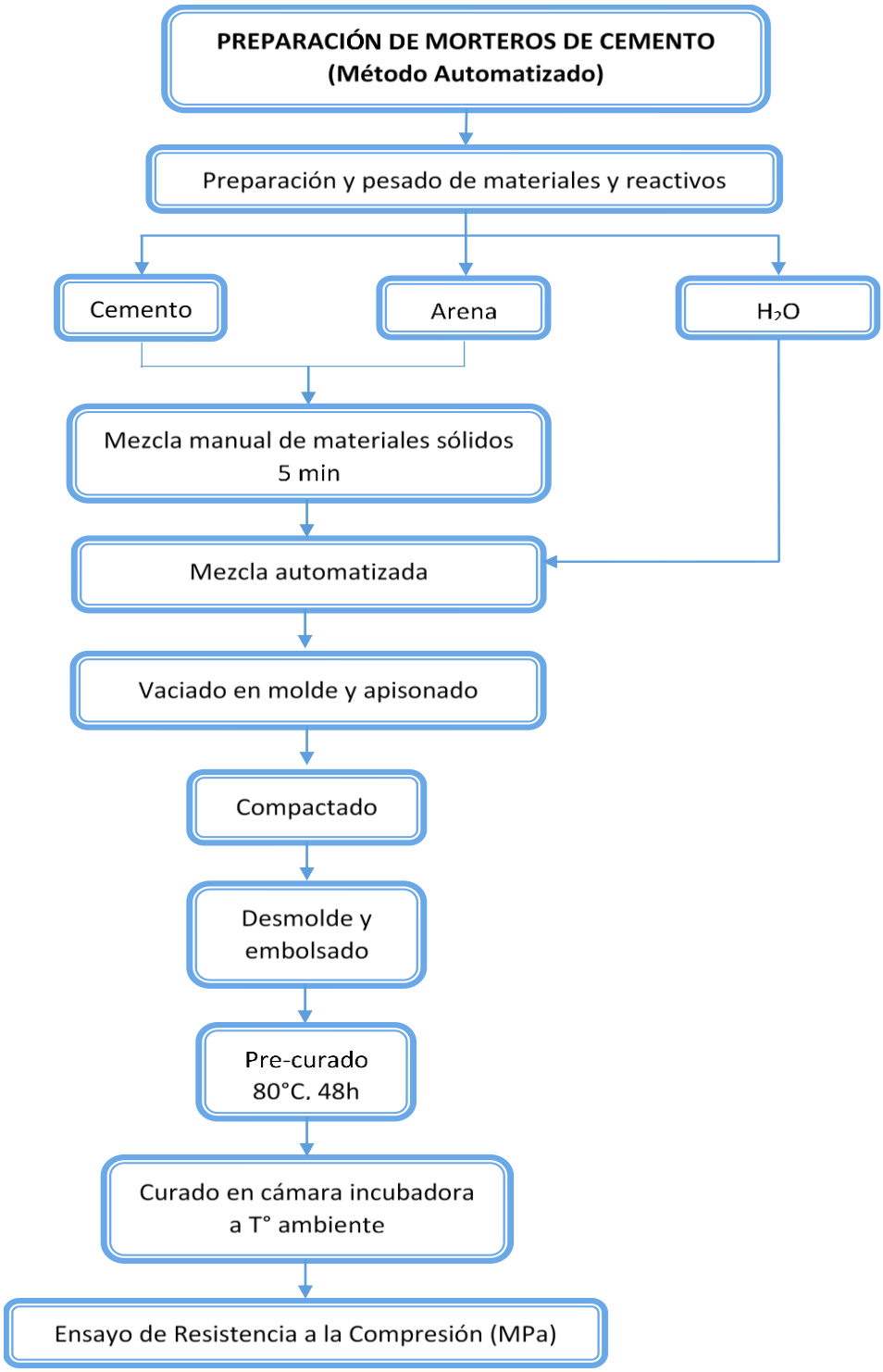


**Figura 35. Procedimiento de preparación de morteros de cemento por el método de compactado en molde pistón**

**Fuente:** Elaboración propia

### 3.5.2 Fabricación de morteros geopoliméricos

A partir de la definición de las mejores condiciones para fabricación de morteros de cemento por el método automatizado (1:1 S:S, 0.1 L/S), se fabricaron especímenes utilizando agregado fino local, utilizando también el método de mezclado automático, compactado en molde pistón y curado a condiciones controladas de laboratorio (Camacho Torres, 2018a; Pérez Huamaní, 2018).

Para la fabricación de los morteros geopoliméricos, se utilizó como material precursor la ceniza molida del volcán Ubinas (CV) y se empleó arena local como agregado (AL). Las soluciones activadoras fueron hidróxido de sodio a 12M e hidróxido de sodio 12M con adición de silicato de sodio (75% - 25%) (Pérez Huamaní, 2018). En la **Tabla 15** se muestran el diseño de mezclas empleadas, así como la cantidad (g) para la fabricación de un espécimen por tipo de mortero geopolimérico.

**Tabla 15. Diseño de mezcla para fabricación de morteros geopoliméricos con agregado fino local**

| Tipo de Agregado | Relación L/S | Relación S:S | Ceniza (g) | Agregado fino (g) | Activador NaOH (g) | $Na_2SiO_3$ (g) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Arena Fina | 0.1 | 1:1 | 46 | 46 | 9.2 | - |
| | | | 46 | 46 | 6.9 | 2.3 |

**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 36. Conformación de mortero geopolimérico en molde pistón**

**Fuente:** Propia, instalaciones IEM-UCSP

**Figura 37. Morteros geopoliméricos de ceniza volcánica y agregado fino local (CV-AL- NaOH)**

**Fuente:** Propia, instalaciones IEM-UCSP

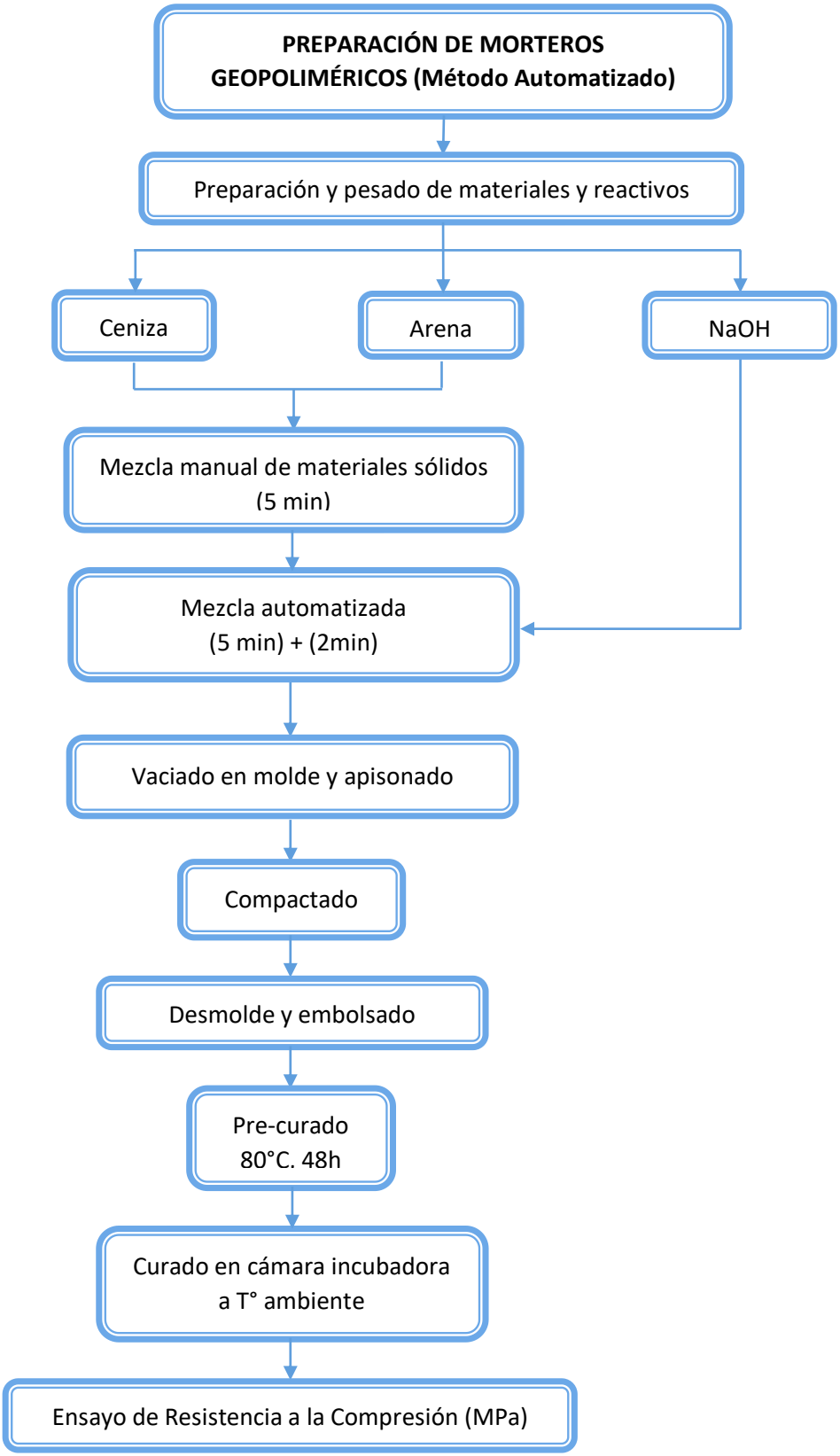


**Figura 38. Procedimiento de preparación de morteros geopoliméricos por el método de compactado en molde pistón**

**Fuente:** Elaboración propia

### 3.5.3 Caracterización de morteros de cemento y morteros geopoliméricos

Para la caracterización de los morteros, se tomaron en cuenta las propiedades mecánicas (ensayo de resistencia a la compresión), físicas (absorción, densidad aparente y densidad real) y propiedades estructurales (DRX) y morfológicas (SEM/EDX).

- **Difracción de rayos X (DRX):**

Los patrones de DRX de los morteros se obtuvieron de un difractómetro Bruker D8 Advance Davinci (modelo FQ5060F) utilizando radiación de Cu Ka. Los patrones de difracción fueron recolectados de 10° a 80° en el ángulo 2Θ a una velocidad de barrido de 2°/60 seg.

- **SEM/EDX**

Para llevar a cabo el análisis microestructural de las interfaces desarrolladas en los morteros se empleó un microscopio electrónico de barrido de marca Hitachi (modelo SU8230), empleando un detector de electrones retrodispersados (BSE). Además, se pudo identificar la composición química semicuantitativa de los morteros con el analizador EDAX de espectroscopia de energía dispersiva de rayos X acoplado (EDX). Los análisis se efectuaron con un aumento de 5 kX.

#### 3.5.3.1 Ensayo de resistencia a la compresión

El comportamiento mecánico de un material es evaluado por el ensayo de resistencia a la compresión; este consiste en someter al material de estudio a un esfuerzo máximo ejercido en vertical, cuyas unidades se expresan en MPa (megapascales) soportados antes de deformarse, quebrarse o romperse.

$$1\ Pa = \frac{Newton}{Metro^2}$$

Los ensayos fueron realizados de acuerdo al procedimiento de la norma ASTM C39 "Método de Ensayo Normalizado para Resistencia a la Compresión de Especímenes Cilíndricos de Concreto" (C39/C39M-18, 2006) en la Máquina Hidráulica de Compresión marca ELE International.

**Figura 39. Máquina Hidráulica de Compresión ELE Interntational**

**Fuente:** Propia, instalaciones del IEM-UCSP

### 3.5.3.2 Absorción y Densidad

La absorción es la propiedad que posee un material para atraer y retener un líquido o un gas vapor, la cual fue determinada de acuerdo a la norma ASTM C-642 "Método de Ensayo Normalizado para Densidad y Absorción en Concreto Endurecido" (ASTM C 642-97, 2006).

El procedimiento del ensayo se detalla a continuación:

1. Los especímenes fueron sumergidos en agua a temperatura ambiente por 24 horas. Se procedió a colocar la probeta en las rejillas suspendida a la balanza y se anotó el peso sumergido en agua de cada probeta (Wi).

2. Después del tiempo indicado (24 horas), se retiró la probeta del agua y se dejó drenar por 1 minuto secando la humedad con un paño húmedo. Se anotó el peso saturado (Ws).

3. La probeta fue secada en estufa por un tiempo de 24 horas a una temperatura de 105 °C, se registró el peso seco (Wd).

4. Los cálculos se realizaron a partir de las siguientes fórmulas:

$$Absorción\ \left(\frac{Kg}{m^3}\right) = \left[\frac{(W_{s-}\ W_d)}{(W_{s-}\ W_i)}\right] x\ 1000$$

$$Absorción\ (\%) = \left[\frac{(W_{s-}\ W_d)}{W_d}\right] x\ 100$$

$$Densidad\ \frac{(Kg)}{m^3} = \left[\frac{W_d}{(W_{s-}\ W_i)}\right] x\ 1000$$

Dónde: Ws es el peso de la probeta saturada en agua

Wd es el peso de la probeta seca

Wi es el peso de la probeta sumergida en agua

También se determinó la densidad aparente de los morteros por la ecuación:

$$Densidad = \frac{m}{V}$$

Dónde: m es la masa

y V es el volumen del espécimen

**Figura 40. Ensayo de determinación de densidad por método de Arquímides**

**Fuente:** Propia, instalaciones del IEM-UCSP

### 3.5.3.3 Difracción de Rayos X:

- Se fracturó el mortero en trozos pequeños (0.5 cm, aproximadamente) hasta una cantidad de 50 g y se procedió a moler en el molino de bolas **(Figura 41)**.

- Con ayuda de un papel servilleta empapado con alcohol de 96°, se procedió a limpiar las rendijas del portamuestras, retirando todos los contaminantes o impurezas que pudiera encontrarse en las rendijas.

- El polvo obtenido de la molienda fue colocado en el portamuestras circular del equipo difractómetro de rayos X y, con ayuda de una espátula, se distribuyó uniformemente por el área superior del portamuestras, dando pequeños golpes con una varilla para que el material de análisis ocupe todos los espacios disponibles **(Figura 42)**.

**Figura 41. Mortero fracturado en trozos**

**Fuente:** Propia, instalaciones de Laboratorio de microscopía electrónica-UNI

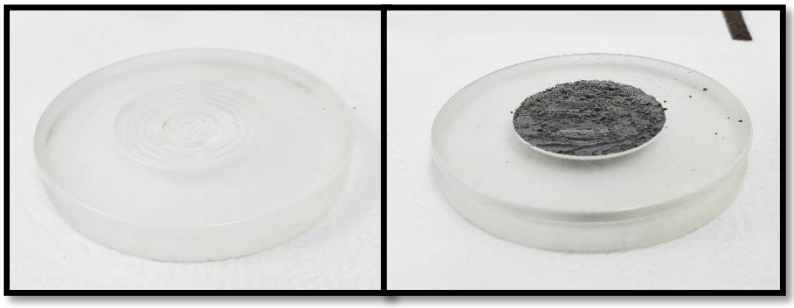

**Figura 42. Disposición de la muestra en porta-muestras de Difractómetro de Rayos X**

**Fuente:** Propia, instalaciones de Laboratorio de microscopía electrónica-UNI

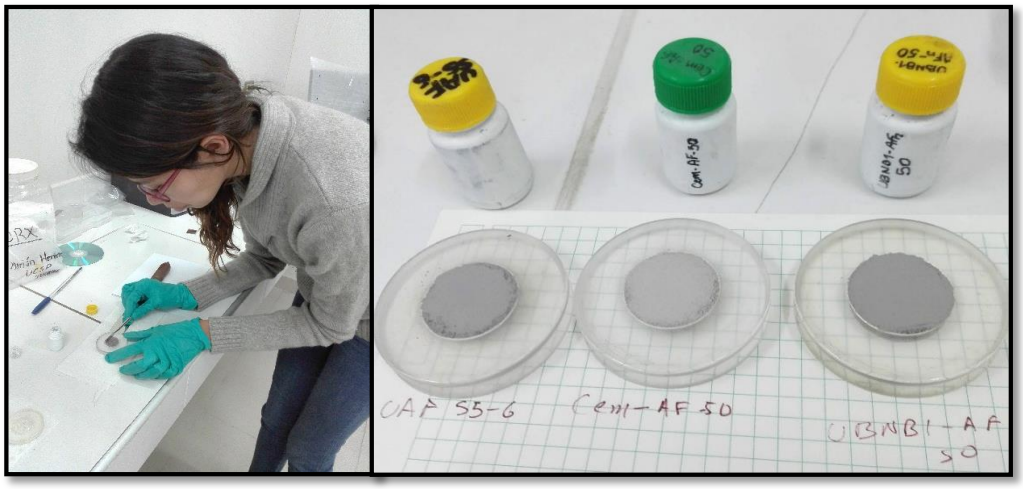


**Figura 43. Preparación de las muestras de morteros para el ensayo de Difracción de Rayos X**

**Fuente:** Propia, instalaciones de Laboratorio de microscopía electrónica-UNI

### 3.5.3.4 Microscopía electrónica de Barrido:

- Para la preparación de la muestra, se fracturó el mortero en pequeñas briquetas de forma regular y base estable.

-Se colocó la muestra en el portaobjetos circular del microscopio electrónico de barrido y se calibró la configuración de la programación. Se esperó a que seque la humedad contenida en el material.

- Una vez generado el vacío dentro de la cámara del portaobjetos, se ajustó el aumento y se tomaron las capturas respectivas de los puntos de interés.

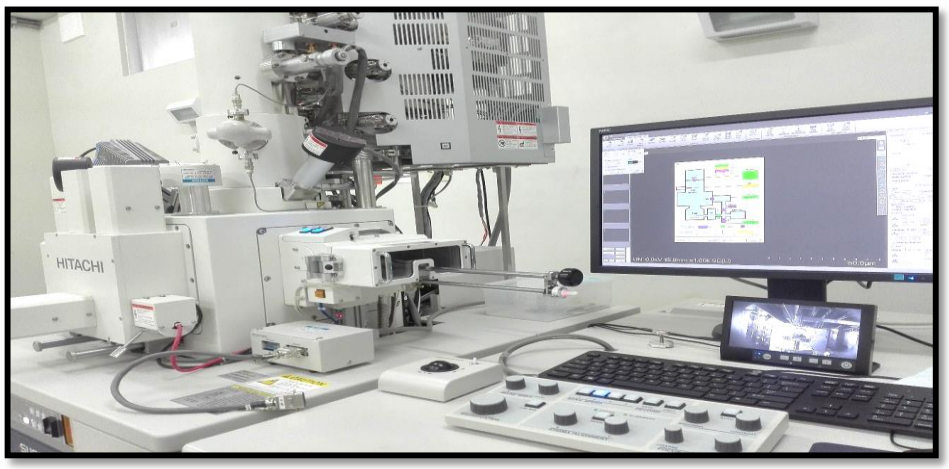


**Figura 44. Microscopio Electrónico de Barrido**

**Fuente:** Propia, instalaciones de Laboratorio de microscopía electrónica-UNI

# CAPÍTULO 4

# RESULTADOS Y DISCUSIÓN

## 4.1 Determinación de la mejor relación S:S en morteros de cemento y agregado fino por método automatizado

La fabricación de los morteros de cemento con agregado fino a diferentes relaciones S:S permite determinar la mejor configuración de mezcla con fines comparativos para todos los morteros desarrollados en el presente trabajo. Los otros factores que influyen en el desempeño de morteros geopoliméricos, tales como relación L/S (0.1), activador alcalino (hidrpoxido de sodio), molaridad del activador (12 M), relación de la solución de hidróxido de sodio con respecto al silicato de sodio (75% - 25%), fueron determinados en estudios previos haciendo uso del mismo material precursor que en la presente investigación: ceniza del volcán Ubinas (Camacho Torres, 2018b; Pérez Huamaní, 2018).

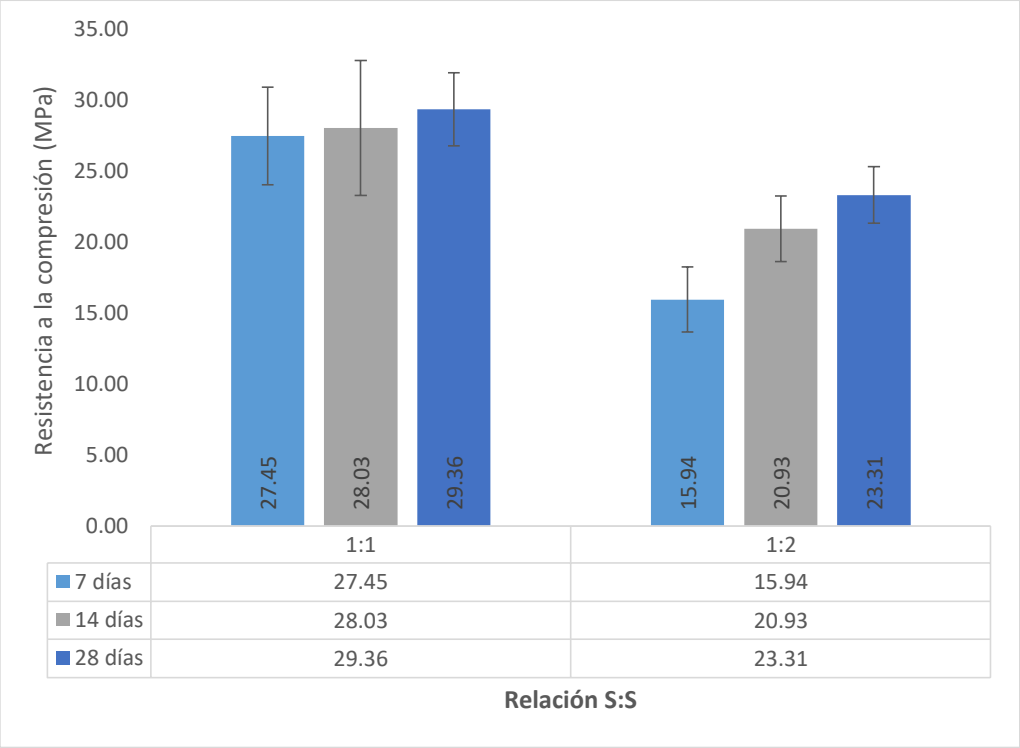


**Figura 45. Resistencia a la compresión de morteros de cemento CY y agregado fino a diferentes relaciones S:S**

**Fuente:** Elaboración propia

En la **Figura 45** se muestran los resultados de resistencia a la compresión de morteros de cemento tanto para la relación S:S de 1:1 como para la de 1:2. En ella se establecen diferencias de resistencias a los 7. 14 y 28 días de estudio para los diferentes grupos, siendo el grupo de morteros a 1:1 (S:S) los que presentan mejor desempeño en cuanto a resistencia a la compresión hasta el día 28 de ensayo.

Como lo indica Gutiérrez de López (2003), para diseñar morteros de alta resistencia se debe tener en cuenta que para un mismo cemento y un mismo tipo de agregado fino, el mortero más resistente y más impermeable será aquel que contenga mayor contenido de cemento para un volumen dado de mortero. Lo cual se confirma con los resultados del presente estudio, en donde se observan mayores resistencias a la compresión a 7, 14 y 28 días (27.45, 28.03 y 29.36 MPa, respectivamente) en morteros de cemento de 1:1 (S:S); mientras que los morteros de relación S:S de 1:2 muestran resistencias de 15.94, 20.93 y 23.31 a los 7, 14 y 28 días, respectivamente.

En estudios anteriores, examinaron el efecto de diferentes agregados a la proporción de aglutinante (relación 0.3, 0.6) sobre el desarrollo de la resistencia a la compresión de GPM a partir de sistemas usando fibra de carbono como material precursor y agregado fino. El aumento en la resistencia pareció ser directamente proporcional a la relación entre sólidos; esto contrasta con las relaciones del presente estudio (0.3 y 0.5) correspondientes a las proporciones 1:2 y 1:1 (Vasconcelos et al., 2013).

## 4.2 Evaluación de las propiedades mecánicas, físicas y microestructurales de morteros

### 4.2.1 Propiedades mecánicas: Resistencia a la compresión

Como se puede apreciar en la **Tabla 16**, los morteros de cemento CY obtuvieron un promedio de resistencia a la compresión de 29.36 MPa a los 28 días de fabricación con el método automatizado previamente descrito y condiciones de pre-curado de 80°C por 48 horas y luego a temperatura controlada en incubadora. La resistencia de morteros geopoliméricos basados en cenizas volcánicas mostró comportamiento mecánico similar con respecto a los de cemento, presentando una ligera disminución de resistencia a la compresión a los 28 días de curado con un promedio reportado de 24.59 MPa.

**Tabla 16. Valores de resistencia a la compresión (MPa) a 7, 14 y 28 días de ensayo**

| Precursor | Solución Activadora | Resistencia a la compresión (MPa) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 7 días | Desv. Est. | 14 días | Desv. Est. | 28 días | Desv. Est. |
| CY + AL | $H_2O$ | 27.45 | 3.44 | 28.03 | 4.77 | 29.36 | 2.57 |
| CV + AL | Na(OH) | 27.49 | 8.91 | 27.57 | 6.28 | 24.59 | 1.73 |
| | Na(OH) + $Na_2SiO_3$ | 17.46 | 6.69 | 12.67 | 2.62 | 14.15 | 2.33 |

*L/S = 1:1 y S:S = 1:1*

**Fuente:** Elaboración propia

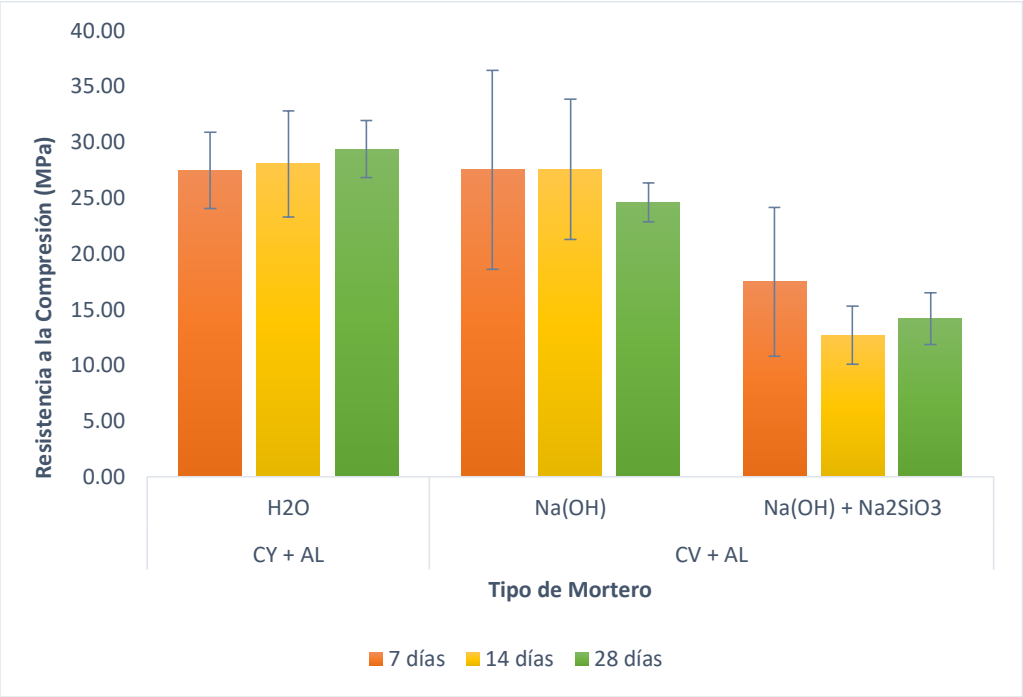


**Figura 46. Resistencia a la compresión de morteros de cemento CY y morteros geopoliméricos MGP alcalinamente activados**

**Fuente:** Elaboración propia

En la **Figura 46**, se puede observar que la resistencia a la compresión que presentaron los morteros fabricados a partir de ceniza volcánica activada alcalinamente con NaOH y $Na_2SiO_3$ (75% - 25%) obtuvieron resistencias más bajas que el grupo de morteros de cemento, alcanzando un promedio de 14.15 MPa a los 28 días de curado. Los grupos de morteros geopoliméricos por día de ensayo presentan desviaciones estándar que sugieren una estabilizándose de la resistencia a la compresión a lo largo del tiempo. La resistencia a la compresión de los polímeros depende de la resistencia del gel geopolimérico con el agregado y, hasta cierto punto del agregado en sí mismo. Los resultados sugieren que existe una variación negativa de la resistencia a la compresión entre los morteros geopoliméricos desarrollados con activador alcalino NaOH a comparación de los desarrollados con NaOH con adición de Silicato de Sodio, debido a la interacción química íntima de los materiales que conforman los morteros (Temuujin, van Riessen, & MacKenzie, 2010). Este comportamiento mecánico podría deberse en parte a la composición de la arena con el alto contenido de sílice al 70.72 % ($SiO_2$) que presenta el agregado fino, el cual dejaría a parte de la solución activadora sin reaccionar con los componentes sólidos.

### 4.2.2 Propiedades físicas: Absorción, densidad aparente y densidad real

**Tabla 17. Propiedades físicas de los morteros fabricados**

| Tipo de Mortero | Activador | Absorción % | Densidad Aparente (g/cm3) | Densidad Arquímedes ($g/cm^3$) |
|---|---|---|---|---|
| **CY + AL** | H2O | 11.66 | 1.96 | 1.84 |
| **CV + AL** | Na(OH) | 12.64 | 1.95 | 1.80 |
| | Na(OH) + Na2SiO3 | 12.96 | 1.92 | 1.74 |

**L/S = 1:1 y S:S = 1:1*

**Fuente:** Elaboración propia

Para diseñar morteros de alta resistencia se debe tener en cuenta que para un mismo cemento y un mismo tipo de agregado fino, el mortero más resistente y más impermeable será aquel que contenga mayor contenido de cemento para un volumen dado de mortero;

y que para un mismo contenido de cemento en un volumen determinado de mortero el más resistente y probablemente el más impermeable será aquel mortero que presente mayor densidad, o sea aquel que en la unidad de volumen contenga el mayor porcentaje de materiales sólidos (Gutiérrez de López, 2003).

Los morteros geopoliméricos obtenidos a partir de la activación alcalina de la ceniza volcánica absorbieron más agua que los morteros de cemento. Generalmente, la absorción de agua se relaciona con los valores de porosidad aparente (PA). Ambas propiedades están relacionadas con la presencia de poros abiertos y cerrados en las muestras de morteros. La presencia de tales cavidades vacías se debe principalmente a la liberación de agua libre que proviene del agua que no ha participado de la reacción (Djobo, Elimbi, Tchakouté, & Kumar, 2016).; por lo tanto, debido a los resultados de absorción de agua, se puede sugerir que para los morteros geopoliméricos, la geopolimerización fue mayor para los desarrollados con activación alcalina con solamente NaOH y fue dado en menor medida en los que fueron activados con solución alcalina de NaOH adicionado con silicato de sodio **(Figura 47)**.

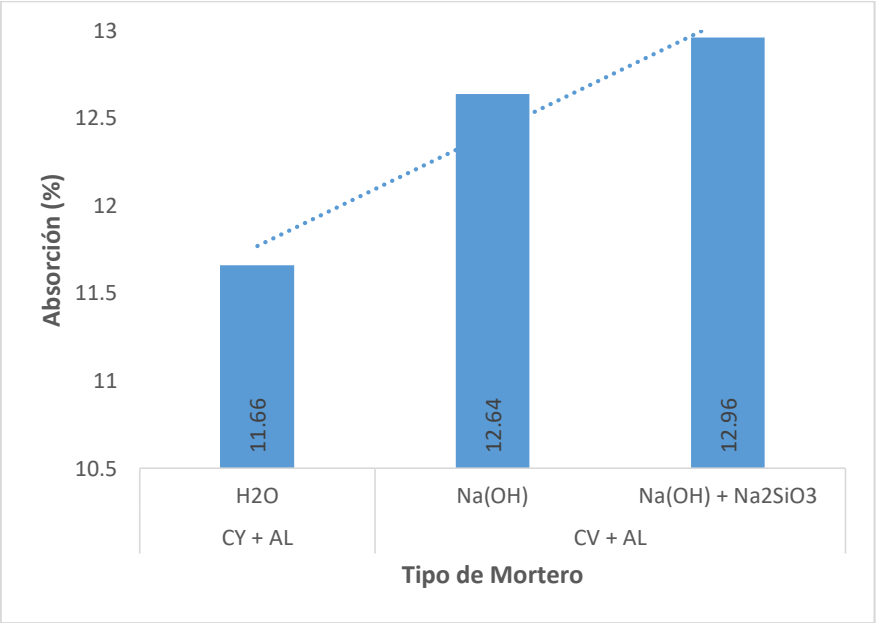


**Figura 47. Absorción de morteros de cemento (CY) y morteros geopoliméricos (CV+AL)**

**Fuente:** Elaboración propia

Al reportar la densidad de los morteros, se hace evidente una proporcionalidad inversa en cuanto a los resultados de absorción (relacionada con la porosidad). En este caso, la configuración de mezcla que presenta mayor densidad es la conformada por CY+AL **(Figura 48)**.

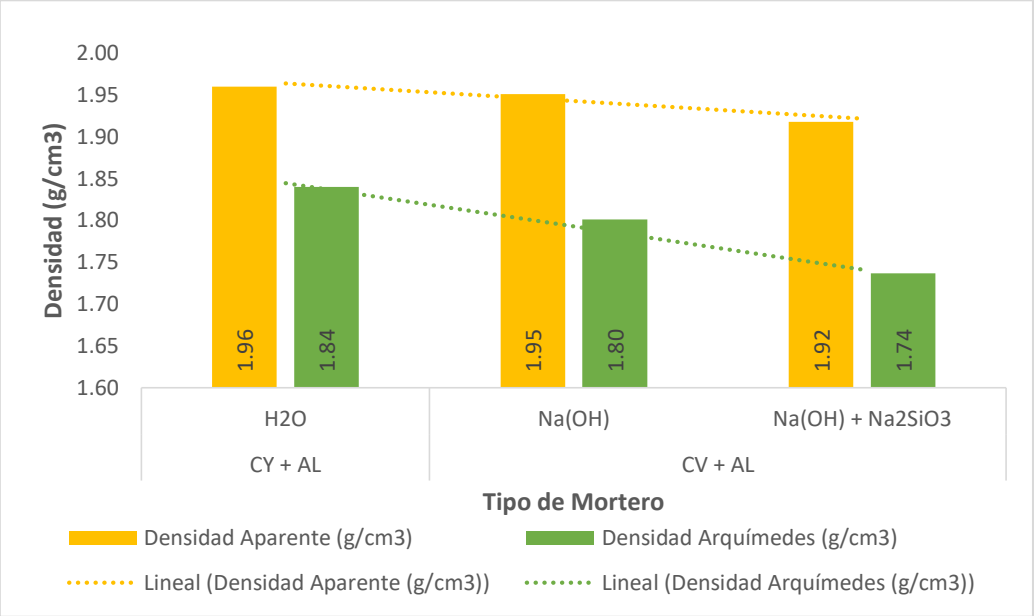


**Figura 48. Densidad aparente y densidad real (por método de Árquímides) de morteros de Cemento (CY) y morteros geopoliméricos (CV + AL)**

**Fuente:** Elaboración propia

Es bien sabido que la densidad generalmente disminuye cuando aumenta la porosidad y viceversa. Por lo tanto, la menor densidad registrada en el grupo CV+AL+NaOH+$Na_2SiO_3$ está relacionada con el aumento de la porosidad aparente como se observó anteriormente **(Figura 47)**. Además, esto también puede deberse a la pérdida de agua adicional que no ha reaccionado durante la geopolimerización, lo que hace que la muestra sea más ligera con el tiempo. Esto se explica de acuerdo a la similitud que existe entre la densidad y la resistencia a la comprensión que manifiesta Gálvez (2018) donde, si se tiene un mortero cuya resistencia sea alta es probable que sea muy denso, y si se tiene un mortero con resistencia baja, posiblemente también tenga una densidad baja, es decir que ambas propiedades son directamente proporcionales (Galvez Escalante, 2018).

### 4.2.3 Propiedades estructurales y morfológicas:

#### 4.2.3.1 Difracción de rayos X

La presencia de los cementos hidratados típicos de un cemento Portland, son fácilmente detectables por DRX.

En la **Figura 49** se manifiesta en °34.1 y °18.1 la formación de picos característicos de los principales compuestos hidratados de pastas de cemento Portland. De acuerdo a ello, se trataría de la presencia de la fase de $Ca(OH)_2$ o portlandita en los morteros de cemento desarrollados (Blanco, Puertas, Vázques, & De la Fuente, 1992).

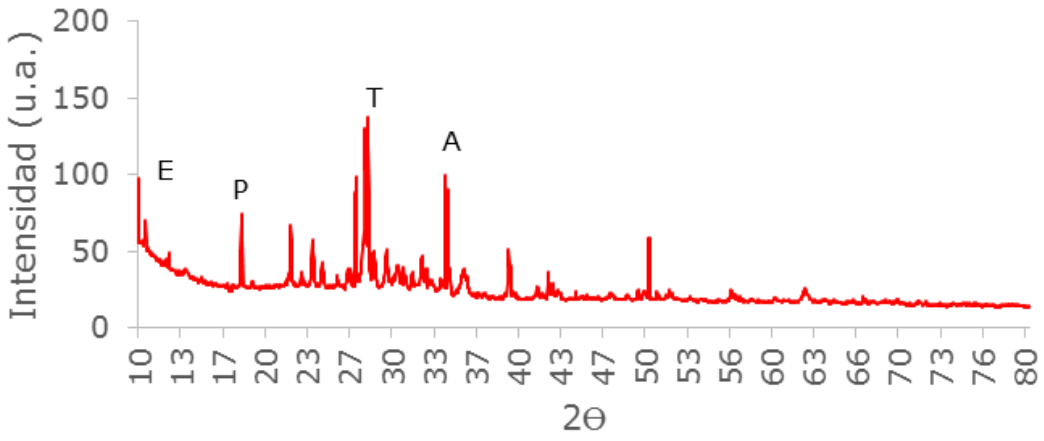


**Figura 49. Patrón DRX de mortero de cemento Cem+AF+$H_2O$**

**Fuente:** Elaboración propia

También está ampliamente investigada la presencia de $CaCO_3$ en el cemento hidratado. Existen tres formas polimórficas cristalinas en las que se puede encontrar el carbonato cálcico correspondiente a hormigones de cemento Portland carbonatado: calcita, aragonito y vaterita. La forma cristalina en la que aparecen es en función relativa de las condiciones ambientales a las que está expuesto (humedad) (Blanco et al., 1992).

Takemoto y Sekiya mencionan que el $CaCO_3$ en cementos Portland expuestos a alta humedad (>90 %) se encuentra en forma de calcita y si la humedad relativa es baja (40 – 50 %) estará en forma de aragonito. Del mismo modo, Takagi et al. afirman que en hormigones de cemento Portland la formación de vaterita y aragonito puede ser simultánea por la absorción de $CO_2$ ambiental (Takemoto & Saiki, 1962).

De acuerdo a las líneas de difracción del patrón de la **Figura 49**, se pueden apreciar picos en °27.1, °32.8 y °50.1 que corresponderían a la forma cristalina de la vaterita (Blanco et al., 1992).

Los patrones de los morteros geopoliméricos sintetizados muestran las mismas fases cristalinas que la ceniza volcánica. Los principales cambios observados corresponden a la intensidad de los picos de todas las fases cristalinas localizadas entre 21° y 38° (2Θ). La **Figura 50** muestra que el mortero geopolimérico CV+AL+NaOH es prevalentemente de características amorfas, determinando la presencia de estructuras mineralógicas como andesina, augita y anortita en menor intensidad con respecto al material precursor inicial.

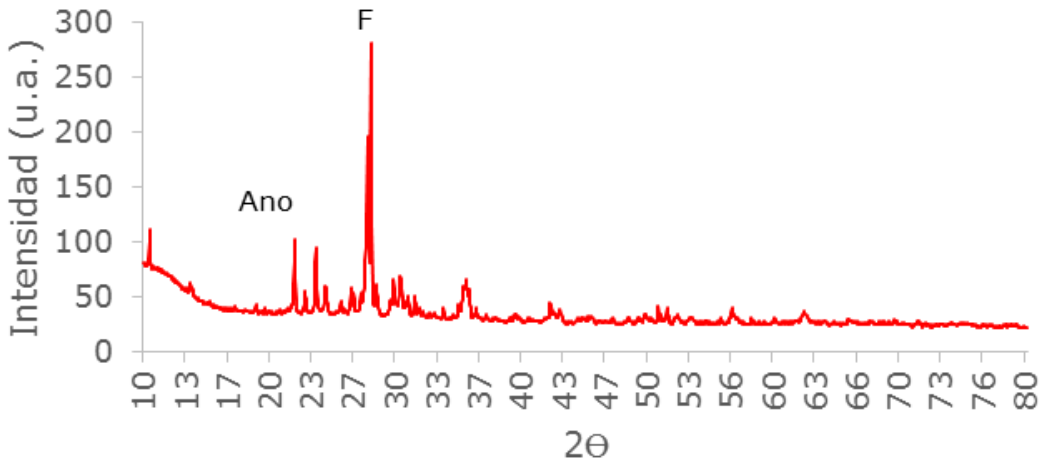


**Figura 50. Patrón DRX de mortero geopolimérico CV+AL+NaOH**

**Fuente:** Elaboración propia

La **Figura 51** muestra que el mortero geopolimérico CV+AL+NaOH+$Na_2SiO_3$ muestra picos de menor intensidad que en el caso anterior (CV+AL+NaOH), determinando la presencia de estructuras mineralógicas como andesina, óxido de silicio y diopside. Esto indicaría que existe un efecto en la disolución de la ceniza volcánica, el agregado y el activador alcalino adicionado con silicato de sodio que influye directamente en la reactividad del material y, por defecto, en las propiedades mecánicas (resistencia a la compresión) y físicas ( absorción y densidad) del especímen.

Esta disminución de la fase amorfa después de la geopolimerización puede deberse a su recristalización parcial. Aunque no se observó ningún pico nuevo a los 80 °C de curado, se debe tener en cuenta que cuando se utilizan temperaturas elevadas para la síntesis de

geopolímeros, puede producirse la cristalización parcial de la fase amorfa en minerales de zeolita, principalmente cuando se utiliza la concentración de hidróxido de sodio como activador (Lemougna, Melo, Delplancke, & Rahier, 2014). Según Zhang et al., la presencia de silicato soluble en el activador dificulta la reorganización de la estructura local de los geles de geopolímero y también suprime o retrasa la formación de zeolitas o pre cursores de zeolita (Z. Zhang, Provis, Wang, Bullen, & Reid, 2013). Por lo tanto, es probable que tales minerales estén presentes en la muestra curada, pero en pequeña cantidad y por debajo del límite de detección del equipo.

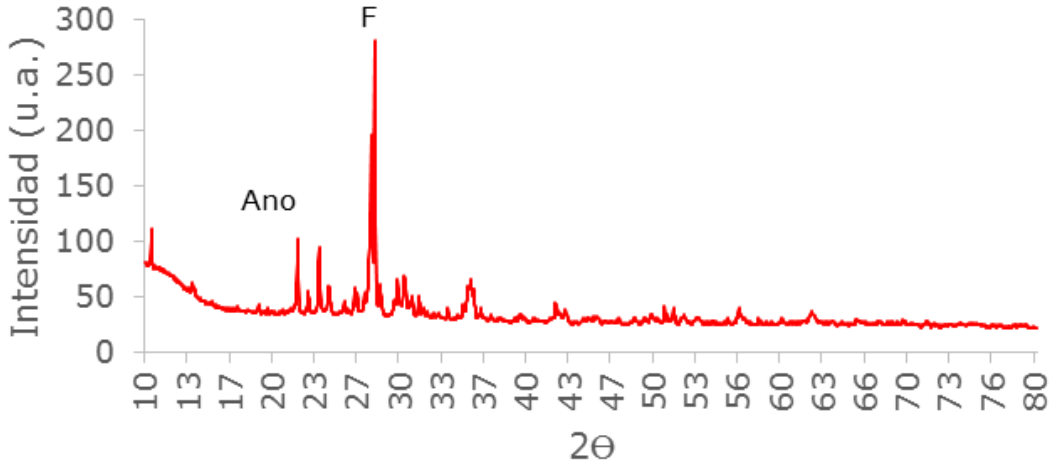


**Figura 51. Patrón DRX de mortero geopolimérico CV+AL+$Na_2SiO_3$**

**Fuente:** Elaboración propia

#### 4.2.3.2 Microscopía electrónica de barrido (SEM/EDX)

En la **Figura 52** se observa la imagen SEM de una muestra pulida de mortero de cemento endurecido. Se pueden apreciar superficies lisas y continuas pero también la presencia de poros discontinuos y zonas claras  El mapeo elemental usando el espectro dispersivo de energía (EDS) de dos puntos seleccionados se muestran en las **Figura 52-1** y **Figura 52-2**, en los cuales se pueden observar claras diferencias del porcentaje de elementos presentes que corresponden a los materiales precursores y agregados utilizados. La **Figura 52-1** parece presentar una leve cantidad de fibras elongadas, lo que sugiere la formación de compuestos carbonatados que representan una menor conectividad entre el material cementante y el material agregado, lo que implica una menor resistencia a la compresión. La **Figura 52-2** evidencia la presencia de un gel mucho más denso que presenta zonas irregulares de reacción.

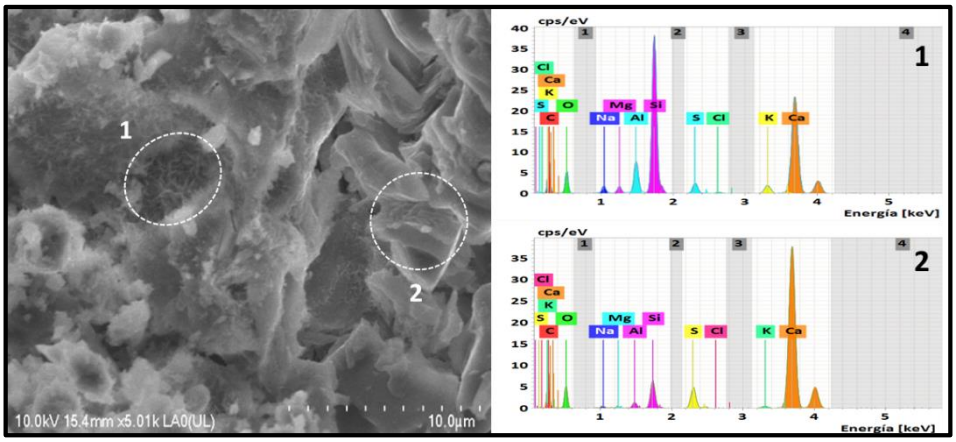


**Figura 52. Microfotografía SEM y mapeo de composición de fase, usando análisis EDS de mortero de cemento**

**Fuente:** Elaboración propia

La microfotografía SEM del mortero de CV+AL+NaOH se presenta en la **Figura 53**, mostrando una microestructura densa. Existe un vínculo íntimo entre el agregado y el aglutinante geopolimérico. No se observaron grietas a lo largo de la interfaz, lo que sugiere un enlace fuerte. Una inspección minuciosa de la región interfacial sugiere que se podría haber producido una disolución parcial de la superficie agregada produciendo una interfaz suave. En este especímen se observa la posibilidad de disolución parcial del agregado de arena, conformando el mortero geopolimérico. Las superficies elevadas del fondo se tratarían de material de agregado que no ha reaccionado por completo.

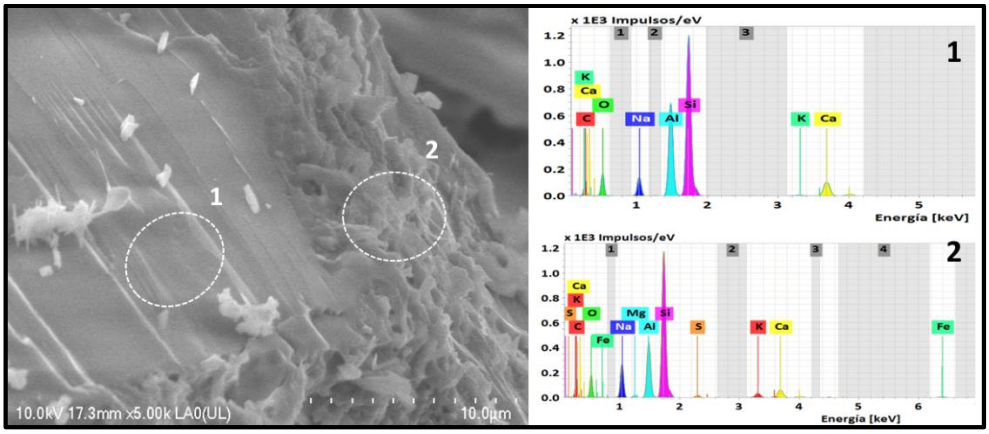


**Figura 53. Microfotografía SEM y mapeo de composición de fase, usando análisis EDS de mortero geopolimérico CV+AL+NaOH**

**Fuente:** Elaboración propia

Cuando se añaden los activadores alcalinos, gran parte de las partículas se disuelven y muchas otras, no. Las partículas que se disuelven forman una matriz que contiene los productos de reacción. Cuando solifica el material, la reacción continúa en la superficie de aquellas partículas que no se disolvieron formando un anillo de reacción en estado sólido alrededor de ellas. Estos anillos indican que una vez que el material solidificó los activadores continúan atacando la superficie de las partículas y la reacción de geopolimerización continúa (Kupwade-Patil et al., 2016) . Es posible que el agregado que no está íntimamente ligado al activador, esté aún en proceso de reacción.

En la imagen SEM de la muestra de mortero geopolimérico de ceniza volcánica y agregado fino local activado alcalinamente con NaOH y adición de Na2SiO3, se puede observar que la matriz no es homogénea y que existen partículas de ceniza y agregado que no han participado de la reacción. También se pudieron observar estructuras cristalinas con forma de aguja, posiblemente atribuido a la formación de carbonatos **(Figura 54)**, los cuales influyen negativamente en la resistencia a la compresión.

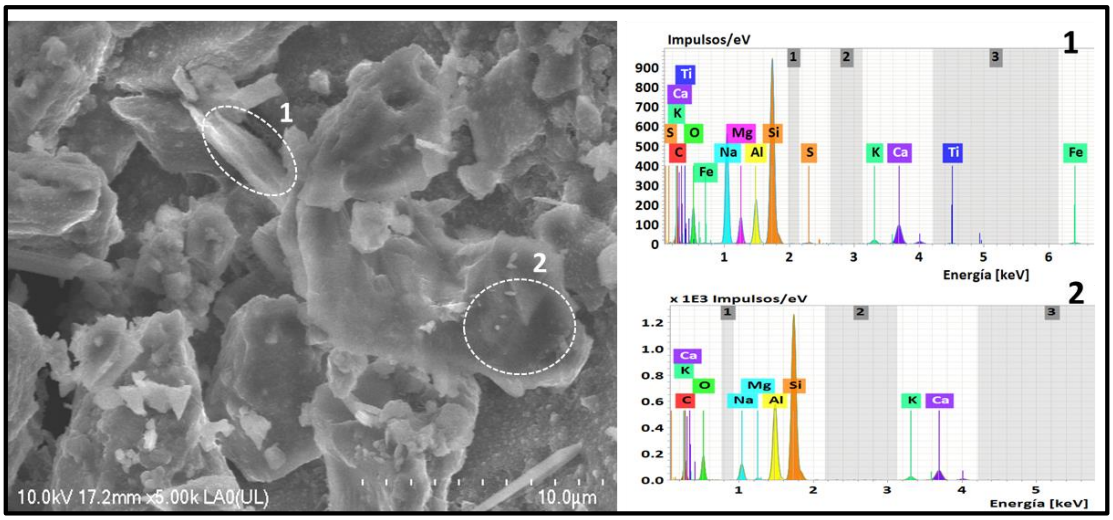


**Figura 54. Microfotografía SEM y mapeo de composición de fase, usando análisis EDS de mortero geopolimérico CV+AL+NaOH+$Na_2SiO_3$**

**Fuente:** Elaboración propia

# CONCLUSIONES

1. Es posible sintetizar morteros geopoliméricos a partir de ceniza volcánica (CV) y agragado fino local (AL), activados alcalinamente por hidróxido de sodio (NaOH) e hidróxido de sodio con adición de silicato de sodio (NaOH + $Na_2SiO_3$), empleando el método de compactación en molde pistón con curado a 80 °C por 48 horas y permanencia en cámara incubadora. Del mismo modo, se utilizó el método de compactación por molde pistón para la conformación de morteros de cemento con las mismas relaciones L/S de 0.1, S:S de 1:1 y altura/diámetro de 2.

2. Se logró verificar que la resistencia a la compresión del mortero geopolimérico activado alcalinamente con hidróxido de sodio obtiene resistencias de 27.49, 27.57 y 24.59 MPa a los 7, 14 y 28 días de ensayo, respectivamente, encontrándose por encima de la norma para morteros NTP 334.051.

3. Los morteros geopoliméricos activados alcalinamente con adición de silicato de sodio presentaron resistencias de 12.67, 14.15 y 17.46 MPa a los 7, 14 y 28 días de ensayo, respectivamente; evidenciando características poco resistentes y con amplias diferencia de los criterios de la norma.

4. La corroboración de los datos fueron realizados con el método propuesto para el mortero de cemento obteniendo resultados de 27.45, 28.03 y 29.36 MPa a los 7, 14 y 28 días de ensayo, respectivamente, por lo que el método de fabricación resulta ser eficiente.

5. La absorción de agua en morteros geopoliméricos obtenidos a partir de la activación alcalina de la ceniza volcánica fue mayor que la de los morteros de cemento (11.66%), se infiere que para los morteros geopoliméricos, la geopolimerización fue mayor para los desarrollados con activación alcalina con solamente NaOH (12.64 % de absorción) y fue dado en menor medida en los que fueron activados con solución alcalina de NaOH+$Na_2SiO_3$ (12.96 % de absorción).

6. Los morteros de CV+AL+NaOH+$Na_2SiO_3$ presentan una densidad de 1.74 g/cm$^3$, mientras que la de los morteros CV+AL+NaOH fue de 1.80 g/cm$^3$ y en el caso del mortero CY+AF+$H_2O$, este presentó una densidad de 1.84 g/cm$^3$. Se evidencia una proporcionalidad inversa de la densidad relacionada con la absorción.

7. Las propiedades micro-estructurales determinadas por DRX y SEM/EDS en los especímenes de morteros, evidencian la presencia de fases correspondientes a portlandita, andesina y anortita, con una matriz que posee superficies lisas, pero también con presencia de poros discontinuos que albergan estructuras elongadas posiblemente atribuido a la formación de carbonatos. Los morteros de CV+AL+NaOH poseen estructuras mineralógicas del tipo andesina, augita y anortita, con una matriz homogénea que sugiere un enlace fuerte entre los componentes reactantes. En los morteros de CV+AL+NaOH+$Na_2SiO_3$, pudo determinarse la presencia de estructuras mineralógicas como andesina, óxido de silicio y diopside, mientras que las microfotografías evidenciaron baja reactividad de los componentes por no tratarse de una matriz homogénea y la presencia de partículas de ceniza y agregado no reaccionantes. También se pudieron observar estructuras cristalinas con forma de agujas, correspondientes a la formación de carbonatos.

8. Se puede aseverar que el aprovechamiento de materiales disponibles en la naturaleza como la ceniza volcánica representan una alternativa para sintetizar morteros que podrían ser beneficiosos para el desarrollo de productos en el rubro industrial y ambiental.

# RECOMENDACIONES

- Realizar un estudio basado en el desempeño de morteros geopoliméricos a los largo del tiempo.
- Evaluar el deterioro por formación de carbonatos o ataque de sulfatos en morteros de geopolímero natural (CV) y morteros de cemento (CY).

# REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS


Aguilera, N. (1969). Panel sobre suelos derivados de cenizas volcánicas de América Latina. *Turrialba, Costa Rica*.

Aradóttir, Á., Petursdottir, T., Halldorsson, G., Svavarsdottir, K., & Arnalds, O. (2013). Drivers of ecological restoration: lessons from a century of restoration in Iceland. *Ecology and Society*, *18*(4).

Arel, H. Ş., & Anuk, D. (2014). Influences of metakaolin on the durability and mechanical properties of mortars. *Arabian Journal for Science and Engineering*, *39*(12), 8585–8592.

Armienta, M. A., De la Cruz-Reyna, S., Morton, O., Cruz, O., & Ceniceros, N. (2002). Chemical variations of tephra-fall deposit leachates for three eruptions from Popocatepetl volcano. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, *113*(1–2), 61–80.

ASOCEM, A. de P. de C. P. (2017). Reporte Estadístico 2017. Retrieved October 2, 2018, from http://www.asocem.org.pe/estadisticas-nacionales/reporte-estadistico--2017

ASOCRETO. (2009). Asociación Colombiana de Productores de Concreto. Retrieved January 29, 2018, from http://asocreto.org.co/Sitio2/

ASTM. (2017). Standard Specification for Portland Cement ASTM C150 / C150M. Retrieved from https://www.astm.org/Standards/C150

ASTM C 642-97. (2006). *Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete 1*. Retrieved from www.astm.org

Baxter, P. J., Ing, R., Falk, H., & Plikaytis, B. (1983). Mount St. Helens Eruptions: The Acute Respiratory Effects of Volcanic Ash in a North American Community. *Archives of Environmental Health: An International Journal*, *38*(3), 138–143. https://doi.org/10.1080/00039896.1983.10543994

Benhelal, E., Zahedi, G., Shamsaei, E., & Bahadori, A. (2013). Global strategies and potentials to curb CO2 emissions in cement industry. *Journal of Cleaner Production*, *51*, 142–161. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2012.10.049

Bernal, S. A., Provis, J. L., Rose, V., & Mejía de Gutierrez, R. (2011). Evolution of binder structure in sodium silicate-activated slag-metakaolin blends. *Cement and Concrete Composites*, *33*(1), 46–54. https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2010.09.004

Blanco, M. T., Puertas, F., Vázques, T., & De la Fuente, A. (1992). Técnicas y métodos más adecuados para la identificación del cemento aluminoso y de cemento de base portland en hormigones. *Materiales de Construcción*, *42*(228). Retrieved from http://materconstrucc.revistas.csic.es

Blong, R. J. (2013). *Volcanic hazards: a sourcebook on the effects of eruptions*. Elsevier.

C39/C39M-18, A. (2006). Método de Ensayo Normalizado para Resistencia a la Compresión de Especímenes Cilíndricos de Concreto. Retrieved from https://www.astm.org/Standards/C39C39M-SP.htm

Camacho Torres, J. J. (2018a). *Estudio técnico y económico de un nuevo material para*

*uso potencial en construcción, obtenido a partir de ceniza del Volcán Ubinas*. Universidad Católica San Pablo.

Camacho Torres, J. J. (2018b). *Estudio técnico y económico de un nuevo material para uso potencial en construcción, obtenido a partir de ceniza del Volcán Ubinas*. Universidad Católica San Pablo. Retrieved from http://repositorio.ucsp.edu.pe/bitstream/UCSP/15605/1/CAMACHO_TORRES_JUA_EST.pdf

Cangemi, M., Speziale, S., Madonia, P., D'Alessandro, W., Andronico, D., Bellomo, S., … Kyriakopoulos, K. (2017). Potentially harmful elements released by volcanic ashes: Examples from the Mediterranean area. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, *337*, 16–28.

Censi, P., Randazzo, L. A., Zuddas, P., Saiano, F., Aricò, P., & Andò, S. (2010). Trace element behaviour in seawater during Etna's pyroclastic activity in 2001: Concurrent effects of nutrients and formation of alteration minerals. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, *193*(1–2), 106–116.

Concretos Supermix. (n.d.). Agregados para la elaboración de concreto. Retrieved October 13, 2018, from https://www.supermix.com.pe/agregados-para-la-elaboracion-de-concreto/

Coppiano Gutiérrez, I. J. (2016). *Uso de ceniza volcánica como puzolana natural en mezclas de hormigón*. Universidad de Especiaidades Espíritu Santo. Retrieved from http://repositorio.uees.edu.ec/handle/123456789/550

Crespo Escobar, S. (2009). *Materiales de construcción para edificación y obra civil*. Retrieved from https://books.google.com.pe/books?hl=es&lr=&id=Jis5DwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA3&dq=Materiales+de+construcción+para+edificación+y+obra+civil&ots=VAJ8YeoUCq&sig=R_BZPYhlY_9vwxOaQiWbSDIUXpo#v=onepage&q=Materiales de construcción para edificación y obra civil&f=fal

Cronin, S. J., Neall, V. E., Lecointre, J. A., Hedley, M. J., & Loganathan, P. (2003). Environmental hazards of fluoride in volcanic ash: a case study from Ruapehu volcano, New Zealand. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, *121*(3), 271–291.

Cronin, S. J., & Sharp, D. S. (2002). Environmental impacts on health from continuous volcanic activity at Yasur (Tanna) and Ambrym, Vanuatu. *International Journal of Environmental Health Research*, *12*(2), 109–123. https://doi.org/10.1080/09603120220129274

Cronin, S. J., Stewart, C., Zernack, A. V, Brenna, M., Procter, J. N., Pardo, N., … Irwin, M. (2014). Volcanic ash leachate compositions and assessment of health and agricultural hazards from 2012 hydrothermal eruptions, Tongariro, New Zealand. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, *286*, 233–247.

Cuoco, E., Tedesco, D., Poreda, R. J., Williams, J. C., De Francesco, S., Balagizi, C., & Darrah, T. H. (2013). Impact of volcanic plume emissions on rain water chemistry during the January 2010 Nyamuragira eruptive event: implications for essential potable water resources. *Journal of Hazardous Materials*, *244*, 570–581.

D'Alessandro, W. (2006). Human fluorosis related to volcanic activity: a review.

*Environmental Toxicology.*, *1*, 21–30.

Dai, Y. S., Yang, L. C., Ding, Y. C., Jhong, C. W., Cheng, T. W., & Lin, K. L. (2013). A study on application of geopolymeric green cement. *I*, 3–26.

Davidovits, J. (1988). Geopolymer chemistry and properties. In *Geopolymer* (Vol. 88, pp. 25–48).

Davidovits, J. (1991). Geopolymers: inorganic polymeric new materials. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, *37*(8), 1633–1656.

Davidovits, J. (1994). Properties of Geopolymer Cements. Retrieved from https://www.geopolymer.org/fichiers_pdf/KIEV.pdf

Davidovits, J. (2002). Years of successes and failures in geopolymer applications. Market trends and potential breakthroughs. In *Geopolymer 2002 Conference* (Vol. 28, p. 29). Geopolymer Institute, Saint-Quentin France, Melbourne, Australia.

De Silva, P., & Sagoe-Crenstil, K. (2008). The effect of Al2O3 and SiO2 on setting and hardening of Na2O–Al2O3–SiO2–H2O geopolymer systems. *J Aust Ceram Soc*, *44*(1), 39–46.

De Silva, P., Sagoe-Crenstil, K., & Sirivivatnanon, V. (2007). Kinetics of geopolymerization: role of Al2O3 and SiO2. *Cement and Concrete Research*, *37*(4), 512–518.

De Silva, P., Sagoe-Crenstil, K., & Sirivivatnanon, V. (2007). Kinetics of geopolymerization: role of Al2O3 and SiO2. *Cement and Concrete Research*, *37*(4), 512–518.

Delmelle, P., Lambert, M., Dufrêne, Y., Gerin, P., & Óskarsson, N. (2007). Gas/aerosol–ash interaction in volcanic plumes: new insights from surface analyses of fine ash particles. *Earth and Planetary Science Letters*, *259*(1–2), 159–170.

Delmelle, P., Villiéras, F., & Pelletier, M. (2005). Surface area, porosity and water adsorption properties of fine volcanic ash particles. *Bulletin of Volcanology*, *67*(2), 160–169.

Djobo, J. N. Y., Elimbi, A., Tchakouté, H. K., & Kumar, S. (2016). Mechanical properties and durability of volcanic ash based geopolymer mortars. *Construction and Building Materials*, *124*, 606–614.

Duxson, P., Provis, J. L., Lukey, G. C., & van Deventer, J. S. J. (2007). The role of inorganic polymer technology in the development of "green concrete." *Cement and Concrete Research*, *37*(12), 1590–1597. https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2007.08.018

Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Agrícola de Ciudad Real. (2005). *Cátedra de Ingeniería Rural - Morteros*. La Mancha. Retrieved from https://previa.uclm.es/area/ing_rural/Trans_const/Tema9.pdf

Fahim Huseien, G., Mirza, J., Ismail, M., Ghoshal, S. K., & Abdulameer Hussein, A. (2017). Geopolymer mortars as sustainable repair material: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *80*(April), 54–74. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.076

Federación Interamericana del Cemento. (2009). Producción de Cemento. Retrieved

January 29, 2018, from http://ficem.org/cemento/produccion-de-cemento/

Fernández-Jiménez, A., & Palomo, A. (2005). Composition and microstructure of alkali activated fly ash binder: Effect of the activator. *Cement and Concrete Research*, *35*(10), 1984–1992.

Fitzpatrick-, K., Horsley, C., Tsaknopoulos, D., Zhang, Y., Liang, J., DiBiasio, D., & Tao, M. (2015). Geopolymer -The Green Cement. Retrieved from http://web.wpi.edu/Pubs/E-project/Available/E-project-032515-120611/unrestricted/Geopolymer_MQP_Final_Draft_3.25.15.pdf

Flores Ledesma, A., Barceló Santana, F. H., Bucio Galindo, L., Arenas Alatorre, J. Á., & Ruvalcaba Sil, J. L. (2016). Análisis químico elemental y de fases por medio de PIXE, DSC, TGA y DRX en MTA Angelus® y un cemento Portland blanco. *Revista Odontológica Mexicana*, *20*(3), 187–192. https://doi.org/10.1016/j.rodmex.2016.08.006

Fontes, J. C., Gonçalves, M. C., & Pereira, L. S. (2004). Andosols of Terceira, Azores: measurement and significance of soil hydraulic properties. *Catena*, *56*(1–3), 145–154.

Forss, B. (1983). Experiences from the use of F-cement—a binder based on alkali-activated blastfurnace slag. *Alkalis in Concrete, Danish Concrete Association, Copenhagen, Denmark*, 101–104.

Galvez Escalante, L. J. (2018). Influencia de los huesos calcinados por arena, módulo de finura y relación cemento: arena sobre la resistencia a la compresión, densidad y capilaridad durante la elaboración de morteros modificados.

Gianfreda, L., Rao, M. A., Piotrowska, A., Palumbo, G., & Colombo, C. (2005). Soil enzyme activities as affected by anthropogenic alterations: intensive agricultural practices and organic pollution. *Science of the Total Environment*, *341*(1–3), 265–279.

GNS Science. (2012). Ash fall. Retrieved February 14, 2018, from https://www.gns.cri.nz/Home/Learning/Science-Topics/Volcanoes/Volcanic-Hazards/Ash-fall

Goldhaber, S. B. (2003). Trace element risk assessment: essentiality vs. toxicity. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, *38*(2), 232–242.

González Cárdenas, E. (2006). Peligros y riesgos volcánicos en biogeografía: Efectos sobre la vegetación. Retrieved from https://previa.uclm.es/PROFESORADO/egcardenas/ávila.pdf

Gutiérrez de López, L. (2003). *El concreto y otros materiales para la construcción*. Universidad Nacional de Colombia.

Hawa, A., Tonnayopas, D., Prachasaree, W., & Taneerananon, P. (2013). Development and performance evaluation of very high early strength geopolymer for rapid road repair. *Advances in Materials Science and Engineering*, *2013*.

Horwell, C. J., & Baxter, P. J. (2006). The respiratory health hazards of volcanic ash: a review for volcanic risk mitigation. *Bulletin of Volcanology*, *69*(1), 1–24.

Hu, S., Wang, H., Zhang, G., & Ding, Q. (2008). Bonding and abrasion resistance of

geopolymeric repair material made with steel slag. *Cement and Concrete Composites*, *30*(3), 239–244.

Huseien, G. F., Mirza, J., Ismail, M., Ghoshal, S. K., & Ariffin, M. A. M. (2016). Effect of metakaolin replaced granulated blast furnace slag on fresh and early strength properties of geopolymer mortar. *Ain Shams Engineering Journal*.

Huseien, G. F., Mirza, J., Ismail, M., & Hussin, M. W. (2016). Influence of different curing temperatures and alkali activators on properties of GBFS geopolymer mortars containing fly ash and palm-oil fuel ash. *Construction and Building Materials*, *125*, 1229–1240.

Indian Institute of Science. (1987). Puzolanas. Retrieved March 8, 2018, from http://ces.iisc.ernet.in/energy/HC270799/HDL/spanish/sk01ms/sk01ms09.htm

Instituto Nacional de Defensa Civil, & Comité Regional de Defensa Civil de Moquegua. (2006). *Plan de contingencia ante el incremento de la actividad del volcán Ubinas*. Retrieved from http://sinpad.indeci.gob.pe/UploadPortalSINPAD/proe_pcontig_volcan_ubinas.pdf

IUSS Working Group WRB. (2006). *A framework for international classification, correlation and communication.*

Jaydeep, S., & Chakravarthy, B. J. (2013). Study On Fly Ash Based Geo-Polymer Concrete Using Admixtures. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, *4*(10). Retrieved from http://www.ijettjournal.org

Johnston, D. M. (1997). *The impact of recent falls of volcanic ash on public utilities in two communities in the United States of America*. Institute of Geological & Nuclear Sciences Limited.

Johnston, D. M., Houghton, B. F., Neall, V. E., Ronan, K. R., & Paton, D. (2000). Impacts of the 1945 and 1995–1996 Ruapehu eruptions, New Zealand: an example of increasing societal vulnerability. *Geological Society of America Bulletin*, *112*(5), 720–726.

Jones, M. T., & Gislason, S. R. (2008). Rapid releases of metal salts and nutrients following the deposition of volcanic ash into aqueous environments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, *72*(15), 3661–3680.

Juárez Quevedo, B. (2012). *La utilización de cáscara de arroz bajo el proceso de calcinación controlada como puzolana artificial en el diseño de morteros para acabados*. Universidad de San Carlos de Guatemala. Retrieved from http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_3424_C.pdf

Kamseu, E., Leonelli, C., Perera, D. S., Melo, U. C., & Lemougna, P. N. (2009). Investigation of volcanic ash based geopolymers as potential building materials. *Interceram*, *58*, 136–140.

Kupwade-Patil, K., Al-Aibani, A. F., Abdulsalam, M. F., Mao, C., Bumajdad, A., Palkovic, S. D., & Büyüköztürk, O. (2016). Microstructure of cement paste with natural pozzolanic volcanic ash and Portland cement at different stages of curing. *Construction and Building Materials*, *113*, 423–441.

Lemougna, P. N., Melo, U. F. C., Delplancke, M.-P., & Rahier, H. (2014). Influence of the chemical and mineralogical composition on the reactivity of volcanic ashes

during alkali activation. *Ceramics International*, *40*(1), 811–820.

Liotta, M., Brusca, L., Grassa, F., Inguaggiato, S., Longo, M., & Madonia, P. (2006). Geochemistry of rainfall at Stromboli volcano (Aeolian Islands): Isotopic composition and plume-rain interaction. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, *7*(7).

Macedo, O. (2013). Investigación sobre volcanes activos en el sur del Perú: Reporte Técnico Especial.

Madonia, P., Cangemi, M., Bellomo, S., & D'Alessandro, W. (2013). Influence of volcanic activity on the quality of water collected in roof water catchment systems at Stromboli Island (Italy). *Journal of Geochemical Exploration*, *131*, 28–36.

Martinez López, C. (2015). Evaluación ambiental del uso de geopolímeros basados en dos puzolanas volcánicas como alternativa potencial al cemento portland. Retrieved from http://www.bdigital.unal.edu.co/49278/1/Carolina_Martinez_Lopez.pdf

Maun, M. A. (1998). Adaptations of plants to burial in coastal sand dunes. *Canadian Journal of Botany*, *76*(5), 713–738.

Momayez, A., Ehsani, M. R., Ramezanianpour, A. A., & Rajaie, H. (2005). Comparison of methods for evaluating bond strength between concrete substrate and repair materials. *Cement and Concrete Research*, *35*(4), 748–757. https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2004.05.027

Mortimore, J. L., Marshall, L.-J. R., Almond, M. J., Hollins, P., & Matthews, W. (2004). Analysis of red and yellow ochre samples from Clearwell Caves and Çatalhöyük by vibrational spectroscopy and other techniques. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, *60*(5), 1179–1188. https://doi.org/10.1016/J.SAA.2003.08.002

Nath, P., & Sarker, P. K. (2014). Effect of GGBFS on setting, workability and early strength properties of fly ash geopolymer concrete cured in ambient condition. *Construction and Building Materials*, *66*, 163–171. https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2014.05.080

NTP 334.001. (2001). Norma Técnica Peruana: Cementos. Definiciones y Nomenclatura. Retrieved from https://es.scribd.com/document/355934446/NTP-334-001-2001-pdf

NTP 339.127. (1999). Norma Técnica Peruana: Método de ensayo para determinar el contenido de humedad de un suelo.

NTP 400.037. (2014). Norma Técnica Peruana: Agregados. Especificaciones normalizadas para agregados en concreto.

Observatorio Vulcanológico del Sur - OVS. (n.d.-a). Principales volcanes activos en Perú. Retrieved March 9, 2018, from http://ovs.igp.gob.pe/principales-volcanes-activos-peru

Observatorio Vulcanológico del Sur - OVS. (n.d.-b). Principales volcanes activos en Perú.

Observatorio Vulcanológico del SUR - OVS. (n.d.). Volcán Ubinas. Retrieved January 16, 2018, from http://ovi.ingemmet.gob.pe/?page_id=58

Olgun, N., Duggen, S., Andronico, D., Kutterolf, S., Croot, P. L., Giammanco, S., … Randazzo, L. (2013). Possible impacts of volcanic ash emissions of Mount Etna on

the primary productivity in the oligotrophic Mediterranean Sea: Results from nutrient-release experiments in seawater. *Marine Chemistry*, *152*, 32–42.

Óskarsson, N. (1980). The interaction between volcanic gases and tephra: fluorine adhering to tephra of the 1970 Hekla eruption. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, *8*(2–4), 251–266.

Palomo, A., Fernández-Jiménez, A., & Criado, M. (2004). Geopolymers": same basic chemistry, different microstructures. *Materiales de Construcción*, *54*(275), 77–91.

Pangdaeng, S., Phoo-ngernkham, T., Sata, V., & Chindaprasirt, P. (2014). Influence of curing conditions on properties of high calcium fly ash geopolymer containing Portland cement as additive. *Materials & Design*, *53*, 269–274.

Part, W. K., Ramli, M., Cheah, C. B., Ramli, M., & Cheah, C. B. (2017). An Overview on the Influence of Various Factors on the Properties of Geopolymer Concrete Derived From Industrial Byproducts. In *Handbook of Low Carbon Concrete* (pp. 263–334). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804524-4.00011-7

Pellegriti, G., De Vathaire, F., Scollo, C., Attard, M., Giordano, C., Arena, S., … Vermiglio, F. (2009). Papillary thyroid cancer incidence in the volcanic area of Sicily. *JNCI: Journal of the National Cancer Institute*, *101*(22), 1575–1583.

Pérez Huamaní, L. C. (2018). *Evaluación mecánica y química de geopolímeros obtenidos a partir de ceniza del volcán Ubinas activada con hidróxido de sodio y silicato de sodio para determinar su desempeño conforme a normativa para un adocreto*. Universidad Católica San Pablo.

Phair, J. W., Van Deventer, J. S. J., & Smith, J. D. (2004). Effect of Al source and alkali activation on Pb and Cu immobilisation in fly-ash based "geopolymers." *Applied Geochemistry*, *19*(3), 423–434. Retrieved from https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0883292703001513

Phoo-ngernkham, T., Maegawa, A., Mishima, N., Hatanaka, S., & Chindaprasirt, P. (2015). Effects of sodium hydroxide and sodium silicate solutions on compressive and shear bond strengths of FA–GBFS geopolymer. *Construction and Building Materials*, *91*, 1–8.

Phoo-ngernkham, T., Sata, V., Hanjitsuwan, S., Ridtirud, C., Hatanaka, S., & Chindaprasirt, P. (2015). High calcium fly ash geopolymer mortar containing Portland cement for use as repair material. *Construction and Building Materials*, *98*, 482–488.

Reimann, C., Bjorvatn, K., Frengstad, B., Melaku, Z., Tekle-Haimanot, R., & Siewers, U. (2003). Drinking water quality in the Ethiopian section of the East African Rift Valley I—data and health aspects. *Science of the Total Environment*, *311*(1–3), 65–80.

Risacher, F., & Alonso, H. (2001). Geochemistry of ash leachates from the 1993 Lascar eruption, northern Chile. Implication for recycling of ancient evaporites. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, *109*(4), 319–337.

Rivera, M., Mariño, J., & Thouret, J. C. (2011). Geología y evaluación de Peligros del Volcán Ubinas. INGEMMET. *Boletín, Serie C: Geodinámica E Ingeniería Geológica*, *46*, 83.

Rodríguez, E., Mejía de Gutiérrez, R., Bernal, S., & Gordillo, M. (2009). Efecto de los módulos SiO2/Al2O3 y Na2O/SiO2en las propiedades de sistemas geopoliméricos basados en un metacaolín. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, (49).

Roy, D. M. (1999). Alkali-activated cements Opportunities and challenges. *Cement and Concrete Research*, *29*(2), 249–254. https://doi.org/10.1016/S0008-8846(98)00093-3

Roy, D. M., & Langton, C. A. (1989). Studies of Ancient Concrete as Analogs of Cementitious Sealing Materials for a Repository in Tuff. Retrieved from https://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/60684

Ruggieri, F., Saavedra, J., Fernandez-Turiel, J. L., Gimeno, D., & Garcia-Valles, M. (2010). Environmental geochemistry of ancient volcanic ashes. *Journal of Hazardous Materials*, *183*(1–3), 353–365.

Ruiz de Gauna, A. (1976). Relaciones entre lo carbonatación del cemento portland, el grado de cocción del clínker y algunos fenómenos expansivos en el ensayo de autoclave. *Materiales de Construcción*, *26*(162), 89–100.

Saavedra Vera, J. V. (2011). Cemento Portland. Retrieved from http://biblioteca.uns.edu.pe/saladocentes/archivoz/curzoz/semana_7_cemento_tecnologia_2013.2.pdf

Schmid, R. (1981). Descriptive nomenclature and classification of pyroclastic deposits and fragments: Recommendations of the IUGS Subcommission on the Systematics of Igneous Rocks. *Geology*, *9*(1), 41–43.

Serra, M. F., Conconi, M. S., Suarez, G., Aglietti, E. F., & Rendtorff, N. M. (2015). Volcanic ash as flux in clay based triaxial ceramic materials, effect of the firing temperature in phases and mechanical properties. *Ceramics International*, *41*(5), 6169–6177.

Shi, C., & Jiménez, A. F. (2011). New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement. *Cement and Concrete Research*, *41*(7), 750–763. https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2011.03.016

Skoog, D. A., West, D. M., & Holler, F. J. (1997). *Fundamentos de química analítica* (Vol. 2). Reverté.

Škvára, F., Jílek, T., & Kopecký, L. (2005). Geopolymer materials based on fly ash. *Ceram.-Silik*, *49*(3), 195–204.

Smithsonian Institution. (2000). *Bulletin of the Global Volcanism Network*.

Sofi, M., van Deventer, J. S. J., Mendis, P. A., & Lukey, G. C. (2007). Bond performance of reinforcing bars in inorganic polymer concrete (IPC). *Journal of Materials Science*, *42*(9), 3107–3116. https://doi.org/10.1007/s10853-006-0534-5

Sommerfeld, J., Buys, L., Mengersen, K., & Vine, D. (2017). Influence of demographic variables on uptake of domestic solar photovoltaic technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *67*, 315–323. https://doi.org/10.1016/J.RSER.2016.09.009

Sotil Levy, A. J., & Zegarra Riveros, J. E. (2015). Análisis comparativo del

comportamiento del concreto sin refuerzo, concreto reforzado con fibras de acero Wirand® FF3 y concreto reforzado con fibras de acero wirand® FF4 aplicado a losas industriales de pavimento rígido. *Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC)*. Retrieved from http://repositorioacademico.upc.edu.pe/upc/handle/10757/581616

Stewart, C., Johnston, D. M., Leonard, G. S., Horwell, C. J., Thordarson, T., & Cronin, S. J. (2006). Contamination of water supplies by volcanic ashfall: a literature review and simple impact modelling. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, *158*(3–4), 296–306.

Subaer. (2004). *Influence of aggregate on the microstructure of geopolymer*. Curtin University of Technology.

Sugiyarto, K. H. (2013). Javanese volcanic allophane adsorbent as heavy metal adsorber to improve the quality of drinking water in Surakarta. *J Environ Earth Sci*, *3*, 48–56.

Sutton, J., Elias, T., Hendley, J.W., Stauffer, P. (1997). *Geological Survey Fact Sheet*.

Takemoto, K., & Saiki, Y. (1962). Infrared Absorption Spectra of Dihydrate, Hemihydrate, Soluble Anhydrite and Insoluble Anhydrite of Calcium Sulfate. *Gypsum & Lime*, *61*, 277–283. Retrieved from https://www.jstage.jst.go.jp/article/mukimate1953/1962/61/1962_61_277/_pdf/-char/en

Tchakoute, H. K., Elimbi, A., Yanne, E., & Djangang, C. N. (2013). Utilization of volcanic ashes for the production of geopolymers cured at ambient temperature. *Cement and Concrete Composites*, *38*, 75–81.

Temuujin, J., van Riessen, A., & MacKenzie, K. J. D. (2010). Preparation and characterisation of fly ash based geopolymer mortars. *Construction and Building Materials*, *24*(10), 1906–1910. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.04.012

Torgal, F. P., Gomes, J. P., & Jalali, S. (2006). Bond strength between concrete substance and repair materials: comparisons between tungsten mine waste geopolymeric binder versus current commercial repair products.

Ugolini, F. C., & Dahlgren, R. A. (2002). Soil development in volcanic ash. *GLOBAL ENVIRONMENTAL RESEARCH-ENGLISH EDITION-*, *6*(2), 69–82.

Varas, M. J., de Buergo, M. Á., & Fort, R. (2007). Piedras artificiales: morteros y hormigones. El cemento como máximo representante de estos materiales de construcción. *Instituto de Geología Económica (Ed.), Ciencia, Tecnología Y Sociedad Para Una Conservación Sostenible Del Patrimonio Pétreo, Delegación de Cultura Del Ayuntamiento de San Sebastián de Los Reyes (Madrid)*, 179–189.

Varrica, D., Tamburo, E., Dongarrà, G., & Sposito, F. (2014). Trace elements in scalp hair of children chronically exposed to volcanic activity (Mt. Etna, Italy). *Science of The Total Environment*, *470–471*, 117–126. https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2013.09.058

Vasconcelos, E., Fernandes, S., de Aguiar, B., & Pacheco-Torgal, F. (2013). Concrete retrofitting using CFRP and geopolymer mortars. In *Materials Science Forum* (Vol. 730, pp. 427–432). Trans Tech Publ.

Villa García, C. I. (2013). *Síntesis de geopolímeros empleando activación alcalina de*

*aluminosilicatos minerales*. Centro de Investigación en Materiales Avanzados. Retrieved from https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/19/1/Tesis Claudia Ivette Villa Garcia.pdf

Villamor Lora, Á. (2016). *Geopolímeros sintetizados a partir de distintos materiales residuales. Activación alcalina de cenizas de cascarilla de arroz*. Universidad de Sevilla. Retrieved from http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/90737/fichero/TRABAJO+FIN+DE+GRADO+ÁLVARO+VILLAMOR+LORA.pdf

Vite Torres, J. (2015). Elaboración de materiales de construcción a partir de residuos industriales sólidos granulares. *Contacto Nuclear 47*.

Weather Spark. (2016). Clima promedio en Ubinas, Perú, durante todo el año. Retrieved January 17, 2019, from https://es.weatherspark.com/y/26578/Clima-promedio-en-Ubinas-Perú-durante-todo-el-año

Weniger, B. G., Blaser, M. J., Gedrose, J., Lippy, E. C., & Juranek, D. D. (1983). An outbreak of waterborne giardiasis associated with heavy water runoff due to warm weather and volcanic ashfall. *American Journal of Public Health*, *73*(8), 868–872.

Widmann, G. (2001). *Información TA: Interpretación de curvas TGA*. Retrieved from https://www.mt.com/mt_ext_files/Editorial/Generic/3/TA_UserCom13_02409297 10242401_files/tausc13s.pdf

Wilson, T. M., Stewart, C., Sword-Daniels, V., Leonard, G. S., Johnston, D. M., Cole, J. W., … Barnard, S. T. (2012). Volcanic ash impacts on critical infrastructure. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, *45–46*, 5–23. https://doi.org/10.1016/j.pce.2011.06.006

Witham, C. S., Oppenheimer, C., & Horwell, C. J. (2005). Volcanic ash-leachates: a review and recommendations for sampling methods. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, *141*(3–4), 299–326.

Xie, T., & Ozbakkaloglu, T. (2015). Behavior of low-calcium fly and bottom ash-based geopolymer concrete cured at ambient temperature. *Ceramics International*, *41*(4), 5945–5958. https://doi.org/10.1016/J.CERAMINT.2015.01.031

Xu, H., & Van Deventer, J. S. J. (2000). The geopolymerisation of alumino-silicate minerals. *International Journal of Mineral Processing*, *59*(3), 247–266. https://doi.org/10.1016/S0301-7516(99)00074-5

Yip, C. K.-B. (2014, May 23). *The role of calcium in geopolymerisation*. Retrieved from http://hdl.handle.net/11343/39281

Yip, C. K., Lukey, G. C., Provis, J. L., & van Deventer, J. S. J. (2008). Effect of calcium silicate sources on geopolymerisation. *Cement and Concrete Research*, *38*(4), 554–564.

Yip, C. K., Lukey, G. C., & Van Deventer, J. S. J. (2005). The coexistence of geopolymeric gel and calcium silicate hydrate at the early stage of alkaline activation. *Cement and Concrete Research*, *35*(9), 1688–1697.

YURA. (2017). Ficha Técnica Cemento Multipropósito IP. Retrieved from http://www.yura.com.pe/productos/pdf/ficha-tecnica-multi-proposito.pdf

Zeobond. (2012). The Zeobond Group. Retrieved January 29, 2018, from http://www.zeobond.com/

Zhang, H. Y., Kodur, V., Qi, S. L., & Wu, B. (2015). Characterizing the bond strength of geopolymers at ambient and elevated temperatures. *Cement and Concrete Composites*, *58*, 40–49.

Zhang, S., Gong, K., & Lu, J. (2004). Novel modification method for inorganic geopolymer by using water soluble organic polymers. *Materials Letters*, *58*(7–8), 1292–1296. https://doi.org/10.1016/J.MATLET.2003.07.051

Zhang, Z., Provis, J. L., Reid, A., & Wang, H. (2014). Geopolymer foam concrete: An emerging material for sustainable construction. *Construction and Building Materials*, *56*, 113–127. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.081

Zhang, Z., Provis, J. L., Wang, H., Bullen, F., & Reid, A. (2013). Quantitative kinetic and structural analysis of geopolymers. Part 2. Thermodynamics of sodium silicate activation of metakaolin. *Thermochimica Acta*, *565*, 163–171. https://doi.org/10.1016/J.TCA.2013.01.040

Zimanowski, B., Wohletz, K., Dellino, P., & Büttner, R. (2003). The volcanic ash problem. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, *122*(1–2), 1–5. https://doi.org/10.1016/S0377-0273(02)00471-7

# ANEXOS

## Anexo 1. Ficha técnica de cemento IP multi-propósito YURA

### DESCRIPCIÓN

**EL CEMENTO MULTI-PROPÓSITO DE ALTA DURABILIDAD YURA IP** es un cemento elaborado bajo los más estrictos estándares de la industria cementera, colaborando con el medio ambiente, debido a que en su producción se reduce ostensiblemente la emisión de $CO_2$, contribuyendo a la reducción de los gases con efecto invernadero.

Es un producto fabricado a base de Clínker de alta calidad, puzolana natural de origen volcánico de alta reactividad y yeso. Esta mezcla es molida industrialmente en molinos de última generación, logrando un alto grado de finura. La fabricación es controlada bajo un sistema de gestión de calidad certificado con ISO 9001 y de gestión ambiental ISO 14001, asegurando un alto estándar de calidad.

Sus componentes y la tecnología utilizada en su fabricación, hacen que el CEMENTO MULTI-PROPÓSITO YURA TIPO IP, tenga propiedades especiales que otorgan a los concretos y morteros cualidades únicas de ALTA DURABILIDAD, permitiendo que el concreto mejore su resistencia e impermeabilidad y también pueda resistir la acción del intemperismo, ataques químicos (aguas saladas, sulfatadas, ácidas, desechos industriales, reacciones químicas en los agregados, etc.), abrasión, u otros tipos de deterioro.

***Puede ser utilizado en cualquier tipo de obras de infraestructura y construcción en general. Especialmente para OBRAS DE ALTA EXIGENCIA DE DURABILIDAD.***

### DURABILIDAD

"Es aquella propiedad del concreto endurecido que define la capacidad de éste para resistir la acción agresiva del medio ambiente que lo rodea, permitiendo alargar su vida útil".

### CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

| REQUISITOS | CEMENTO MULTI-PROPÓSITO YURA TIPO IP | | REQUISITOS NORMA NTP 334.090 ASTM C-595 | | REQUISITOS NORMA NTP 334.009 ASTM C-150 (CEMENTO TIPO I) | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **REQUISITOS QUÍMICOS** | | | | | | |
| MgO (%) | 1.5 a 2.4 | | 6.00 Máx. | | | |
| $SO_3$ (%) | 1.5 a 2.3 | | 4.00 Máx. | | | |
| Pérdida por ignición (%) | 1.5 a 3.8 | | 5.00 Máx. | | | |
| **REQUISITOS FÍSICOS** | | | | | | |
| Peso específico (g/cm3) | 2.77 a 2.85 | | - | | | |
| Expansión en autoclave (%) | -0.05 a 0.03 | | -0.20 a 0.80 | | | |
| Fraguado Vicat inicial (minutos) | 170 a 270 | | 45 a 420 | | | |
| Contenido de aire | 2.5 a 6.0 | | 12 Máx | | | |
| | kg/cm2 | MPa | kg/cm2 | MPa | kg/cm2 | MPa |
| 1 día | 80 a 104 | 7.8 a 10.2 | - | - | - | - |
| 3 días | 175 a 200 | 17.1 a 19.6 | 133 Mín. | 13 | 122 Mín. | 12 |
| 7 días | 225 a 260 | 22.0 a 25.4 | 204 Mín. | 20 | 194 Mín. | 19 |
| 28 días | 305 a 350 | 30.0 a 34.3 | 255 Mín. | 25 | - | - |
| | % | | % | | | |
| % Expansión a los 6 meses | < 0.021% | | 0.05 Máx | | | |
| % Expansión a 1 año | < 0.023% | | 0.10 Máx | | | |

YURA

**Fuente:** (YURA, 2017)

**Anexo 2. Norma ASTM C642 – 97: Método normalizado para el ensayo de determinación de densidad, absorción y porosidad en concreto endurecido**

Designation: C 642 – 97

## Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete[1]

This standard is issued under the fixed designation C 642; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ε) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

### 1. Scope

1.1 This test method covers the determinations of density, percent absorption, and percent voids in hardened concrete.

1.2 The text of this test method references notes and footnotes which provide explanatory information. These notes and footnotes (excluding those in tables and figures) shall not be considered as requirements of this standard.

### 2. Significance and Use

2.1 This test method is useful in developing the data required for conversions between mass and volume for concrete. It can be used to determine conformance with specifications for concrete and to show differences from place to place within a mass of concrete.

### 3. Apparatus

3.1 *Balance*, sensitive to 0.025 % of the mass of the specimen.

3.2 *Container*, suitable for immersing the specimen and suitable wire for suspending the specimen in water.

### 4. Test Specimen

4.1 Whenever possible, the sample shall consist of several individual portions of concrete, each to be tested separately. The individual portions may be pieces of cylinders, cores, or beams of any desired shape or size, except that the volume of each portion shall be not less than 350 $cm^3$ (or for normal weight concrete, approximately 800 g); and each portion shall be free from observable cracks, fissures, or shattered edges.

### 5. Procedure

5.1 *Oven-Dry Mass*—Determine the mass of the portions, and dry in an oven at a temperature of 100 to 110°C for not less than 24 h. After removing each specimen from the oven, allow it to cool in dry air (preferably in a desiccator) to a temperature of 20 to 25°C and determine the mass. If the specimen was comparatively dry when its mass was first determined, and the second mass closely agrees with the first, consider it dry. If the specimen was wet when its mass was first determined, place it in the oven for a second drying treatment of 24 h and again determine the mass. If the third value checks the second, consider the specimen dry. In case of any doubt, redry the specimen for 24-h periods until check values of mass are obtained. If the difference between values obtained from two successive values of mass exceeds 0.5 % of the lesser value, return the specimens to the oven for an additional 24-h drying period, and repeat the procedure until the difference between any two successive values is less than 0.5 % of the lowest value obtained. Designate this last value *A*.

5.2 *Saturated Mass After Immersion*—Immerse the specimen, after final drying, cooling, and determination of mass, in water at approximately 21°C for not less than 48 h and until two successive values of mass of the surface-dried sample at intervals of 24 h show an increase in mass of less than 0.5 % of the larger value. Surface-dry the specimen by removing surface moisture with a towel, and determine the mass. Designate the final surface-dry mass after immersion *B*.

5.3 *Saturated Mass After Boiling*—Place the specimen, processed as described in 5.2, in a suitable receptacle, covered with tap water, and boil for 5 h. Allow it to cool by natural loss of heat for not less than 14 h to a final temperature of 20 to 25°C. Remove the surface moisture with a towel and determine the mass of the specimen. Designate the soaked, boiled, surface-dried mass *C*.

5.4 *Immersed Apparent Mass*—Suspend the specimen, after immersion and boiling, by a wire and determine the apparent mass in water. Designate this apparent mass *D*.

### 6. Calculation

6.1 By using the values for mass determined in accordance with the procedures described in Section 5, make the following calculations:

$$\text{Absorption after immersion, \%} = [(B-A)/A] \times 100 \quad (1)$$

$$\text{Absorption after immersion and boiling, \%} = [(C-A)/A] \times 100 \quad (2)$$

$$\text{Bulk density, dry} = [A/(C-D)]\rho = g_1 \quad (3)$$

$$\text{Bulk density after immersion} = [B/(C-D)]\rho \quad (4)$$

$$\text{Bulk density after immersion and boiling} = [C/(C-D)]\rho \quad (5)$$

$$\text{Apparent density} = [A/(A-D)]\rho = g_2 \quad (6)$$

$$\text{Volume of permeable pore space (voids), \%} = (g_2-g_1)/g_2 \times 100 \quad (7)$$

[1] This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee C-9 on Concrete and Concrete Aggregates and is the direct responsibility of Subcommittee C09.69 on Miscellaneous Tests.

Current edition approved Jan. 10, 1997. Published March 1997. Originally published as C 642 – 69 T. Last previous edition C 642 – 90.

Copyright © ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States.

$$\text{or } (C - A)/(C - D) \times 100$$

where:

$A$ = mass of oven-dried sample in air, g
$B$ = mass of surface-dry sample in air after immersion, g
$C$ = mass of surface-dry sample in air after immersion and boiling, g
$D$ = apparent mass of sample in water after immersion and boiling, g
$g_1$ = bulk density, dry, $Mg/m^3$ and
$g_2$ = apparent density, $Mg/m^3$
$\rho$ = density of water = 1 $Mg/m^3$ = 1 $g/cm^3$.

## 7. Example

7.1 Assume a sample having the following characteristics:

7.1.1 Mass of the solid part of the specimen = 1000 g.

7.1.2 Total volume of specimen (including solids, "permeable" voids, and "impermeable" voids) = 600 $cm^3$.

7.1.3 Absolute density of solid part of specimen = 2.0 $Mg/m^3$.

7.1.4 Void space in specimen contains initially only air (no water).

7.2 Then, it follows that there are 500 $cm^3$ of solids and 100 $cm^3$ of voids making up the specimen, and the void content is $\frac{1}{6}$ = 16.67 %.

7.3 Assume that on immersion 90 mL of water is absorbed.

7.4 Assume that after immersion and boiling 95 mL of water is absorbed.

7.5 Based on the assumptions given in 7.1-7.4 above, the data that would be developed from the procedures given in Section 5 would be as follows:

7.5.1 Oven-dry mass, $A$ = 1000 g.

7.5.2 Mass in air after immersion, $B$ = 1090 g.

7.5.3 Mass in air after immersion and boiling, $C$ = 1095 g.

7.5.4 Apparent mass in water after immersion and boiling, $D$ = 495 g.

NOTE 1—Since loss of mass in water is equal to mass of displaced water, and volume of specimen = 600 $cm^3$, mass of specimen in water after immersion and boiling is 1095 − 600 = 495 g.

7.6 By using the data given above to perform the calculations described in Section 6, the following results will be obtained (Note 2):

$$\text{Absorption after immersion, \%} = [(B - A)/A] \times 100 = [(1090 - 1000)/1000] \times 100 = 9.0 \quad (8)$$

$$\text{Absorption after immersion and boiling, \%} = [(C - A)/A] \times 100 = [(1095 - 1000)/1000] \times 100 = 9.5 \quad (9)$$

$$\text{Bulk density, dry} = [A/(C - D)]\rho = [1000/(1095 - 495)] \times 1 = 1.67\ Mg/m^3 = g_1 \quad (10)$$

$$\text{Bulk density after immersion} = [B/(C - D)]\rho = [1090/(1095 - 495)] \times 1 = 1.82 \quad (11)$$

$$\text{Bulk density after immersion and boiling} = [C/(C - D)]\rho = [1095/(1095 - 495)] \times 1 = 1.83\ Mg/m^3 \quad (12)$$

$$\text{Apparent density} = [A/(A - D)]\rho = [1000/(1000 - 495)] \times 1 = 1.98\ Mg/m^3 = g_2 \quad (13)$$

$$\text{Volume of permeable voids, \%} = [(g_2 - g_1)/g_2] \times 100 = [(1.98 - 1.67)/1.98] \times 100 = 15.8, \text{ or } [(C - A)/(C - D)] \times 100 = [(1095 - 1000)/(1095 - 495)] \times 100 = 15.7 \quad (14)$$

NOTE 2—This test method does not involve a determination of absolute density. Hence, such pore space as may be present in the specimen that is not emptied during the specified drying or is not filled with water during the specified immersion and boiling or both is considered "impermeable" and is not differentiated from the solid portion of the specimen for the calculations, especially those for percent voids. In the example discussed it was assumed that the absolute density of the solid portion of the specimen was 2.0 $Mg/m^3$, the total void space was 16.67 %, and the impermeable void space was 5 $cm^3$. The operations, if performed, and the calculations, if performed as described, have the effect of assuming that there are 95 $cm^3$ of pore space and 505 $cm^3$ of solids, and indicate that the solid material, therefore, has an apparent density of 1.98 rather than the absolute density of 2.00 $Mg/m^3$ and the specimen has a percentage of voids of 15.8 rather than 16.67.

Depending on the pore size distribution and the pore entry radii of the concrete and on the purposes for which the test results are desired, the procedures of this test method may be adequate, or they may be insufficiently rigorous. In the event that it is desired to fill more of the pores than will be filled by immersion and boiling, various techniques involving the use of vacuum treatment or increased pressures may be used. If a rigorous measure of total pore space is desired, this can only be obtained by determining absolute density by first reducing the sample to discrete particles, each of which is sufficiently small so that no impermeable pore space can exist within any of the particles. If the absolute density were determined and designated $g_3$, then:

$$\text{Total void volume, \%} = (g_3 - g_1)/g_3 \times 100 = (2.00 - 1.67)/2.00 \times 100 = 16.5 \quad (15)$$

## 8. Precision and Bias

8.1 *Precision*—At present there are insufficient data available to justify attempting to develop a precision statement for this test method.

8.2 *Bias*—Bias for this test method cannot be determined since there is no reference standard available for comparison.

## 9. Keywords

9.1 absorption; concrete-hardened; density; voids

**Anexo 3. Líneas de difracción características de los principales compuestos hidratados de una pasta de Cemento Portland**

| $Ca(OH)_2$ (portlandita) | | ettringita | | $Ca_4al_2SO_4.12H_2O$ (monosulfoaluminato) | |
|---|---|---|---|---|---|
| 2θ | $I/I_0$ | 2θ | $I/I_0$ | 2θ | $I/I_0$ |
| 18,1 | 74 | 9,1 | 100 | 9,9 | 100 |
| 28,7 | 23 | 10,0 | 14 | 19,9 | 90 |
| 34,1 | 100 | 15,8 | 80 | 22,3 | 20 |
| 47,1 | 42 | 17,8 | 25 | 31,0 | 10 |
| 50,8 | 36 | 18,9 | 34 | 36,6 | 10 |
| 54,3 | 21 | 22,9 | 50 | 37,1 | 20 |
| 62,5 | 13 | 24,7 | 16 | 38,1 | 10 |
| 64,2 | 13 | 25,6 | 30 | 40,3 | 30 |
| 84,7 | 11 | 27,5 | 20 | 41,2 | 20 |
| 93,2 | 12 | 32,3 | 40 | 43,7 | 20 |
| | | 33,2 | 14 | 47,7 | 10 |
| | | 34,2 | 20 | 50,0 | 10 |
| | | 35,0 | 44 | 51,1 | 10 |
| | | 37,4 | 12 | 58,0 | 10 |
| | | 44,4 | 20 | | |
| | | 40,8 | 44 | | |
| | | 41,3 | 10 | | |
| | | 41,9 | 25 | | |

**Fuente:** (Blanco et al., 1992)

**Anexo 4. Líneas de difracción características de las tres formas polimórficas del $CaCO_3$**

| Calcita | | Aragonito | | Vaterita | |
|---|---|---|---|---|---|
| 2θ | $I/I_0$ | 2θ | $I/I_0$ | 2θ | $I/I_0$ |
| 23,0 | 12 | 26,2 | 100 | 21,0 | 25 |
| 29,4 | 100 | 27,2 | 56 | 24,9 | 60 |
| 36,0 | 14 | 33,1 | 44 | 27,1 | 100 |
| 39,4 | 18 | 36,1 | 28 | 32,8 | 90 |
| 43,1 | 18 | 37,3 | 17 | 42,8 | 20 |
| 47,5 | 17 | 37,9 | 32 | 43,8 | 60 |
| 48,5 | 17 | 38,4 | 21 | 49,1 | 30 |
| | | 38,6 | 18 | 50,1 | 70 |
| | | 41,2 | 13 | 55,8 | 10 |
| | | 42,9 | 23 | 62,8 | 10 |
| | | 45,8 | 60 | 68,7 | 20 |
| | | 48,3 | 28 | | |
| | | 48,4 | 32 | | |
| | | 50,2 | 25 | | |
| | | 52,5 | 23 | | |
| | | 53,0 | 14 | | |

**Fuente:** (Blanco et al., 1992)