

INFORME DE TESIS - GYCD

por GISELLA YOSSELY CARRASCO DOMINGUEZ

Fecha de entrega: 10-nov-2023 04:24p.m. (UTC-0500)

Identificador de la entrega: 2219332197

Nombre del archivo: INFORME_FINAL_DE_TESIS_CARRASCO.docx (40.69M)

Total de palabras: 22597

Total de caracteres: 128905

¹ **UNIVERSIDAD CATÓLICA DE TRUJILLO**

BENEDICTO XVI

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

PROGRAMA DE ESTUDIOS DE INGENIERIA CIVIL



EVALUACIÓN DE EFECTO DEL Na_2SiO_3 ¹¹ SOBRE LAS PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS Y MECÁNICAS DE PASTAS Y MORTEROS OBTENIDAS POR GEOPOLIMERIZACIÓN DE POLVO DE LADRILLO

¹ **TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL**

AUTOR

Br. Gisella Yossely Carrasco Domínguez

ASESOR

¹ Mg. Aldo Castillo Chung
<https://orcid.org/0000-0002-2270-1671>

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN

Vivienda, saneamiento y transporte

TRUJILLO – PERÚ ²

2023

AUTORIDADES UNIVERSITARIAS

Mons. Dr. Héctor Miguel Cabrejos Vidarte, O.F.M.

Arzobispo Metropolitano de Trujillo
Fundador y Gran Canciller de la Universidad
Católica TrujilloBenedicto XVI

Dr. Luis Miranda Díaz

Rector de la Universidad Católica de Trujillo Benedicto XVI

Dra. Mariana Silva Balarezo

Vicerrectora Académica

Dra. Ena Cecilia Obando Peralta

Vicerrectora de Investigación

Mg. Breitner Díaz Rodríguez

Decano de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura

Mons. Ricardo Exequiel Angulo Bazauri

Gerente de Desarrollo Institucional

Dra. Teresa Reátegui Marín

Secretario General

DECLARATORIA DE ORIGINALIDAD

¹ Señor(a) Decano(a) de la Facultad de Ingeniería:

Yo, Mg Aldo Roger Castillo Chung con DNI N° 18132971, como asesora del trabajo de investigación **EVALUACIÓN DE EFECTO DEL Na_2SiO_3 SOBRE LAS PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS Y MECÁNICAS DE PASTAS Y MORTEROS OBTENIDAS POR GEOPOLIMERIZACIÓN DE POLVO DE LADRILLO,** desarrollada por el bachiller Gisella Yossely Carrasco Domínguez DNI N° 43559687 respectivamente, egresada del Programa Profesional de Ingeniería Civil, considero que dicho trabajo de titulación reúne los requisitos tanto técnicos como científicos y corresponden con las normas establecidas en el reglamento de titulación de la Universidad Católica de Trujillo Benedicto XVI y en normativa para la presentación de trabajos de titulación de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura.

Por tanto, autorizo la presentación del mismo ante el organismo pertinente para que sea sometido a evaluación por la comisión de la clasificación designado por el Decano de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura.

¹ Se declara también que el porcentaje de similitud o coincidencia es menor o igual al 20 %, estándar permitido por el Reglamento de grados y títulos de la Universidad Católica de Trujillo.



Mg. Aldo Castillo Chung
DNI: 18132971

DEDICATORIA

Aprovecho la oportunidad que me ofrece Dios y la vida para dedicar este trabajo de investigación a toda mi hermosa *familia*, en especial a mis amados padres, el señor *Lemuel Urbano Carrasco Picón* y la señora *Ulda Bertha Domínguez Campos*, por su amor y constante apoyo incondicional en todo momento, porque todo lo que soy es gracias a ellos. A *mis hermanos*, que han compartido conmigo el camino de la vida, a mi pequeña sobrina *Sofía Valentina*, que ilumina nuestro hogar con alegría. Y también *a mí persona*, por mi compromiso, esfuerzo y perseverancia en lograr ser mejor cada día. Finalmente, a los *investigadores y lectores*, a quienes espero aportar con este trabajo un mayor conocimiento al servicio de la sociedad.

GISSELLA YOSSELY CARRASCO DOMÍNGUEZ

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a **Dios** por ser mi motor y motivo en esta vida y por darme la fuerza y la sabiduría para completar esta investigación. A mi familia por su amor, apoyo y paciencia durante todo el proceso. También agradezco a la **Universidad Católica de Trujillo** y a todos sus docentes y todos sus docentes por brindarme la oportunidad de estudiar en esta prestigiosa institución, y a la **Universidad Nacional de Trujillo** por permitirme utilizar sus laboratorios para llevar a cabo esta investigación. Mi consideración, respeto y agradecimiento al ingeniero **Aldo Roger Castillo Chung** por su orientación y apoyo durante todo el proceso de investigación. Agradezco a todas las personas que me brindaron su apoyo durante mi preparación y desarrollo de este trabajo de investigación. Finalmente, quiero expresar mi gratitud a mi hermosa madre la señora **Ulda Bertha Domínguez Campos** por su apoyo incondicional, confianza y amor en todo momento, sin ti madre esto no hubiera sido posible.

Para todos ellos, muchas gracias por todo.

GISELLA YOSSELY CARRASCO DOMÍNGUEZ

ÍNDICE

AUTORIDADES UNIVERSITARIAS.....	ii
¹ CONFORMIDAD DEL ASESOR	iii
DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTO	v
DECLARATORIA DE AUTENTICIDAD	vi
ÍNDICE	vii
ÍNDICE DE FIGURAS Y TABLAS.....	x
RESUMEN	xiii
ABSTRACT	xiv
I. INTRODUCCIÓN.....	15
II. METODOLOGÍA.....	33
2.1. Enfoque y tipo.....	33
2.2. Diseño de Investigación.....	34
² 2.3. Objeto de Estudio.....	34
2.4. Instrumentos, técnicas, equipos de laboratorio de recojo de datos.....	38
2.4.1. Instrumentos de recojo de datos.....	38
2.4.2. Técnicas de recojo de datos.....	38
2.4.3. Equipos de laboratorio de recojo de datos.....	38
¹ 2.5. Técnicas de procesamiento y análisis de datos.....	39
2.5.1. Técnicas de procesamiento.....	39
2.5.2. Análisis de información.....	41
2.6. Aspectos éticos en investigación.....	42
2.6.1. Respeto por los Derechos de los Participantes.....	42
2.6.2. Equidad y Justicia.....	42

2.6.3. Responsabilidad en la Utilización de Recursos.....	42
2.6.4. Honestidad y Transparencia.....	42
2.6.5. Reconocimiento de Fuentes y Colaboraciones.....	42
2.6.6. Uso Responsable de la Tecnología.....	42
17 III. RESULTADOS.....	44
3.1. Descripción de resultados.....	44
3.1.1. Determinación de la influencia de la concentración de Na ₂ SiO ₃ sobre la resistencia a la compresión de morteros y pastas obtenidas por geopolimerización de polvo de ladrillo.....	44
3.1.2. Determinación de la influencia de la concentración de Na ₂ SiO ₃ sobre la porosidad de morteros y pastas obtenidas por geopolimerización de polvo de ladrillo.....	47
3.1.3. Determinación de la influencia de la concentración de Na ₂ SiO ₃ sobre la densidad de morteros y pastas obtenidas por geopolimerización de polvo de ladrillo.....	49
3.1.4. Determinación de la influencia de la concentración de Na ₂ SiO ₃ sobre el porcentaje de fases amorfas de morteros y pastas obtenidas por geopolimerización de polvo de ladrillo.....	52
3.1.5. Determinación de la influencia de la concentración de Na ₂ SiO ₃ sobre la formación de geles N-A-S-H de morteros y pastas obtenidas por geopolimerización de polvo de ladrillo.....	55
1 3.2. Prueba de Hipótesis.....	57
3.2.1. Determinación de la influencia de la concentración de Na ₂ SiO ₃ sobre la resistencia a la compresión de morteros y pastas obtenidas por geopolimerización de polvo de ladrillo.....	57

3.2.2. Determinación de la influencia de la concentración de Na_2SiO_3 sobre la porosidad de morteros obtenidos por geopolimerización de polvo de ladrillo.....	63
3.2.3. Determinación de la influencia de la concentración de Na_2SiO_3 sobre la densidad de morteros y pastas obtenidas por geopolimerización de polvo de ladrillo.....	66
3.2.4. Determinación de la influencia de la concentración de Na_2SiO_3 sobre el porcentaje de fases amorfas de morteros y pastas obtenidas por geopolimerización de polvo de ladrillo.....	71
3.2.5. Determinación de la influencia de la concentración de Na_2SiO_3 sobre la formación de geles N-A-S-H de morteros y pastas obtenidas por geopolimerización de polvo de ladrillo.....	72
38 IV. DISCUSIÓN.....	73
V. CONCLUSIONES.....	78
VI. RECOMENDACIONES.....	79
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	80
ANEXOS.....	84

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estructura esquemática microscópica de poros en morteros a base de cemento.....	25
Figura 2. Diagrama esquemático del proceso de geopolimerización.....	27
Figura 3. Solución de silicato de sodio.....	29
Figura 4. Preparación del Polvo de ladrillo: (a) ladrillos rojos de desecho recolectados y (b) polvo de ladrillo después de la molienda utilizada.....	30
Figura 5. Diagrama de flujo del procedimiento experimental.....	41
Figura 6. Gráfico de concentración de Na_2SiO_3 sobre la resistencia a la compresión de pastas obtenidas por geopolimerización de polvo de ladrillo.....	44
Figura 7. Gráfico de concentración de Na_2SiO_3 sobre la resistencia a la compresión de morteros obtenidos por geopolimerización de polvo de ladrillo.....	45
Figura 8. Gráfico de concentración de Na_2SiO_3 sobre la porosidad de morteros obtenidos por geopolimerización de polvo de ladrillo.....	47
Figura 9. Gráfico de concentración de Na_2SiO_3 sobre la densidad de pastas obtenidas por geopolimerización de polvo de ladrillo.....	49
Figura 10. Gráfico de concentración de Na_2SiO_3 sobre la densidad de morteros obtenidos por geopolimerización de polvo de ladrillo.....	50
Figura 11. Micrografías SEM de morteros obtenidos por geopolimerización de polvo de ladrillo en diferentes niveles de Na_2SiO_3 : (a) ME1-5M; (b) ME2-7.5M; (c) ME3-10.0 M y (d) ME4 -12.5M.....	52
Figura 12. Espectro FTIR de morteros obtenidos por geopolimerización de polvo de ladrillo a distintas concentraciones de Na_2SiO_3	55
Figura 13. Análisis de Varianza de la influencia de la concentración de Na_2SiO_3 sobre la resistencia a la compresión de pastas obtenidas por geopolimerización de polvo de ladrillo a 7 días.....	57

Figura 14. Análisis de Varianza de la influencia de la concentración de Na_2SiO_3 sobre la resistencia a la compresión de pastas obtenidas por geopolimerización de polvo de ladrillo a 14 días.....	4 58
Figura 15. Análisis de Varianza de la influencia de la concentración de Na_2SiO_3 sobre la resistencia a la compresión de pastas obtenidas por geopolimerización de polvo de ladrillo a 28 días.....	4 59
Figura 16. Análisis de Varianza de la influencia de la concentración de Na_2SiO_3 sobre la resistencia a la compresión de morteros obtenidos por geopolimerización de polvo de ladrillo a 7 días.....	15 60
Figura 17. Análisis de Varianza de la influencia de la concentración de Na_2SiO_3 sobre la resistencia a la compresión de morteros obtenidos por geopolimerización de polvo de ladrillo a 14 días.....	15 61
Figura 18. Análisis de Varianza de la influencia de la concentración de Na_2SiO_3 sobre la resistencia a la compresión de morteros obtenidos por geopolimerización de polvo de ladrillo a 28 días.....	15 62
Figura 19. Análisis de Varianza de la influencia de la concentración de Na_2SiO_3 sobre la porosidad de morteros obtenidos por geopolimerización de polvo de ladrillo a 7 días.....	63
Figura 20. Análisis de Varianza de la influencia de la concentración de Na_2SiO_3 sobre la porosidad de morteros obtenidos por geopolimerización de polvo de ladrillo a 14 días.....	64
Figura 21. Análisis de Varianza de la influencia de la concentración de Na_2SiO_3 sobre la porosidad de morteros obtenidos por geopolimerización de polvo de ladrillo a 28 días.....	65
Figura 22. Análisis de Varianza de la influencia de la concentración de Na_2SiO_3 sobre la densidad de pastas obtenidas por geopolimerización de polvo de ladrillo a 7 días.....	66
Figura 23. Análisis de Varianza de la influencia de la concentración de Na_2SiO_3 sobre la densidad de pastas obtenidas por geopolimerización de polvo de ladrillo a 14 días.....	67
Figura 24. Análisis de Varianza de la influencia de la concentración de Na_2SiO_3 sobre la densidad de pastas obtenidas por geopolimerización de polvo de ladrillo a 28 días.....	68

Figura 25. Análisis de Varianza de la influencia de la concentración de Na_2SiO_3 sobre la densidad de morteros obtenidos por geopolimerización de polvo de ladrillo a 7 días.....	69
Figura 26. Análisis de Varianza de la influencia de la concentración de Na_2SiO_3 sobre la densidad de morteros obtenidos por geopolimerización de polvo de ladrillo a 14 días.....	70
Figura 27. Análisis de Varianza de la influencia de la concentración de Na_2SiO_3 sobre la densidad de morteros obtenidos por geopolimerización de polvo de ladrillo a 28 días.....	71

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Niveles de estudio y Variables.....	35
Tabla 2. Operacionalización de variables.....	36

La presente investigación delimitó como objetivo determinar el efecto del Silicato de Sodio sobre las propiedades físico-químicas y mecánicas de pastas y morteros obtenidas por geopolimerización de polvo de ladrillo. Evaluando las propiedades físico-químicas como: densidad, porosidad, porcentaje de fases amorfas y formación de geles tipo N-A-S-H; como también las propiedades mecánicas como esfuerzo a la compresión. Esta investigación empleó una metodología de carácter aplicada, explicativa y cuantitativa, junto con un diseño experimental. Donde se conformaron entre 75 pastas cilíndricas, de dimensiones 25x50mm, y 75 morteros cúbicos; 50x50x50mm. Estas muestras contaron con un diseño de mezcla con parámetros de a/c 0.5 y v/v de conglomerante/agregado fino de 2/1. Donde se empleó como material conglomerante al polvo de ladrillo reciclado pasante por malla No 400 y como agregado fino; arena gruesa. Se sometió a activación alcalina al grupo control una solución de NaOH 8M, y al grupo experimental, una solución de Na₂SiO₃, en niveles de 5M, 7.5M, 10.0 M y 12.5M. Por último, las pastas y morteros obtenidos fueron caracterizados por métodos de Microscopía SEM y Espectroscopía FTIR. Del mismo modo fueron ensayados a esfuerzos de compresión a 7, 14 y 28 días según la norma ASTM C109. Como resultados se obtuvieron, que mientras la concentración del activador alcalino, Silicato de Sodio, incrementa en el rango de 5M a 10.0 M, las propiedades físico-químicas como las mecánicas, son afectadas. Aumentando la densidad, formación de geles tipo N-A-S-H y esfuerzo a la compresión. Como también, disminuyendo la porosidad y porcentaje de fases amorfas.

Palabras Clave: morteros, polvo de ladrillo, geopolimerización, silicato de sodio

ABSTRACT

The objective of this research was to determine the effect of Sodium Silicate on the physical-chemical and mechanical properties of pastes and mortars obtained by geopolymerization of brick dust. Evaluating the physical-chemical properties such as: density, porosity, percentage of amorphous phases and formation of N-A-S-H type gels; as well as mechanical properties such as compressive stress. This research used an applicative, explanatory and quantitative methodology, along with an experimental design. Where 75 cylindrical pastes, measuring 25x50mm, and 75 cubic mortars were formed; 50x50x50mm. These samples had a mix design with parameters of w/c 0.5 and v/v of binder/fine aggregate of 2/1. Where recycled brick dust passed through No. 400 mesh was used as a binding material and as fine aggregate; gross sand. An 8M NaOH solution was subjected to alkaline activation to the control group, and a Na₂SiO₃ solution to the experimental group, at levels of 5M, 7.5M, 10.0 M and 12.5M. Finally, the pastes and mortars obtained were characterized by SEM Microscopy and FTIR Spectroscopy methods. In the same way, they were tested at compression stresses at 7, 14 and 28 days according to the ASTM C109 standard. The results were obtained that while the concentration of the alkaline activator, Sodium Silicate, increases in the range from 5M to 10.0 M the physical-chemical properties, as well as the mechanical ones, are affected. Increasing density, formation of N-A-S-H type gels and compressive stress. As well as, decreasing the porosity and percentage of amorphous phases.

Keywords: *mortars, brick dust, geopolymerization, sodium silicate*

I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad convivimos con un mal constante, la cual constituye un desafío ambiental significativo. Hablamos de la contaminación por residuos de construcción, que emana de las masivas actividades de construcción y demolición que dan forma a nuestros paisajes urbanos. Entre estos materiales de desecho destacan los muros de ladrillo por su papel muy presente en el proceso constructivo. Esto plantea una preocupación apremiante, ya que la eliminación inadecuada de las paredes de ladrillo contribuye a la degradación de la tierra, las emisiones de gases de efecto invernadero y el agotamiento de los recursos. Los métodos de reciclaje efectivos son esenciales para mitigar estos impactos. Sin embargo, reciclar paredes de ladrillo presenta desafíos complicados debido a las diversas composiciones, contaminación y estándares de calidad. Los enfoques innovadores como las tecnologías de clasificación avanzada, los procesos químicos y los modelos de economía circular son prometedores, pero enfrentan barreras como infraestructura insuficiente y conciencia limitada. A medida que navegamos por el complejo panorama de la gestión de residuos de la construcción, se vuelve cada vez más urgente desarrollar estrategias de reciclaje sostenibles que aborden específicamente los desafíos únicos que plantean los residuos de las paredes de ladrillo (Skinder et al., 2013).

A nivel mundial, esta problemática ha atraído una mayor atención a medida que se acelera la urbanización y aumentan las actividades de construcción para satisfacer las demandas de las poblaciones en crecimiento. Este fenómeno ha llevado a la proliferación de residuos de construcción, contribuyendo significativamente a la degradación ambiental. En todo el mundo, los desechos de la construcción manejados de manera inadecuada no solo ocupan tierras preciosas, sino que también liberan contaminantes nocivos al aire, el suelo y las vías fluviales. El desafío específico de reciclar paredes de ladrillo amplifica este problema, ya que su naturaleza duradera las convierte en un flujo de residuos duradero que exige soluciones sostenibles. Los métodos existentes para el reciclaje de ladrillos a menudo se quedan cortos debido a la compleja combinación de materiales, los problemas de contaminación y la necesidad de normas de calidad estrictas (Skinder et al., 2013).

En Australia, por ejemplo, en 2011, entre el 85 y el 90 % de las viviendas nuevas se construyeron con paredes exteriores de ladrillo y pisos de concreto. En 2018-2019, los tres principales productos de construcción en Australia fueron ladrillos para fachada (65.5

%), ladrillos comunes (22.11 %) y adoquines de arcilla (12.4 %). Se estima que estos representan el 50-70% de los residuos de construcción producidos por la remodelación urbana y el 30-50% por las operaciones de construcción (Maqsood et al., 2019).

En nuestro país, Perú, se experimenta una fuerte urbanización, donde se puede destacar a la problemática de la autoconstrucción. Representando entre el 60% y el 75% de la construcción en el país y que ha superado consistentemente al mercado formal durante al menos cinco años, independientemente del área geográfica (Gaillard, 2019). La ausencia de un marco consolidado de gestión de residuos conduce a una insignificante tasa de reciclaje de solo 5-10%. Generando dificultades, ya que los fragmentos de las estructuras demolidas se dispersan por las áreas desocupadas, lo que contribuye sustancialmente a una prevalencia del 60% de contaminación urbana antiestética. Las consecuencias socioeconómicas son igualmente alarmantes, considerando que el 45.9% de los habitantes urbanos del Perú habita barrios marginales donde la acumulación de desechos magnifica los riesgos para la salud y perturba la armonía comunal (The Economist, 2019).

Antes esta problemática, se planteó como método innovador para poder reciclar estos residuos de ladrillos ⁶⁶ en la industria de la construcción. El cual consiste en utilizar la geopolimerización como método de alcalinización para mejorar las propiedades mecánicas de pastas y morteros. La geopolimerización es un proceso que crea materiales cementosos utilizando subproductos industriales o materiales de desecho, reduciendo la dependencia de la producción de cemento tradicional y minimizando el impacto ambiental. En este enfoque, los desechos de ladrillo se trituran y se muelen finamente para crear un material puzolánico que puede servir como reemplazo del cemento en las pastas y morteros. Planteándonos la pregunta ¹¹ ¿Cuál es el efecto del silicato de sodio (Na_2SiO_3) ¹¹ sobre las propiedades físico-químicas y mecánicas de pastas y morteros obtenidas por geopolimerización de polvo de ladrillo?

El propósito de esta investigación, pretendió ⁴⁵ determinar en qué medida la concentración de Silicato de Sodio (Na_2SiO_3) influye en las propiedades físico-químicas y mecánicas en pastas y morteros a partir de polvo de ladrillo. De este modo, los residuos de bloques de ladrillo de construcción al ser activados mediante la geopolimerización, pueden aportar mejores propiedades de desempeño tanto en el ámbito económico, funcional y ambiental.

Esta investigación poseyó una justificación de suma importancia en el ámbito de la construcción sostenible. Con una creciente necesidad de prácticas eficientes en el uso de recursos y una utilización innovadora de los desechos, este estudio aborda las brechas críticas al examinar cómo la geopolimerización puede mejorar el rendimiento de las pastas y morteros. Esta investigación se alinea con los objetivos de sostenibilidad global y ofrece un camino hacia la reducción del impacto ambiental al tiempo que mejora la eficacia de los materiales de construcción.

Como enfoque práctico, esta investigación respondió directamente a la demanda apremiante de materiales de construcción sostenibles y estrategias de reducción de residuos. Al explorar la utilización del polvo de ladrillo como sustituto del cemento y mejorar sus propiedades a través de la geopolimerización con silicato de sodio, esta investigación ofrece soluciones prácticas para mejorar el rendimiento de las pastas y morteros. Las implicaciones prácticas se extienden al ahorro potencial de costos, la reducción de la huella ambiental y la promoción de prácticas de economía circular.

La base teórica de esta investigación recayó en los principios de la ciencia de los materiales, la química de los geopolímeros y la mecánica de los compuestos. Al profundizar en las reacciones químicas entre el polvo de ladrillo y el silicato de sodio durante la geopolimerización y comprender su impacto en las propiedades fisicoquímicas y mecánicas de las pastas y morteros, este estudio contribuye a los avances teóricos en estos campos. La investigación también se basa en el conocimiento existente sobre la utilización de residuos, materiales de construcción sostenibles y técnicas de construcción innovadoras.

La justificación socioambiental radicó en su potencial para abordar las preocupaciones ambientales y sociales. Al incorporar polvo de ladrillo en los morteros y mejorar sus propiedades a través de la geopolimerización, este estudio reduce la demanda de producción de cemento tradicional, lo que lleva a una disminución de las emisiones de carbono. Además, los resultados de la investigación tienen el potencial de mitigar los grandes números de residuos sólidos encontrados en nuestra localidad, conservar los recursos naturales y contribuir a mejorar la calidad del ambiente en los proyectos de construcción.

El enfoque metodológico caracterizó por su rigurosa metodología científica y análisis integral. Se realizaron pruebas de laboratorio para optimizar el proceso de

geopolimerización utilizando silicato de sodio ¹⁰ y polvo de ladrillo como sustituto del cemento. Los análisis fisicoquímicos cuantificaron los cambios en la composición y reactividad del material. Las pruebas mecánicas evaluaron los efectos sobre la resistencia y la durabilidad. El uso de metodologías estandarizadas aseguró ⁶⁴ la validez de los resultados de la investigación.

Esta investigación ⁴⁹ buscó mediante su objetivo general determinar el efecto del Silicato de sodio (Na_2SiO_3) sobre las propiedades fisico-químicas y mecánicas de pastas y morteros obtenidas por geopolimerización de polvo de ladrillo.

De la misma forma planteó como objetivos específicos como: determinar las propiedades físicas como densidad y porosidad mediante ensayos estándar ASTM C188, como la caracterización microscópica de morfología mediante el método SEM de las pastas y morteros. Determinar las propiedades químicas mediante ensayos estándar FTIR a través de la evaluación de grupos funcionales resultantes de las pastas y morteros. Como también, determinar las propiedades mecánicas en esfuerzos de compresión siguiendo la norma ASTM C109 de las pastas y morteros mediante ensayos estándar.

En cuanto a la hipótesis planteada consistió en que el incremento de la concentración de silicato de sodio en el rango de 5M a 12.5M, modifica la composición química; de forma que aumenta ¹⁸ la formación de geles tipo N-A-S-H de pastas y morteros obtenidas por geopolimerización de polvo de ladrillo. Modifica ¹³ la resistencia mecánica, de modo que aumenta la resistencia a la compresión de pastas y morteros obtenidas por geopolimerización de polvo de ladrillo. De igual forma, modifica las propiedades físicas; de modo que incrementa la densidad y porcentaje de fases amorfas, como también disminuye la porosidad de pastas y morteros obtenidos por geopolimerización de polvo de ladrillo.

Como antecedentes de investigación a escala internacional, se tomó en cuenta a Mohseni (2018) en su investigación tuvo como objetivo de investigación el poder examinar el efecto de la relación $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ en el rendimiento de compuestos de geopolímero reforzado con fibra de polipropileno. Se utilizaron diferentes proporciones de silicato de sodio (SS) e hidróxido de sodio (SH), así como diferentes porcentajes de fibras de polipropileno en relación a metacaolín (MK) como matriz. Los ensayos se llevaron a cabo de acuerdo con las normativas AS1012.9, AS1012.21 y ACI Committee 222 para medir ¹ la resistencia a la compresión, absorción de agua y resistividad eléctrica,

respectivamente. Los resultados mostraron que aumentar la proporción de silicato de sodio (SS) e hidróxido de sodio (SH) de 2 a 3 se incrementa la resistencia a la compresión en hasta 10 MPa. Además, se observó una mejora en la resistencia eléctrica y una disminución en la absorción de agua con el aumento de la proporción de SS/SH. Para las muestras con una proporción de monómeros de 2.5 y un contenido de fibras de polipropileno del 0.3%, 0.5% y 1%, la resistencia eléctrica aumentó en un 94%, 91% y 80% respectivamente en comparación con las muestras similares con una proporción de monómeros de 2. En cambio, para las muestras con una proporción de monómeros de 3, la resistencia eléctrica aumentó en un 119%, 102% y 82% respectivamente. En cuanto a la absorción de agua, se observó que al aumentar la proporción de silicato de sodio e hidróxido de sodio de 2 a 2.5, la absorción de agua disminuyó drásticamente en un 17%, 13% y 15% respectivamente. Mientras que el uso de una proporción de monómeros de 3 en el concreto geopolimérico redujo la absorción de agua en un 22%.

Por su parte, Mijarsh et al. (2015) plantearon el objetivo de su investigación de evaluar el efecto de la variación de concentraciones de Na_2SiO_3 que afecta al desarrollo de la resistencia a la compresión de morteros geopoliméricos sintetizados a partir de cenizas de combustible de aceite de palma tratadas (TPOFA), con un período de curado de hasta 120 días. Los morteros geopoliméricos se prepararon utilizando mezclas de material sólido y un activador alcalino. Los materiales sólidos utilizados fueron TPOFA (material de origen) y aditivos minerales ($\text{Ca}(\text{OH})_2$, $\text{Al}(\text{OH})_3$ y humo de sílice). El activador alcalino se preparó a partir de Na_2SiO_3 . Los dos factores principales considerados fueron el tiempo de demora (1 y 24 h) y la variación de las concentraciones de Na_2SiO_3 (alta, media y baja). Los cambios en el desarrollo de la resistencia a la compresión por la norma ASTM C109/C109M-12, que es el método de prueba estándar para la resistencia a la compresión de morteros de cemento hidráulico, se examinaron utilizando difracción de rayos X y se confirmaron mediante análisis de FTIR. Los resultados para la resistencia a la compresión estuvieron de acuerdo con los cambios de fase y el análisis cuantitativo de difracción de rayos X (QXRD), y también coincidieron con el análisis de FTIR. Encontrando que las mezclas con un tiempo de retraso de 24 h y una alta concentración de Na_2SiO_3 tuvieron un mayor desarrollo de la resistencia a la compresión a los 120 días (78,0% con respecto a los 28 días) con 49MPa.

También Ridzuan et al. (2014) tuvieron como objetivo de su investigación de poder evaluar el efecto de diferentes concentraciones de solución de NaOH y diferentes

tipos de Na_2SiO_3 en la resistencia a compresión de concreto geopolimérico. Se utilizaron dos tipos de Na_2SiO_3 , en forma de polvo y en forma líquida (*waterglass*), con tres concentraciones diferentes de NaOH (8M, 12M y 14M). Los especímenes de concreto se fabricaron en moldes de acero con dimensiones de 100 mm x 100 mm x 100 mm y se compactaron en una mesa vibratoria durante 2 segundos. Después de 24 horas de curado a temperatura ambiente, se realizaron pruebas de resistencia a compresión a los 3, 7, 14 y 28 días. Los resultados mostraron que la concentración de NaOH de 12M y el tipo de Na_2SiO_3 líquido obtuvieron la resistencia más alta de 7.4MPa.

A su vez, Ding et al. (2022) en su investigación se centraron en estudiar el efecto del módulo de Silicato de Sodio en las propiedades mecánicas de un geopolímero de agregado reciclado (GRAC). El objetivo fue analizar la resistencia a compresión, el efecto del tamaño de las muestras, la curva de esfuerzo-deformación y establecer una ecuación constitutiva para el GRAC. El método utilizado consistió en preparar muestras de GRAC con diferentes módulos de Silicato de Sodio y realizar pruebas de resistencia a compresión, análisis de microestructura mediante SEM y difracción de rayos X. Se utilizaron normas nacionales para las pruebas mecánicas de concreto ordinario. Los resultados obtenidos mostraron que el módulo de Silicato de Sodio afecta significativamente las propiedades mecánicas del GRAC. Se observó que a medida que el módulo de Silicato de Sodio aumenta, la resistencia a compresión disminuye. Además, se encontró que el tamaño de las muestras también influye en la resistencia, y se propuso un coeficiente de conversión de tamaño específico para el GRAC. En términos numéricos, se obtuvieron valores de resistencia a compresión para diferentes módulos de Silicato de Sodio, como 28 MPa a los 28 días para un módulo de 0.9 y 15 MPa para un módulo de 2.4. También se establecieron ecuaciones constitutivas para describir el comportamiento esfuerzo-deformación del GRAC. En conclusión, se encontró que el módulo de Silicato de Sodio tiene un impacto significativo en las propiedades mecánicas del GRAC. Se identificaron dos estructuras de gel diferentes en el producto de hidratación del geopolímero; N-A-S-H (silice de aluminio de sodio) y N-A-S-H (silicato de calcio de aluminio hidratado), que contribuyen a la resistencia a compresión. Además, se determinó que el coeficiente de conversión de tamaño para el GRAC no puede seguir la norma nacional existente para el concreto ordinario. Se propuso un método segmentado para calcular el coeficiente de conversión de tamaño del GRAC.

De igual manera, Du y Liu (2020) en su investigación trataron los efectos del módulo y contenido de Silicato de Sodio en el tiempo de fraguado y propiedades mecánicas de geopolímeros de ceniza volante y escoria. El objetivo fue estudiar el tiempo de fraguado y las propiedades mecánicas de los geopolímeros y analizar el mecanismo de reacción interna. El método utilizado fue realizar pruebas de tiempo de fraguado y resistencia a compresión en muestras de geopolímero preparadas con diferentes módulos y contenidos de Silicato de Sodio. Se utilizaron las normas GB/T1346-2011 para la prueba de tiempo de fraguado y GB/T17671-1999 para la prueba de resistencia a compresión de mortero de cemento. Los resultados obtenidos mostraron que el tiempo de fraguado (fraguado inicial y fraguado final) de los geopolímeros de ceniza volante y escoria aumenta con el aumento del módulo de la solución de silicato de sodio. La resistencia a compresión aumenta primero hasta 35MPa y luego disminuye con el aumento del módulo hasta 30 MPa. El rango óptimo de módulo es de 1.2 a 1.5. Con el aumento del contenido Silicato de Sodio, el tiempo de fraguado del material de la mezcla se vuelve más corto. Cuando el contenido de Silicato de Sodio aumenta a más del 20%, la resistencia a compresión tiende a disminuir. En conclusión, se encontró que el módulo y contenido de Silicato de Sodio tienen un impacto significativo en el tiempo de fraguado y propiedades mecánicas de los geopolímeros de ceniza volante y escoria. Se determinó que el rango óptimo de módulo es de 1.2 a 1.5 para obtener mejores propiedades mecánicas. Estos hallazgos proporcionan información importante para mejorar la tecnología de preparación de geopolímeros a partir de ceniza volante y escoria.

Así mismo, Enoh y Ushie (2023) en su investigación estudiaron el efecto de la relación silicato/hidróxido (SS/SH) y la concentración de hidróxido de sodio (SH) en las propiedades mecánicas de los aglutinantes geopoliméricos a base de metacaolín. El objetivo fue determinar cómo estos factores afectan el desarrollo de la resistencia a compresión y flexión de los aglutinantes. Para llevar a cabo la investigación, se utilizaron cuatro relaciones SS/SH (0.5, 1.0, 1.5 y 2.0) y cuatro concentraciones de SH (8M, 10.0 M, 12M y 14M) con metacaolín calcinado a 800 °C. Se realizaron pruebas físicas y mecánicas en dieciséis muestras a edades de prueba de 7, 14 y 28 días. Se utilizaron las normas ASTM C109 y ASTM C293 para las pruebas de resistencia a compresión y flexión, respectivamente. Los resultados mostraron que tanto la relación SS/SH como la concentración de SH tuvieron un efecto significativo en el desarrollo de la resistencia a compresión de los aglutinantes geopoliméricos. Ambos valores contribuyeron

significativamente al desarrollo de la resistencia a compresión alcanzando una resistencia de 15MPa para las mezclas de relación SS/SH 1 y de molaridad 10. La densidad promedio de los aglutinantes geopoliméricos fue de 1.86 g/cm³, y se observó un aumento en la densidad con el aumento de la relación SS/SH y la concentración de SH, siendo 2M 14 (relación SS/SH 2 y de molaridad 14) el aglutinante con la densidad máxima de 1.95 g/cm³. En conclusión, la relación SS/SH y la concentración de SH tienen un impacto significativo en las propiedades mecánicas de los aglutinantes geopoliméricos a base de metacaolín.

Finalizando con Handayani et al. (2021) en su investigación, estudiaron las propiedades de las pastas geopoliméricas fabricadas con ceniza de cáscara de arroz y la producción de sílice mediante la activación alcalina. El objetivo principal fue analizar el efecto de la concentración de NaOH en la formación de enlaces químicos y en la resistencia a la compresión de las pastas geopoliméricas y a la vez estudiar al contenido de silicato de sodio. El método utilizado consistió en la preparación de las pastas geopoliméricas utilizando diferentes concentraciones de NaOH (8M, 10.0 M y 12M) y realizando pruebas de microscopía electrónica de barrido (SEM) y espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) para analizar la microestructura y los grupos funcionales presentes en las pastas. Las normas utilizadas para las pruebas de resistencia a la compresión fueron las especificaciones de ASTM C109. Se realizaron pruebas a los 7, 28 y 56 días de edad de las pastas y se registraron los valores de resistencia a la compresión. Los resultados obtenidos mostraron que el contenido de silicato de sodio aumentó con el aumento de la concentración de NaOH. La concentración de 10.0 M de NaOH mostró un aumento significativo en la resistencia a la compresión, mientras que la concentración de 12M mostró una disminución en la resistencia debido a la falta de dispersión de sílice en la formación de los enlaces geopoliméricos. En términos numéricos, se obtuvieron los siguientes resultados: la concentración de sílice después del tratamiento fue del 65.84% para 8M de NaOH, 70.53% para 10.0 M de NaOH y 72.06% para 12M de NaOH. La resistencia a la compresión fue de 27.53 MPa para 10.0 M NaOH y 23.89 MPa para 12M de NaOH. En conclusión, se observó la formación de compuestos de silicato de calcio hidratado (C-S-H) y aluminosilicatos de sodio hidratado (N-A-S-H) en las pastas geopoliméricas.

Por su parte como antecedentes a escala nacional, se consideró a Hermoza (2019) en su investigación donde tuvo como objetivo la influencia de cenizas derivadas del

volcán Ubinas (denominado CV), en morteros de cemento Portland y morteros geopoliméricos con agregado fino local (denominado AL). Los morteros geopoliméricos fueron activados alcalinamente utilizando hidróxido de sodio (NaOH) e hidróxido de sodio con inclusión de silicato de sodio (NaOH + Na₂SiO₃), conteniendo ambas soluciones una concentración de NaOH 12M. Los especímenes se crearon utilizando el método de compactación de molde de pistón, con relaciones líquido-sólido (L/S) variables de 0.1, una relación sólido:sólido de 1:1 y muestras con una relación diámetro/altura (d/H) de 1/2. Las propiedades mecánicas de las probetas se evaluaron realizando pruebas de resistencia a la compresión después de 7, 14 y 28 días de curado. Se obtuvieron resultados de morteros de cemento presentando una resistencia media de hasta 29.36 MPa en los morteros CV+AL+NaOH, mientras que los morteros CV+AL+NaOH presentaron una resistencia media de 24.59 MPa y los morteros CV+NaOH+Na₂SiO₃ presentaron una resistencia de hasta 14.15 MPa después de 28 días de prueba. Se encontró que la mayor porosidad se observó en los morteros con aditivo de silicato de sodio en el activador, atribuido a la baja reactividad. Se estableció una clara relación inversa entre la densidad de todos los grupos de mortero y la absorción. Los morteros geopoliméricos activados alcalinamente mostraron estructuras mineralógicas como andesina, augita, anortita, óxido de silicio y dióxido. Los morteros geopoliméricos demostraron una matriz uniforme y continua, mostrando una interacción robusta entre los componentes reactivos. En los morteros geopoliméricos activados con adición de silicato de sodio se evidenció la presencia de poros, cenizas no reactivas y partículas de agregado.

También, Calderon (2022) en su investigación tuvo como objetivo de producir morteros geopoliméricos mediante activación alcalina y la posterior evaluación de sus atributos físicos, mecánicos y microestructurales. Este proceso de activación alcalina se realizó empleando dos tipos diferentes de activadores a una concentración de 12M: hidróxido de sodio (NaOH) e hidróxido de sodio con la suplementación de silicato de sodio Na(OH)+Na₂SiO₃. Estos activadores se utilizaron junto con ceniza volcánica y distintos agregados finos peruanos provenientes de Arequipa y Lima. Las condiciones experimentales abarcaron una relación líquido-sólido de 0.1, una relación sólido de 1:1, la adición de 25% de silicato de sodio en la solución activadora de Na(OH) y la incorporación de agregados finos de diversos orígenes para la formulación de los morteros geopoliméricos. Las probetas se prepararon utilizando la técnica de compactación y curado, respetando las condiciones de curado predeterminadas (48 horas

a 80°C). Los morteros geopoliméricos se sometieron a una serie de evaluaciones que incluyen análisis de difracción de rayos X, mediciones de absorción y densidad, pruebas de resistencia a la compresión mecánica y examen de microscopía electrónica de barrido. Resultando la disolución de las partículas de ceniza volcánica y la formación de la matriz geopolimérica mejorando en presencia de NaOH, particularmente cuando se empleó arena de Arequipa. La resistencia a la compresión de los morteros generados a partir de ceniza volcánica mostró valores que oscilaron entre 11.38 MPa y 24.57 MPa después de un período de curado de 28 días, lo que indica la idoneidad potencial de estos materiales para su uso en aplicaciones de construcción.

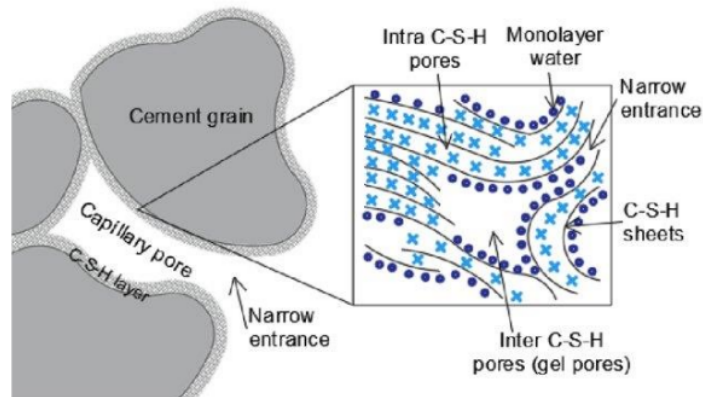
Culminando con, Regalado y Goicochea (2020) quienes tuvieron como objetivo evaluar cómo la incorporación de remanentes no quemados y la inclusión de molienda de cenizas precalcínadas a diferentes temperaturas que influyen en la resistencia a la compresión y la porosidad en geopolímeros. Las cenizas utilizadas constituyeron una mezcla de 60% de cenizas volantes de carbón y 40% de cenizas de bagazo de caña de azúcar. Se seleccionaron tres temperaturas de precalcínación distintas, cada una de las cuales se sometió a un proceso de precalcínación de 2 horas, lo que arrojó porcentajes específicos de remanentes sin quemar. A 350°C se obtuvo un 19.54% de remanentes sin quemar; a 450°C, fue del 11.86%; y a 550°C, sólo 1.95%. Aquellas cenizas que se sometieron a precalcínación sin trituración arrojaron un tamaño promedio inferior a 75 µm. Después de someterse a un tratamiento térmico y mecánico, los geopolímeros se fabricaron utilizando una solución de hidróxido de sodio 10 M, silicato de sodio y agua adicional. Posteriormente se realizó un proceso de curado térmico a 80°C por 24 horas, seguido de un curado ambiental de 7 y 28 días. El grupo que exhibió la mayor resistencia a la compresión, alcanzando los 96 MPa, fue el que tuvo restos no quemados con menos del 2%. Esto se logró mediante precalcínación a 550°C durante 2 horas, combinada con la inclusión de molienda. No obstante, se observó que, para los grupos con mayores porcentajes de remanentes no quemados, la adición de molienda provocó una disminución de la resistencia del geopolímero y un aumento de la porosidad. A pesar de ello, todos los grupos lograron superar el requisito de resistencia estipulado por la Norma ASTM C-595, que exige una resistencia mínima de 25 MPa para morteros con cemento adicionado. El porcentaje de porosidad de los geopolímeros fue notablemente mayor en comparación con los morteros de cemento, pero en comparación con otros geopolímeros a base de ceniza de cascarilla de arroz, fue relativamente menor. El porcentaje de porosidad

promedio se midió en 35% y mostró una tendencia ascendente con la mayor presencia de remanentes no quemados dentro de las cenizas.

Con respecto a las bases teóricas, empezamos a describir a un mortero de cemento, el cual es una mezcla de cemento, arena y agua que forma una pasta plástica y trabajable en la preparación inicial, que se endurece gradualmente con el tiempo a través de un proceso llamado hidratación. Las partículas de cemento reaccionan químicamente con el agua, formando compuestos cristalinos que unen las partículas de arena. Esta matriz sólida resultante crea un material cohesivo y duradero que se utiliza en diversas aplicaciones de construcción, como mampostería, enyesado, enlucido y reparaciones estructurales (Wang et al. 2013).

Figura 1

Estructura esquemática microscópica de poros en morteros a base de cemento (Tintisan, 2022)



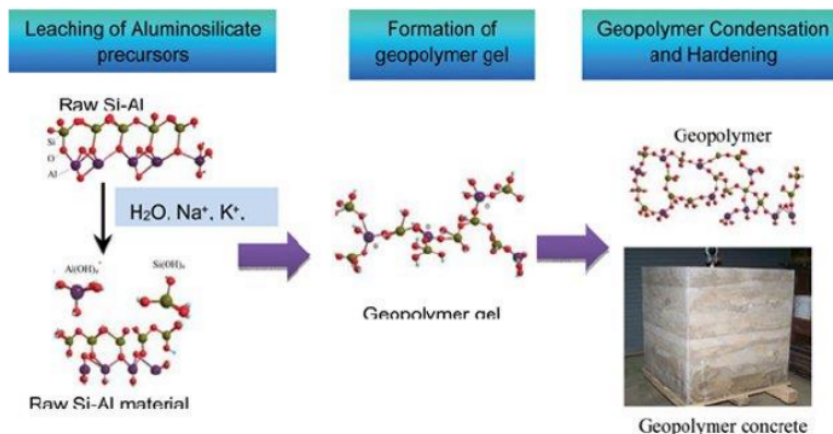
Las propiedades de estos morteros están influenciadas por la composición y proporciones de sus constituyentes. El tipo de cemento utilizado, como cemento Portland o mezclas especializadas, afecta características como el tiempo de fraguado, el desarrollo temprano de la resistencia y la resistencia a condiciones adversas. El tamaño de las partículas y la clasificación de la arena influyen en la trabajabilidad, la textura y la resistencia general. La relación agua-cemento afecta directamente la resistencia y la durabilidad finales, y el exceso de agua puede comprometer la estructura. Además, se pueden agregar aditivos para modificar propiedades, como acelerar o retardar el tiempo de fraguado, mejorar la trabajabilidad o mejorar la resistencia del mortero a factores ambientales específicos (He et al., 2020).

Los morteros de cemento son fundamentales en la construcción por su versatilidad y funciones vitales. Sirven como el adhesivo que une las unidades de mampostería, como ladrillos y bloques, en varios patrones y configuraciones, formando muros de carga y sin carga. Los morteros también brindan una capa suave y protectora sobre los elementos estructurales, lo que contribuye a su longevidad y estética. Más allá de las aplicaciones estructurales, los morteros de cemento son cruciales en proyectos de restauración y rehabilitación, donde pueden reparar grietas, llenar vacíos y restablecer la resistencia original de estructuras envejecidas. La capacidad de los morteros de cemento para adherirse de forma segura a diversos sustratos garantiza la estabilidad, la distribución de la carga y la integridad estructural general (Wang et al. 2013).

Por su parte, estos materiales encuentran amplias aplicaciones en diversas industrias. ⁶⁵ En el ámbito de la ingeniería civil y la construcción, son la piedra angular de proyectos residenciales, comerciales e industriales. Los morteros facilitan la construcción de edificios, puentes y carreteras, proporcionando las características de adherencia y carga necesarias. Arquitectónicamente, los morteros de cemento contribuyen tanto a los aspectos estructurales como estéticos, lo que permite a los arquitectos lograr las texturas, los colores y los acabados deseados. Para la preservación histórica, los morteros se pueden personalizar para que coincidan con los materiales originales al tiempo que ofrecen una mayor durabilidad y resistencia a la intemperie. Su adaptabilidad se extiende a industrias como el diseño de jardines, donde los morteros ayudan a crear muros de contención, pasarelas y elementos decorativos (Wang et al. 2013).

Pasando a el tema de geopolimerización, este es un proceso químico pionero e innovador que implica la creación de polímeros inorgánicos a partir de materiales de aluminosilicatos, como cenizas volantes, escoria, arcilla y otros subproductos industriales, mediante la utilización ²⁵ de activadores alcalinos. A diferencia de los ¹⁰ materiales tradicionales a base de cemento que se basan en la hidratación de los silicatos de calcio, la geopolimerización funciona según el principio de la formación de redes poliméricas a través de la reacción de los materiales de origen con soluciones alcalinas, que a menudo contienen hidróxido de sodio o hidróxido de potasio. Esta reacción produce estructuras moleculares tridimensionales, lo que da como resultado a materiales de geopolímeros que muestran una fuerza mecánica, una durabilidad y una resistencia impresionantes a diversos factores ambientales (Luhar et al., 2019).

Diagrama esquemático del proceso de geopolimerización (Rao y Liu, 2015)



Poseyendo una diversa gama de propiedades que los distinguen de los materiales convencionales a base de cemento. Estas propiedades están influenciadas por la composición específica de los materiales de origen, los activadores alcalinos, las condiciones de curado y el tiempo de curado. Los geopolímeros generalmente exhiben una excelente resistencia a la compresión, a menudo superando la de los materiales ordinarios a base de cemento Portland. Su baja porosidad contribuye a una mayor durabilidad y resistencia al ataque químico, haciéndolos adecuados para aplicaciones en ambientes agresivos. Los geopolímeros también demuestran una alta resistencia al fuego debido a su estructura química inherente. Además, su desarrollo de resistencia a edad temprana y tasas de contracción relativamente bajas son ventajosas para una construcción rápida y un potencial de agrietamiento reducido (Assi, 2018).

La geopolimerización tiene una importancia inmensa en los campos de la construcción sostenible y la preservación del medio ambiente. La producción de cemento tradicional es responsable de una parte significativa de las emisiones globales de dióxido de carbono, lo que hace que el desarrollo de sistemas aglutinantes alternativos, como los geopolímeros, sea crucial para reducir la huella de carbono de la industria de la construcción. La geopolimerización proporciona una vía para utilizar materiales de desecho industrial como precursores, transformándolos en materiales de construcción de valor agregado. Al promover la utilización de desechos y reducir el consumo de recursos

naturales finitos, la geopolimerización se alinea con los principios de economía circular y eficiencia de recursos. Además, los materiales de geopolímeros contribuyen a la reducción de los residuos de los vertederos y promueven la sostenibilidad general de las prácticas de construcción (Luhar et al., 2019).

Finalmente tiene una amplia gama de aplicaciones en diferentes sectores. En la construcción, los materiales de geopolímero se pueden utilizar para producir materiales similares al concreto, elementos estructurales e incluso componentes arquitectónicos. Ofrecen una alternativa ecológica al concreto tradicional al mismo tiempo que proporcionan excelentes propiedades mecánicas y durabilidad. Los geopolímeros son especialmente adecuados para aplicaciones en entornos hostiles, como instalaciones de tratamiento de aguas residuales, plantas de procesamiento químico y estructuras marinas debido a su resistencia a productos químicos, ácidos y sulfatos. Además, los materiales de geopolímero encuentran uso en la ingeniería geotécnica, donde pueden emplearse para la estabilización y mejora del suelo. Su resistencia térmica los hace atractivos para la producción de materiales refractarios en industrias de alta temperatura como la metalurgia (Rao y Liu, 2015).

Ahora, como activador alcalino, tenemos a él silicato de sodio, el cual frecuentemente denominado *waterglass*, es un compuesto inorgánico con la fórmula química Na_2SiO_3 o Na_2SiO_4 , según la proporción de óxido de sodio (Na_2O) y dióxido de silicio (SiO_2). Se produce fusionando arena de sílice o cuarzo con carbonato de sodio (ceniza de sosa) a altas temperaturas. Este proceso produce una gama de productos de silicato de sodio con proporciones variables de óxido de sodio a dióxido de silicio, cada uno con propiedades y aplicaciones únicas. En solución, el silicato de sodio existe como un líquido alcalino que contiene iones de silicato y puede solidificarse en una sustancia similar al vidrio bajo ciertas condiciones (Shaik y Vummaneni, 2017).

Figura 3

Solución de silicato de sodio (Shaik y Vummaneni, 2017)



El silicato de sodio cuenta con una amplia gama de propiedades que lo hacen valioso en numerosas aplicaciones. Su solubilidad en agua permite la creación de soluciones de silicato de sodio, que tienen propiedades adhesivas, aglutinantes y selladoras. Estas soluciones pueden infiltrarse en materiales porosos, creando enlaces fuertes cuando el solvente se evapora. La capacidad del silicato de sodio para reaccionar con diversas sustancias, como compuestos de calcio, ácidos y metales, conduce a la formación de compuestos de silicato insolubles, que encuentran uso en materiales cementosos, revestimientos resistentes al fuego y otras aplicaciones. Además, su alto pH contribuye a sus cualidades inhibitorias de la corrosión (Shaik y Vummaneni, 2017).

Su importancia se extiende a través de las industrias debido a su adaptabilidad y atributos funcionales. En el ámbito de la construcción y la ingeniería civil, sirve como aditivo para el concreto, mejorando la durabilidad del material, la resistencia al ataque químico y la capacidad de unión. Las características resistentes al fuego del silicato de sodio lo convierten en un componente valioso en revestimientos, adhesivos y selladores para la protección contra incendios. En el sector de la automoción, previene la corrosión creando barreras protectoras en las superficies metálicas. El silicato de sodio también tiene aplicaciones en la producción de detergentes, cerámicas y catalizadores. Su utilidad en el tratamiento del agua, como floculante y coagulante, aborda problemas ambientales y de salud pública (Mokhtar y Mah, 2021).

Las aplicaciones prácticas de este reactivo, vienen a ser innumerables. En el arte y la artesanía, se utiliza para hacer moldes, vaciados y esculturas debido a sus propiedades

aglutinantes y endurecedoras. En el ámbito de la agricultura, el silicato de sodio actúa como estabilizador del suelo, ayudando a controlar la erosión del suelo y retener la humedad. Su potencial como recubrimiento ignífugo encuentra uso en la protección de la vegetación y los materiales en áreas propensas a incendios. La industria automotriz emplea silicato de sodio como sellador de motores y sellador de fugas de radiadores. En química, contribuye a la creación de catalizadores, particularmente en la producción de biodiesel. Además, su papel en los textiles, los detergentes y el tratamiento del agua subraya su importancia en los productos cotidianos (Mokhtar y Mah, 2021).

Finalmente abordamos al polvo de ladrillo reciclado, el cual es un material de construcción innovador derivado del reciclaje de ladrillos viejos o demolidos. A través de un proceso de trituración o trituración de ladrillos desechados hasta convertirlos en un polvo fino, este material se crea como un subproducto valioso del reciclaje de ladrillos. El polvo resultante se compone de partículas finamente molidas que abarcan un espectro de tamaños, que van desde granos similares a la arena hasta fragmentos más gruesos. A pesar de ser reutilizado, el polvo de ladrillo reciclado mantiene las características inherentes de los ladrillos, incluida su composición mineral, textura e incluso variaciones de color. Este material único ofrece la oportunidad de aprovechar los atributos de los ladrillos en una nueva forma, abriendo vías para prácticas de construcción sostenible (Rao, 2020).

Figura 4

Preparación del Polvo de ladrillo: (a) ladrillos rojos de desecho recolectados y (b) polvo de ladrillo después de la molienda utilizada (Zhao et al., 2021)



Las propiedades del polvo de ladrillo reciclado están íntimamente ligadas a su origen como material de ladrillo. Al conservar las cualidades de los ladrillos originales, exhibe características intrigantes que lo hacen adecuado para diversas aplicaciones. El polvo posee inherentemente propiedades aglutinantes debido al contenido de arcilla natural de los ladrillos, lo que puede ser ventajoso para fines de construcción. Su comportamiento de compactación es favorable, posibilitando su uso en aplicaciones que requieran materiales densos y estables. Además, la porosidad inherente a los ladrillos también está presente en el polvo de ladrillo reciclado, lo que contribuye a las buenas características de drenaje y al potencial de absorción de humedad controlada. Las variaciones de textura y color añaden un atractivo estético, ofreciendo una oportunidad para elementos de diseño únicos (Pachta et al. 2021).

Su importancia es multifacética, especialmente en el ámbito de la construcción sostenible y la gestión de residuos. Al reutilizar ladrillos viejos, este material reduce la necesidad de producir nuevos ladrillos, conservando así los recursos naturales finitos y minimizando la huella ambiental asociada con la fabricación de ladrillos. Reciclar ladrillos viejos para convertirlos en polvo también contribuye a la economía circular, desviando los residuos de la construcción de los vertederos y transformándolos en un recurso útil. Además, la incorporación de polvo de ladrillo reciclado en los proyectos de construcción disminuye las emisiones de carbono y el consumo de energía, alineándose con prácticas de construcción ecológicas que priorizan la reducción del impacto ambiental (Mohan et al., 2020).

Además, posee aplicaciones versátiles en los sectores de la construcción y el paisajismo. Una aplicación destacada es la creación de bloques de tierra estabilizada o comprimida. Cuando se combina con agentes aglutinantes como cemento o cal, el polvo de ladrillo reciclado se puede compactar en bloques de construcción duraderos. Estos bloques ofrecen aislamiento natural y una apariencia distintiva que muestra el carácter de los materiales reciclados. Además, el polvo de ladrillo reciclado sirve como un material de relleno ventajoso para aplicaciones de pavimentación y construcción de carreteras. Su naturaleza porosa mejora la capacidad de drenaje y mitiga la escorrentía de aguas superficiales, contribuyendo a una infraestructura urbana sostenible. En el paisajismo, el polvo de ladrillo reciclado se puede utilizar como material base para caminos, entradas de vehículos y áreas al aire libre, combinando la estética con principios de diseño ecológicos (Mohan et al., 2020).

1

II. METODOLOGÍA

2.1. Enfoque y tipo

Según su finalidad, esta investigación fue de tipo aplicada, debido a que tuvo como objetivo resolver problemas del mundo real mediante la generación de conocimientos que se pueden aplicar directamente a situaciones o industrias específicas. En este caso, la investigación se centró en el impacto del uso de silicato de sodio en las propiedades de pastas y morteros derivados de la geopolimerización de polvo de ladrillo. La aplicación práctica aquí radica en la industria de la construcción, donde comprender los efectos del silicato de sodio puede ayudar a mejorar la calidad y el rendimiento de los materiales de construcción. Al investigar cómo la adición de silicato de sodio influye en las propiedades de estos materiales, se contribuyó al desarrollo de mejores prácticas y materiales de construcción, haciendo que la investigación sea aplicada en la naturaleza.

Según su profundidad, fue de tipo explicativa, debido a que se planteó en proporcionar una comprensión más profunda de un fenómeno o una relación entre variables. En esta investigación, se examinaron los efectos del silicato de sodio en las propiedades físico-químicas y mecánicas de pastas y morteros. Al profundizar en las interacciones entre el silicato de sodio y los materiales geopolimerizados, se buscó explicar los mecanismos y las razones detrás de los cambios observados en las propiedades. Este tipo de investigación fue más allá de la simple documentación de los efectos y se sumerge en los aspectos de "por qué" y "cómo", haciendo que la investigación sea de naturaleza explicativa.

Y por su enfoque, fue una investigación cuantitativa, debido a que implicó la recopilación y el análisis de datos numéricos para identificar patrones, tendencias y relaciones. Donde se evaluó el impacto del silicato de sodio en varias propiedades, como las características físico-químicas y mecánicas de pastas y morteros. Esto implicó realizar ensayos experimentales, medir parámetros específicos y cuantificar los cambios observados debido a la presencia de silicato de sodio. Al emplear análisis estadísticos y metodologías basadas en datos, se enfocó en obtener resultados cuantitativos que brinden una comprensión clara y medible de los efectos, lo que clasifica a esta investigación como cuantitativa.

2.2. Diseño de Investigación

El diseño para esta investigación fue de tipo experimental, implicando la planificación y ejecución de un estudio en el que se manipulan deliberadamente una variable independiente bajo condiciones controladas, con el propósito de examinar su efecto sobre más variables dependientes. Donde se asignaron aleatoriamente los elementos de muestra a diferentes grupos experimentales. Este diseño permitió establecer relaciones de causalidad y evaluar de manera rigurosa la influencia de la variable independiente en las dependientes. De esta forma, se sometieron los mismos ensayos experimentales tanto físico-químicos como mecánicos en laboratorio empleando dos grupos. Un grupo control de pastas y morteros obtenidos por geopolimerización de polvo de ladrillo activados con hidróxido de Sodio 8M y un grupo experimental de pastas y morteros obtenidos por geopolimerización de polvo de ladrillo con incorporaciones de 5M, 7.5M, 10.0 M y 12.5M de concentración de silicato de sodio.

2.3. Objeto de Estudio

Universo objetivo: El objeto de estudio de esta investigación estuvo conformado por todas las pastas y morteros obtenidas por geopolimerización de polvo de ladrillo.

Universo Muestral: La población de esta investigación estuvo conformada por todas las pastas y morteros obtenidos por geopolimerización a partir de polvo de ladrillo activado de forma alcalina por NaOH y por Na_2SiO_3 .

Muestra de estudio: La muestra de estudio estuvo conformada por 75 pastas obtenidas por geopolimerización a partir de polvo de ladrillo activado de forma alcalina; siendo 15 pastas de grupo control activadas con NaOH 8M y 60 pastas activadas en distintas concentraciones de Na_2SiO_3 , de dimensiones 25mm de diámetro x 50mm de altura. Como también, 75 morteros obtenidos por geopolimerización a partir de polvo de ladrillo activado de forma alcalina; siendo 15 morteros de grupo control activados con NaOH 8M y 60 morteros activados en distintas concentraciones de Na_2SiO_3 , de dimensiones 50x50x50mm. Calculando 150 muestras en total mediante la siguiente formula:

Nº total de mezclas a desarrollar = (Variables Independientes x Niveles x Réplicas sugeridas por normas ASTM C109) + muestras patrón

$$N^{\circ} \text{ de mezclas a desarrollar} = (1 \times 4 \times 5) + 5 = 25$$

$$N^{\circ} \text{ de mezclas a desarrollar} = 25 \times (\text{Edades de ensayo})$$

$$N^{\circ} \text{ de mezclas a desarrollar} = 25 \times (3) = 75$$

$$N^{\circ} \text{ total de pastas} = 75$$

$$N^{\circ} \text{ total de morteros} = 75$$

$$N^{\circ} \text{ total de mezclas a desarrollar} = 150$$

Niveles de Estudio y Variables

a1: 5M de Silicato de Sodio

a2: 7.5M de Silicato de Sodio

a3: 10.0 M Silicato de Sodio

a4: 12.5M de Silicato de Sodio

Tabla 1

Niveles de estudio y Variables

VARIABLE INDEPENDIENTE	NIVELES DE ESTUDIO
Silicato de Sodio	a1: 5.0M
	a2: 7.5M
	a3: 10.0M
	a4: 12.5M
VARIABLES DEPENDIENTES	
Esfuerzo de compresión (MPa)	
Densidad (g/cm ³)	
Porosidad (%)	
Porcentaje de fases amorfas (%)	
Formación de geles tipo N-A-S-H	

Tabla 2

Operacionalización de variables

Variable	Definición conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores	Items	Instrumentos	Escala de medición
Variable independiente Concentración de silicato de sodio	Es una compuesto ²³ proporciones variables de óxido de sodio (Na2O) ¹⁹ óxido de silicio (SiO2). Es una solución de agua viscosa e incolora que muestra poca pegajosidad ¹⁹ s principales aplicaciones de silicato de sodio son la unión de papel y la fabricación de cartón corrugado, cajas y cartones ¹⁹ nesajidad y Landrock, 2015).	Medida de masa soluto sobre el peso molecular de volumen de solución.	$M = m/(PM*V)$ M: Molaridad (M) m: masa (g) PM: peso molecular (g/mol) V: volumen (L)	Formulario	Nominal	Fichas de observación	M
Variable dependiente Esfuerzo de compresión	Es la capacidad del material o la estructura para soportar las cargas en su superficie ⁴¹ agrietarse ni deformarse. Un material bajo compresión tiende a reducir el tamaño, mientras que, bajo tensión, el tamaño se alarga (Mishra, 2021).	Registro de carga aplicada versus área de muestra en función del tiempo	$\sigma = F/A$ σ : Esfuerzo (MPa) F: Fuerza (N) A: Área (mm ²)	Formulario	Nominal	Fichas de observación	MPa
Variable dependiente Densidad	La densidad de un material indica que tan denso es ese ⁵² erial en un área particular. La densidad de un material se define como su masa por unidad de volumen. Es una medida de la firmeza con que se empaquetan las cosas (Team careers.360, 2022).	Registro de masa sobre unidad de volumen de muestra	²⁷ $\rho = m/v$ ρ : Densidad (g/cm ³) m: Masa (g) v: Volumen (cm ³)	Formulario	Nominal	Fichas de observación	g/cm ³

<p>Variable dependiente Porosidad</p>	<p>Es la proporción de espacios vacíos dentro de un material, ya sea en su superficie o en su estructura interna. Esta característica está relacionada con la densidad del material, su composición y la presencia de vacíos entre sus componentes (Atria, 2021).</p>	<p>Registro del cociente del volumen de vacíos sobre volumen total de muestra (g/cm³) dr: Densidad real (g/cm³)</p>	<p>$P = ((da - dr)/da) * 100$ P: Porosidad (%) da: Densidad aparente sin compactación dr: Densidad real (g/cm³)</p>	<p>Formulario Nominal Fichas de observación %</p>
<p>Variable dependiente Porcentaje de fases amorfas</p>	<p>Son una clase de materiales que carecen de una estructura ordenada de largo alcance. Los sólidos amorfos tienen una disposición desordenada de átomos, moléculas o iones, lo que da como resultado una variedad de propiedades únicas (Sadam, 2023).</p>	<p>Registro de porcentaje de fases de muestra</p>	<p>Registro fotográfico digital de porcentajes</p>	<p>Formulario Nominal Fichas de observación %</p>
<p>Variable dependiente Formación de geles tipo NASH</p>	<p>Son productos de la reacción de activación alcalina en la hidratación del cemento y desempeñan un papel crucial en la formación y el comportamiento del concreto endurecido (Xu et al., 2021).</p>	<p>Registro de transmitancia sobre número de onda de muestra</p>	<p>Registro de diferencia de espectros IR</p>	<p>Formulario Nominal Fichas de observación Espectro FTIR</p>

2.4. Instrumentos, técnicas, equipos de laboratorio de recojo de datos

2.4.1. Instrumentos de recojo de datos

Se emplearon fichas de observación directa como instrumento en esta investigación, estas son herramientas empleadas en la investigación para recopilar datos a través de la observación de situaciones, eventos o comportamientos específicos en un entorno determinado. Las fichas de observación poseen una importancia fundamental al proporcionar una estructura organizativa y sistemática para registrar datos durante la observación de fenómenos, permitiendo la recopilación de información detallada y objetiva en contextos diversos. Estas fichas facilitan la posterior revisión, análisis y comparación de datos, contribuyendo a la rigurosidad metodológica, la identificación de patrones, el respaldo de conclusiones y la generación de conocimiento sólido en investigaciones científicas, estudios sociológicos, análisis de comportamiento humano y otras áreas, mejorando la calidad y validez de los resultados obtenidos (Fernández, 2005).

2.4.2. Técnicas de recojo de datos

Se empleó la técnica de observación directa, la cual es una técnica de investigación en la cual un observador estudia y registra acontecimientos, comportamientos y situaciones en un entorno natural, sin intervenir ni manipular activamente la situación. La observación directa desempeña un papel crucial al proporcionar datos objetivos y contextualizados en entornos naturales, permitiendo identificar patrones, generar hipótesis y validar resultados en diversas disciplinas, desde la investigación científica y el estudio del comportamiento humano hasta el diseño de productos y la educación, enriqueciendo la comprensión, el descubrimiento y la toma de decisiones informadas (Okdiario, 2019).

2.4.3. Equipos de laboratorio de recojo de datos

Equipo universal de ensayos mecánicos: este equipo sirvió para la recolección de datos de propiedades mecánicas de los ensayos de compresión de muestras.

Microscopio electrónico de barrido SEM: este equipo sirvió para la recolección de datos de propiedades físicas y de superficie de las muestras.

Espectrómetro FTIR: este equipo sirvió para la recolección de datos de propiedades químicas de las muestras.

2

2.5. Técnicas de procesamiento y análisis de información

2.5.1. Técnicas de procesamiento

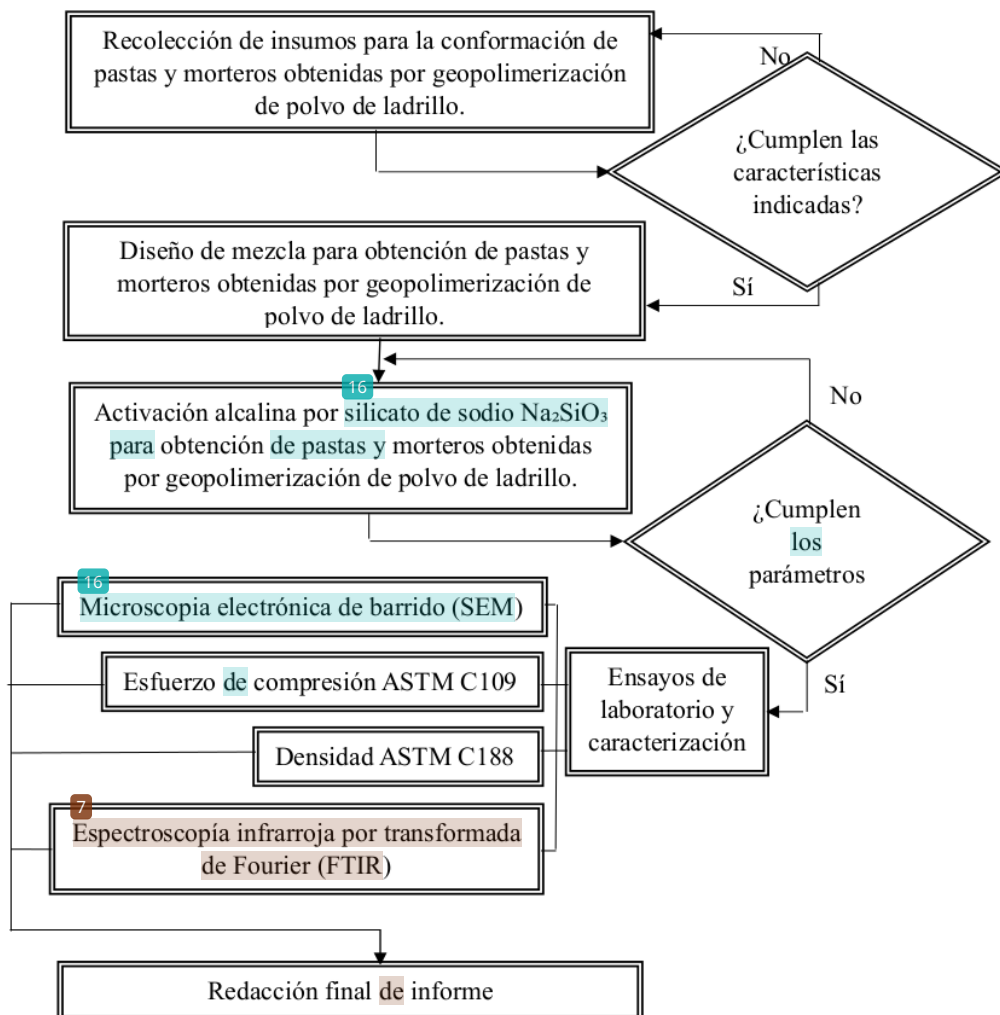
El procedimiento experimental de la investigación se llevó a cabo de acuerdo las siguientes etapas.

- A. Se comenzó con la etapa de recolección las materias primas para la fabricación de pastas y morteros obtenidas por geopolimerización de polvo de ladrillo. Recolectando el polvo de ladrillo reciclado como material conglomerante, el cual debe haber pasado por un proceso previo de pulverizado y tamizado por la malla N° 400, luego recolectando el material de agregado fino la arena gruesa, se preparó la solución de Hidróxido de Sodio 8M y las soluciones de Silicato de Sodio en los diferentes niveles de estudio. En concentraciones de 5M, 7.5M, 10.0 M y 12.5M.
- B. Siguiendo la norma ASTM C109 se pasó a la etapa de conformación de muestras. Estableciendo como parámetros de diseño de mezcla para la conformación de pastas y morteros obtenidas por geopolimerización de polvo de ladrillo de: relación a/c de las pastas y mortero de 0.5; relación conglomerante/agregado de 2:1 volumétricamente. Para luego mezclar los áridos en polvos de ladrillo y la arena gruesa.
- C. La siguiente etapa consistió en la realización de activación alcalina. Primero se realizó la activación alcalina del grupo control, añadiendo el activador alcalino de hidróxido de sodio 8M, y luego se realizó el grupo experimental, añadiendo las soluciones previamente preparadas de silicato de sodio en distintas concentraciones 5M, 7.5M, 10.0 M y 12.5M. Con un amasado de 15 minutos en cada muestra. Después se vertieron dichas muestras en sus respectivos moldes para realizar un curado inicial por el tiempo de 24 horas a temperatura ambiente. Cabe resaltar que las muestras de pastas se sometieron a prensa hidráulica para su conformado bajo presión, mientras que las muestras de mortero no. Luego del tiempo indicado, estas muestras fueron introducidas a una estufa de laboratorio por el tiempo de 72 horas a 60 °C de temperatura. Finalmente se realizó un curado final a temperatura ambiente a 7, 14 y 28 días de ensayo.

- D. En esta etapa, se realizaron los ensayos mecánicos y la caracterización de físico-química de muestras. Donde se realizó el ensayo de porosidad a través de microscopia electrónica de barrido (SEM); las pruebas mecánicas para ensayos de compresión siguiendo la norma ASTM C109, teniendo en cuenta la aleatoriedad y las 5 réplicas sugeridas. Finalmente se realizaron los ensayos de densidad siguiendo la norma ASTM C188. Se caracterizaron las fases amorfas a través de microscopia electrónica de barrido (SEM). Como también se caracterizaron los geles de tipo N-A-S-H mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR).
- E. Finalizando con la última etapa de recopilación de datos. Siendo procesados mediante un análisis estadístico de varianza para poder elaborar el informe detallado del desarrollo de investigación científica, y evaluar la influencia significativa de la variable independiente hacia las variables dependientes.

Figura 5

Diagrama de flujo del procedimiento experimental



2.5.2. ² Análisis de Información

El análisis de la información se realizó mediante la captura y organización de cada dato obtenido en el proceso experimental indicado. Donde se registraron los resultados experimentales iniciales en un cuaderno. Para ser procesados mediante cuadros, graficas e índices en hojas de cálculo mediante el software Excel. Por último, se utilizó el método de ¹ Análisis de Varianza unidireccional ANOVA para realizar el análisis estadístico.

2.6. Aspectos éticos en investigación

2.6.1. Respeto por los Derechos de los Participantes

Los participantes en estudios científicos deben ser tratados con respeto y consideración. Obtener su consentimiento informado significa explicarles claramente los objetivos de la investigación, los procedimientos a los que serán sometidos y cualquier riesgo potencial. También se debe garantizar su privacidad y anonimato, especialmente en investigaciones que involucran temas sensibles (Wagle, 2020).

2.6.2. Equidad y Justicia

La equidad implica que todos los participantes sean tratados de manera justa, sin importar su género, raza, orientación sexual u otros factores. Los investigadores deben evitar influir en los resultados o en la interpretación para favorecer ciertos grupos (Wagle, 2020).

2.6.3. Responsabilidad en la Utilización de Recursos

Utilizar los recursos de manera responsable significa no desperdiciar fondos, materiales o tiempo. Esto se relaciona con la honestidad en la presentación de costos y resultados, evitando el derroche innecesario (Wagle, 2020).

2.6.4. Honestidad y Transparencia

La honestidad implica presentar los resultados de investigación tal como son, sin manipular ni alterar datos para que se ajusten a ciertas expectativas. La transparencia se relaciona con revelar ²⁸ todas las etapas de la investigación, desde el diseño hasta la ejecución y el análisis, de manera que otros investigadores puedan entender y replicar tu trabajo (Wagle, 2020).

2.6.5. Reconocimiento de Fuentes y Colaboraciones

Reconocer adecuadamente las fuentes de información y las contribuciones de otros es fundamental para la integridad académica. Plagiarismo y apropiación indebida de ideas de otros no son éticos. En colaboraciones, cada contribuyente debe recibir el crédito debido (Wagle, 2020).

2.6.6. Uso Responsable de la Tecnología

En el caso de tecnologías emergentes, como la inteligencia artificial o la edición genética, es necesario considerar los impactos éticos y sociales. Asegurarse de que estas

tecnologías se utilicen para el bien común y no para causar daño es una responsabilidad ética (Wagle, 2020).

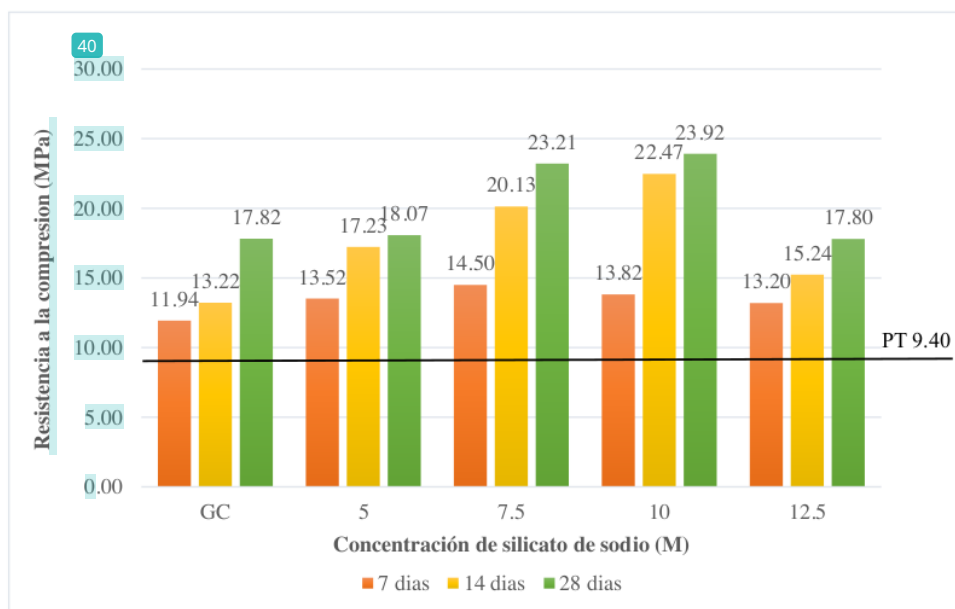
III. RESULTADOS

3.1. Descripción de resultados

3.1.1. Determinación de la influencia de la concentración de Na_2SiO_3 sobre la resistencia a la compresión de morteros y pastas obtenidas por geopolimerización de polvo de ladrillo

Figura 6

Gráfico de concentración de Na_2SiO_3 sobre la resistencia a la compresión de pastas obtenidas por geopolimerización de polvo de ladrillo

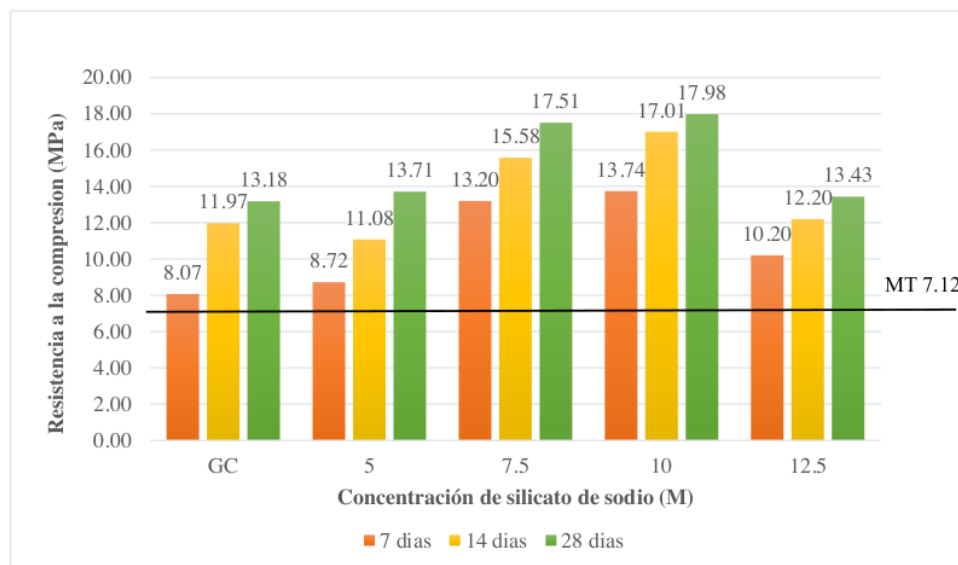


Luego de realizar las respectivas pruebas experimentales, se recopilaron y procesaron los distintos datos como resultados de las propiedades físico-químicas y mecánicas. En la figura 6, podemos apreciar resultados en resistencia a la compresión de pastas en sus respectivas edades de ensayo (7, 14 y 28 días), empezando por el Grupo Control (GC), de activación alcalina con NaOH 8M, seguido del grupo experimental con activación alcalina en distintos niveles de concentración de Na_2SiO_3 (5M, 7.5M, 10.0 M y 12.5M). Como también se presenta la resistencia a la compresión de una pasta convencional de cemento a edad de 28 días, mediante una recta horizontal trazada PT. Se aprecia de forma notoria que la tendencia de resistencia con respecto a las edades de ensayo, es de forma creciente. Obteniendo mayores resistencias en cada nivel de estudio a medida que aumenta el tiempo

de ensayo. También en esta misma tendencia, notamos que la variación de resistencias con respecto al tiempo entre las muestras que poseen contenido de Silicato de sodio, actúa de forma similar. Obteniendo resultados más próximos entre las edades de 14 y 28 días de 3 unidades de diferencia. Mientras que en las muestras patrón GC NaOH 8M, vemos que las resistencias entre 14 y 28 días, son menos próximas de casi 5 unidades. Por otro lado, en términos de la tendencia de resistencia con respecto a los niveles de estudio, vemos que un comportamiento de forma creciente solo desde los niveles 5M hasta 10.0 M. Obteniendo así, 17.82 MPa y 23.92 MPa como la resistencia menor y mayor respectivamente obtenidas a la máxima edad de 28 días. De forma contraria, notamos que a partir del nivel 10 hasta 12.5M ocurre una caída de la tendencia de resistencia mecánica en las pastas. Decreciendo el máximo valor de resistencia mencionado 23.92 MPa a 17.80 MPa para el último nivel 12.5M. Por último, con respecto a la resistencia a la compresión de una pasta convencional de cemento a edad de 28 días, se resultó obtener 9.40 MPa. Esto demuestra que el grado de resistencia a la compresión alcanzada entre una pasta de cemento convencional y una pasta geopolimérica, es muy elevado.

Figura 7

Gráfico de concentración de Na_2SiO_3 sobre la resistencia a la compresión de morteros obtenidos por geopolimerización de polvo de ladrillo



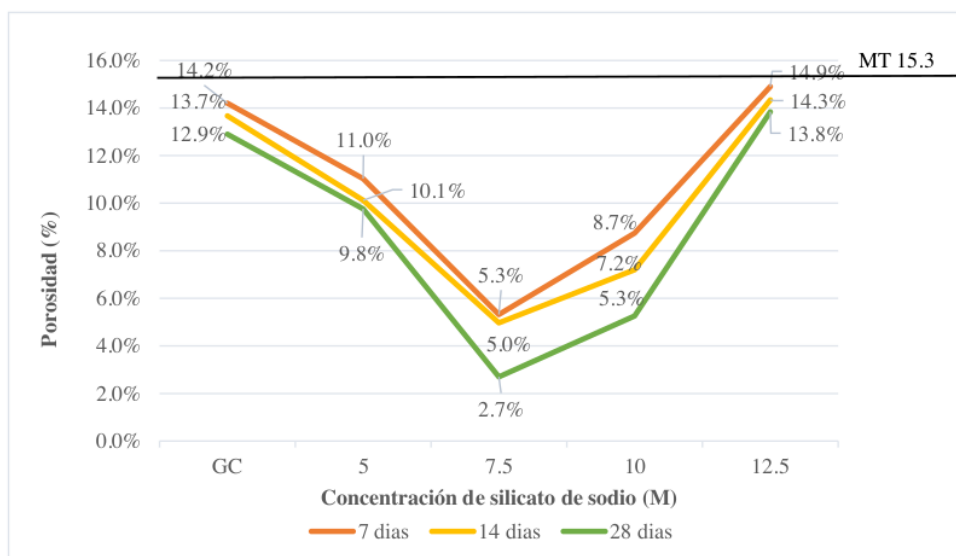
17 Con respecto a las muestras de morteros, en la figura 7 podemos apreciar resultados de resistencia a la compresión de morteros en sus respectivas edades de ensayo (7, 14 y 28 días), empezando por el Grupo Control (GC), de activación alcalina con NaOH 8M, seguido del grupo experimental con activación alcalina en distintos niveles de concentración de Na₂SiO₃ (5M, 7.5M, 10.0 M y 12.5M). Como también se presenta la resistencia a la compresión de un mortero convencional de cemento a edad de 28 días, mediante una recta horizontal trazada MT. Estos resultados son similares a las muestras de pastas de la figura anterior. Contando con una tendencia de resistencia con respecto a edad de ensayo de forma creciente. Obteniendo mayores resistencias en cada nivel de estudio a medida que aumenta el tiempo de ensayo. En este caso la proximidad de resistencias entre las edades de 14 y 28 días es la misma para todos los casos, contando con un máximo de 3 unidades entre ellas. Por otro lado, en términos de la tendencia de resistencia con respecto a los niveles de estudio, apreciamos el comportamiento creciente desde los niveles 5M hasta 10.0 M. Obteniendo así, 13.18 MPa y 17.98 MPa como la resistencia menor y mayor respectivamente obtenidas a la máxima edad de 28 días. Por el contrario, a partir del nivel de 10.0 M y 12.5M ocurre la misma caída de la tendencia de resistencia mecánica de las pastas en los morteros. Decreciendo el máximo valor de resistencia mencionado 17.98 MPa a 13.43 MPa para el último nivel 12.5M. Por último, con respecto a la resistencia a la compresión de un mortero convencional de cemento a edad de 28 días, se resultó obtener 7.12 MPa. Esto demuestra que el grado de resistencia a la compresión alcanzada entre un mortero de cemento convencional y un mortero geopolimérico, es muy elevado.

3.1.2. Determinación de la influencia de la concentración de Na_2SiO_3 sobre la porosidad de morteros y pastas obtenidas por geopolimerización de polvo de ladrillo

Con respecto a los resultados de la propiedad física de porosidad de pastas geopoliméricas, estas al ser sometidas a una compactación a presión hidráulica, ya que es necesario para su conformación, la presencia de poros es muy pequeña. Por lo que los resultados cuantitativos son despreciables. Esto se puede corroborar en el anexo 5, donde se muestran las imágenes de las pastas geopoliméricas con porosidades imperceptibles.

Figura 8

Gráfico de concentración de Na_2SiO_3 sobre la porosidad de morteros obtenidos por geopolimerización de polvo de ladrillo



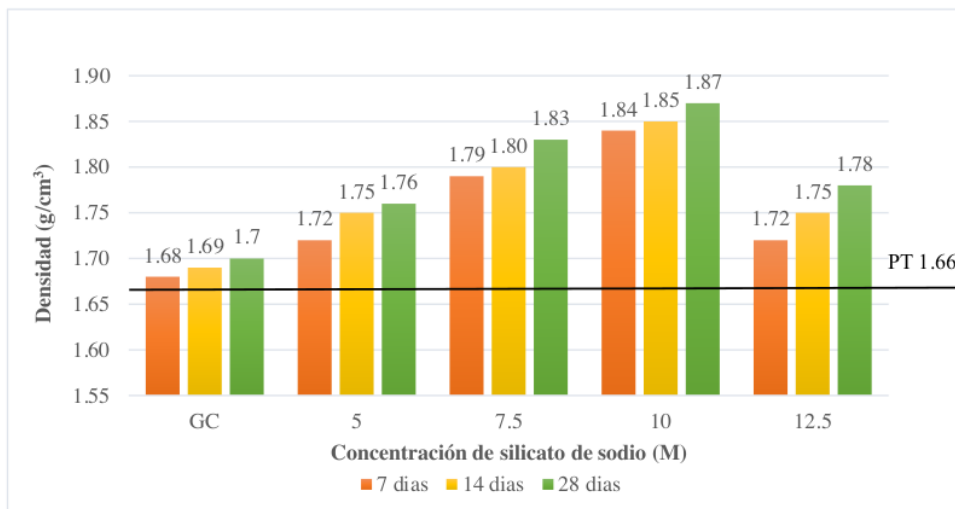
Ahora, con respecto a la propiedad de porosidad, se pudieron solo analizar a las muestras de morteros, ya que las pastas al ser conformadas mediante presión no presentaron porosidades superficiales. En la figura 8 podemos apreciar resultados de porosidad de morteros en sus respectivas edades de ensayo (7, 14 y 28 días), empezando por el Grupo Control (GC), de activación alcalina con NaOH 8M, seguido del grupo experimental con activación alcalina en distintos niveles de concentración de Na_2SiO_3 (5M, 7.5M, 10.0 M y 12.5M). Como también se presenta la porosidad de un mortero convencional de cemento a edad de 28 días, mediante una recta horizontal trazada MT. Se aprecia de forma notoria que

la tendencia de porosidad con respecto a las edades de ensayo, es de forma decreciente. Obteniendo menores porosidades en cada nivel de estudio a medida que aumenta el tiempo de ensayo. También en esta misma tendencia, notamos que la variación de porosidades con respecto al tiempo entre las muestras que poseen contenido de Silicato de sodio 7.5M y 10.0 M se encuentran más dispersas. Obteniendo resultados menos próximos entre las edades de 14 y 28 días en 2 unidades de diferencia. Mientras que en las muestras de los extremos como GC, 5M y 12.5M vemos que las porosidades entre 14 y 28 días, son más próximas de casi 1 unidad. Por otro lado, en términos de la tendencia de porosidad con respecto a los niveles de estudio, vemos un comportamiento de forma decreciente desde los niveles 5M hasta 7.5M. Obteniendo así, 12.9 % y 2.7% como la porosidad máxima y mínima respectivamente obtenidas a la máxima edad de 28 días. De forma contraria, notamos que a partir del nivel 7.5M hasta 12.5M ocurre una caída de la tendencia de porosidad en los morteros. Aumentando el mínimo valor de porosidad alcanzado de 2.7% hasta 13.8% para el ultimo nivel 12.5M. Por último, con respecto a la porosidad de un mortero convencional de cemento a edad de 28 días, se resultó obtener 15.3%. Esto demuestra que el grado de porosidad alcanzada entre un mortero de cemento convencional y un mortero geopolimérico, es muy elevado.

3.1.3. Determinación de la influencia de la concentración de Na_2SiO_3 sobre la densidad de morteros y pastas obtenidas por geopolimerización de polvo de ladrillo

Figura 9

Gráfico de concentración de Na_2SiO_3 sobre la densidad de pastas obtenidas por geopolimerización de polvo de ladrillo

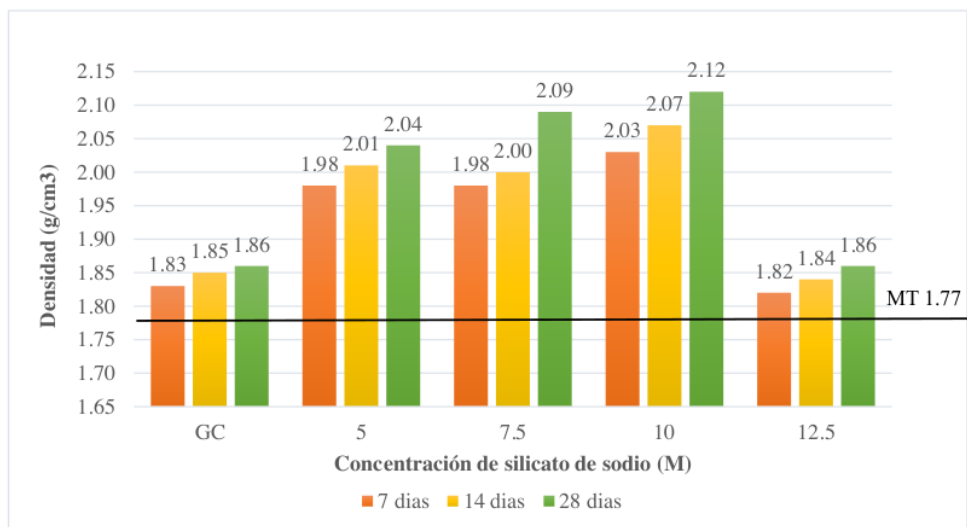


Ahora, con respecto a la propiedad física de densidad de las pastas en la figura 9, podemos evaluar resultados en densidad de pastas en sus respectivas edades de ensayo (7, 14 y 28 días), empezando por el Grupo Control (GC), de activación alcalina con NaOH 8M, seguido del grupo experimental con activación alcalina en distintos niveles de concentración de Na_2SiO_3 (5M, 7.5M, 10.0 M y 12.5M). Como también se presenta la densidad de una pasta convencional de cemento a edad de 28 días, mediante una recta horizontal trazada PT. Primero distinguimos que la tendencia de densidad con respecto a las edades de ensayo, es de forma creciente. Obteniendo mayores densidades en cada nivel de estudio a medida que aumenta el tiempo de ensayo. Aunque notamos que estos valores no varían en gran medida con el paso del tiempo, contando un máximo de 0.04 unidades entre dichas edades de ensayo. Por otro lado, en términos de la tendencia de densidad con respecto a los niveles de estudio, vemos la presencia de un comportamiento de forma creciente solo desde los niveles 5M hasta 10.0 M. Obteniendo así, 1.7 g/cm^3 y 1.87 g/cm^3 como la densidad mínima y máxima respectivamente obtenidas a la edad de 28 días. Por el contrario, se evidencia que a partir del

nivel 10.0 M hasta 12.5M ocurre una caída de la tendencia de densidad en las pastas. Decreciendo el máximo valor de densidad ya mencionada 1.87 g/cm^3 a 1.78 g/cm^3 para el último nivel 12.5M a 28 días. Por último, con respecto a la densidad de una pasta convencional de cemento a edad de 28 días, se resultó obtener 1.66 g/cm^3 . Esto demuestra que el grado de densidad alcanzada entre una pasta de cemento convencional y una pasta geopolimérica, es algo apartado.

Figura 10

Gráfico de concentración de Na_2SiO_3 sobre la densidad de morteros obtenidos por geopolimerización de polvo de ladrillo



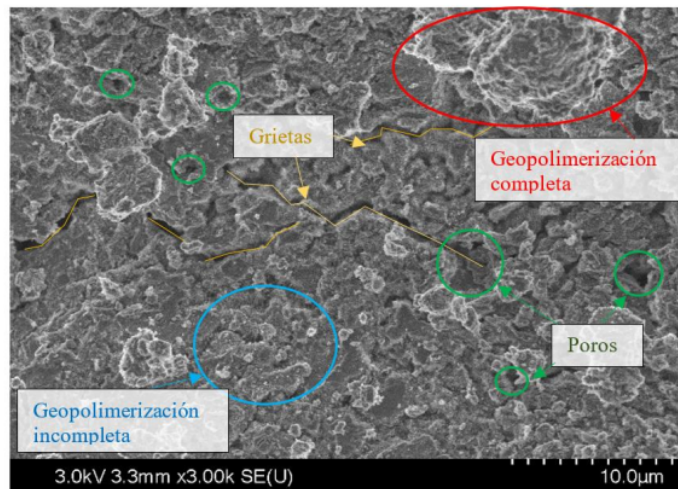
Posteriormente con las muestras de morteros, en la figura 10 podemos apreciar resultados de densidad de morteros en sus respectivas edades de ensayo (7, 14 y 28 días), empezando por el Grupo Control (GC), de activación alcalina con NaOH 8M, seguido del grupo experimental con activación alcalina en distintos niveles de concentración de Na_2SiO_3 (5M, 7.5M, 10.0 M y 12.5M). Como también se presenta la densidad de un mortero convencional de cemento a edad de 28 días, mediante una recta horizontal trazada MT. Estos resultados de igual forma son equivalentes a las muestras de pastas de la figura anterior. Contando con una tendencia de densidad con respecto a edad de ensayo de forma creciente. Obteniendo de esta forma, mayores densidades en cada nivel de estudio a medida que aumenta el tiempo de ensayo. En este caso la proximidad de densidad entre las edades de 14 y 28 días se encuentra un poco más dispersas, contando con un máximo de 0.09 unidades

entre ellas en las muestras más centrales como 7.5M y 10.0 M. Por otro lado, en términos de la tendencia de densidad con respecto a los niveles de estudio, apreciamos el comportamiento creciente desde los niveles GC hasta 10.0 M. Obteniendo así, 1.86 g/cm³ a y 2.12 g/cm³ como la densidad mínima y máxima respectivamente obtenidas a la máxima edad de 28 días. Por el contrario, a partir del nivel 10.0 M hasta 12.5M ocurre la misma caída de la tendencia de resistencia mecánica de las pastas anteriores. Decreciendo el máximo valor de densidad mencionado 2.12 g/cm³ a 1.86 g/cm³ para el ultimo nivel 12.5M a 28 días. Por último, con respecto a la densidad de un mortero convencional de cemento a edad de 28 días, se resultó obtener 1.77 g/cm³. Esto demuestra que el grado de densidad alcanzada entre un mortero de cemento convencional y un mortero geopolimérico, es distante.

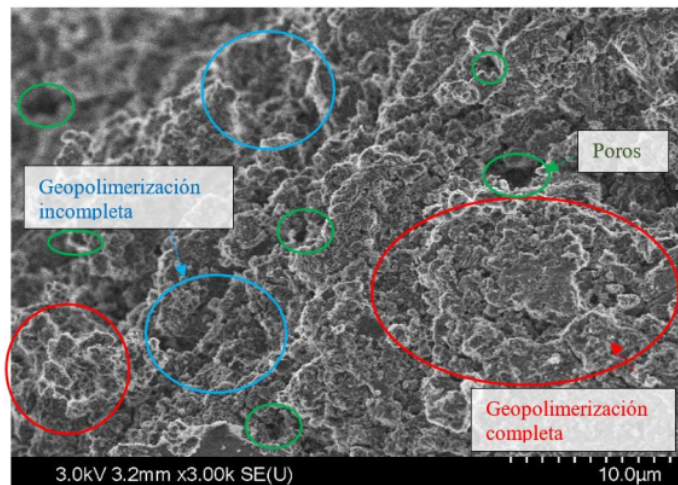
3.1.4. Determinación de la influencia de la concentración de Na_2SiO_3 sobre el porcentaje de fases amorfas de morteros y pastas obtenidas por geopolimerización de polvo de ladrillo

Figura 11

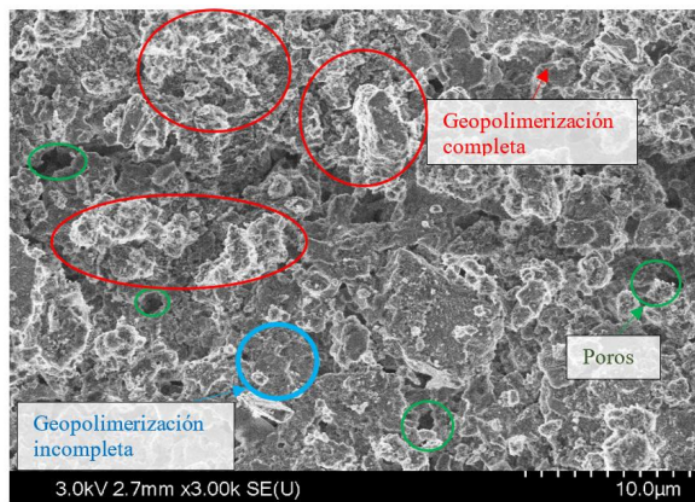
Micrografías SEM de morteros obtenidos por geopolimerización de polvo de ladrillo en diferentes niveles de Na_2SiO_3 : (a) ME1-5M; (b) ME2-7.5M; (c) ME3-10.0 M y (d) ME4-12.5M



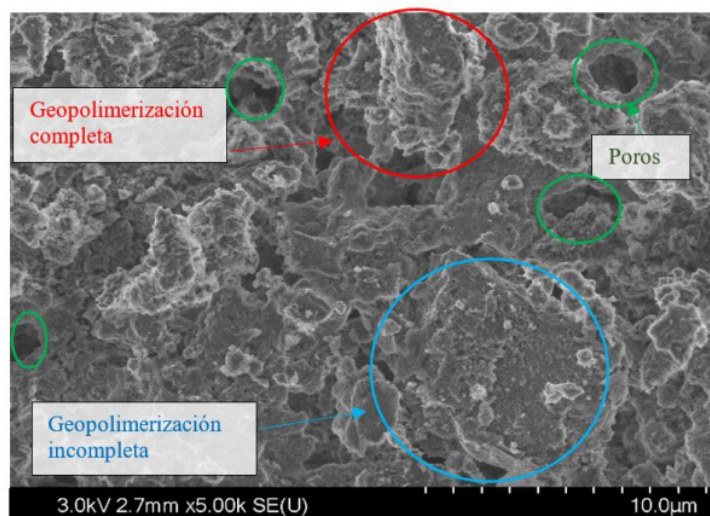
(a)



(b)



(c)



(d)

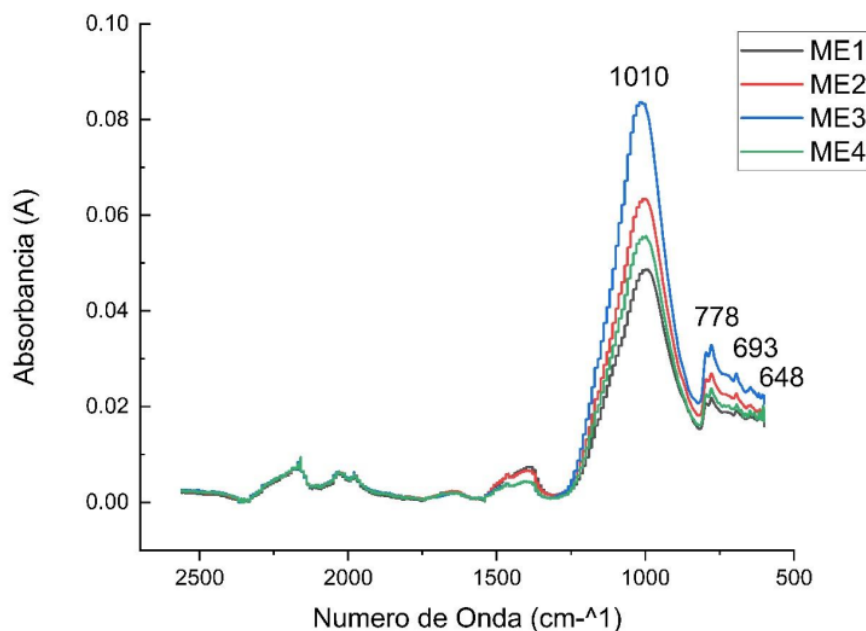
En la imagen 11, se presentan una serie ⁷ de micrografías obtenidas mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) a 10 μm de tamaño, que representan los resultados de nuestra investigación en la geopolimerización de morteros a partir de polvo de ladrillo a diferentes concentraciones de Na₂SiO₃: (a) ME1-5M: En la primera micrografía, se puede observar la estructura microscópica de un mortero geopolimérico obtenido con una concentración de 5M de Na₂SiO₃. Esta imagen proporciona información sobre la morfología y la interacción entre los componentes a esta concentración específica. A simple vista, se

aprecian regiones que presentan grietas y poros. Asimismo, se aprecian una gran presencia de fases amorfas identificadas por las regiones desordenadas de percepción oscura, las cuales conforman en un 71% según los datos arrojados por el ensayo SEM. Como también pequeñas regiones consolidadas de color claro y por el contrario una cantidad de grandes regiones de estructura menos consolidada. (b) ME2-7.5M: en la segunda micrografía, se puede observar la estructura microscópica del mortero geopolimérico obtenido con una concentración de 7.5M de Na_2SiO_3 . Aquí, se observa una mayor variabilidad en la microestructura en comparación con la muestra anterior. En este caso ya no se presentan regiones con fisuras, aunque estas siguen presentando regiones con poros. Asimismo, la presencia de fases amorfas identificadas por las regiones desordenadas de percepción oscura es menor, estas conforman un 44% según los datos arrojados por el ensayo SEM. Por lo que se evidencia una mayor presencia de regiones más iluminadas cristalinas. (c) ME3-10.0 M: en la tercera micrografía, se puede observar la estructura microscópica del mortero geopolimérico obtenido con una concentración de 10.0 M de Na_2SiO_3 . En esta se observa una ⁴⁷disminución en el tamaño y la cantidad de poros y una reducción en la cantidad de fases amorfas oscuras. Conformadas en un 15% según los datos arrojados por el ensayo SEM. Evidenciando una gran presencia de regiones cristalinas y compactas. (d) ME4-12.5M: en la cuarta micrografía, se puede observar la estructura microscópica del mortero geopolimérico obtenido con una concentración de 12.5M de Na_2SiO_3 . En esta muestra se observa un mayor tamaño de poros y una combinación de fases cristalinas más iluminadas y fases amorfas oscuras de gran tamaño. Las cuales están conformadas en un 25% según los datos arrojados por el ensayo SEM.

3.1.5. Determinación de la influencia de la concentración de Na_2SiO_3 sobre la formación de geles N-A-S-H de morteros y pastas obtenidas por geopolimerización de polvo de ladrillo

Figura 12

Espectro FTIR de morteros obtenidos por geopolimerización de polvo de ladrillo a distintas concentraciones de Na_2SiO_3



En la figura 12 observamos un espectro FTIR, el eje horizontal, que corresponde al número de onda en unidades de centímetros (cm^{-1}), abarca aproximadamente de 500 cm^{-1} hasta 2500 cm^{-1} . En el eje vertical, se muestra la absorbancia, que se expresa en unidades de absorbancia (A). En el que se tomaron en cuenta los 4 espectros de muestra de morteros con cada nivel de estudio a la edad de 28 días de ensayo. Teniendo así a ME1, ME2, ME3 y ME4 de concentraciones de Silicato de Sodio de 5M, 7.5M, 10.0 M y 12.5M respectivamente. En una primera vista al espectro, podemos notar la presencia de variaciones de absorbancia y número de onda principalmente. En el rango de número de onda de 750 cm^{-1} a 1250 cm^{-1} , vemos un aumento gradual de la absorbancia en los 4 espectros, teniendo el pico más

pronunciado alrededor de 1010 cm^{-1} . Este pico es bastante prominente y sugiere la presencia de un grupo funcional particular en las 4 muestras que absorben en esta región. Empezando por ME1(5M) con la absorbancia mínima de 0.0486 A y 995 cm^{-1} de número de onda, luego ME4(12.5M) con la absorbancia de 0.0555 A y 998 cm^{-1} de número de onda, ME2(7.5M) con la absorbancia de 0.0634 A y 1010 cm^{-1} de número de onda, y por último ME3(10.0 M) con la absorbancia y número de onda máxima de 0.835 A y 1020 cm^{-1} respectivamente. Otra protuberancia de picos tenemos entre la región 500 cm^{-1} y 1000 cm^{-1} , alrededor de 778 cm^{-1} . Empezando por ME1(5M) con la absorbancia mínima de 0.0218 A, luego ME4(12.5M) con la absorbancia de 0.0238 A, ME2(7.5M) con la absorbancia de 0.0269 A, y por último ME3 (10.0 M) la absorbancia máxima de 0.0329 A. De igual forma aparecen picos de menor tamaño y con la misma tendencia de muestras al número de 693 cm^{-1} y 648 cm^{-1} .

3.2. Prueba de hipótesis

3.2.1. Determinación de la influencia de la concentración de Na_2SiO_3 sobre la resistencia a la compresión de morteros y pastas obtenidas por geopolimerización de polvo de ladrillo

Figura 13

Análisis de Varianza de la influencia de la concentración de Na_2SiO_3 sobre la resistencia a la compresión de pastas obtenidas por geopolimerización de polvo de ladrillo a 7 días

RESUMEN				
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
0M	5	59.7	11.94	0.4126
5M	5	67.62	13.524	0.67173
7.5M	5	72.5	14.5	0.56115
10M	5	69.1	13.82	0.91655
12.5M	5	66.01	13.202	1.03077

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	17.862704	4	4.465676	6.214757292	0.002029946	2.866081402
Dentro de los grupos	14.3712	20	0.71856			
Total	32.233904	24				

Para las pruebas de hipótesis se realizaron análisis de varianza ANOVA unidireccional mediante el software Excel a cada variable dependiente por edad de ensayo. En la figura 13 se puede apreciar en resumen la variación de resistencia a la compresión que presentaron las pastas obtenidas por geopolimerización de polvo de ladrillo a 7 días con respecto a la concentración de Silicato de sodio. En esta figura encontramos el valor F, el cual nos ayuda a poder determinar si existen diferencias significativas entre las medias de los grupos. Un valor de probabilidad que nos ayuda a determinar si los resultados observados en el estudio son estadísticamente significativos o si podrían haber ocurrido por casualidad. Como también un valor crítico para F, o F teórico, el cual se emplea para determinar si estas diferencias son estadísticamente significativas en función de un nivel de significancia específico y el diseño del estudio. Por lo cual comparamos los valores F y el valor de probabilidad para decidir si rechazar o aceptar la hipótesis planteada. En este caso tenemos un valor F de 6.21, siendo mayor que el valor crítico para F de 2.87, y una probabilidad de

0.002 que es menor a 0.05. Por lo que existe evidencia estadísticamente significativa para aceptar la hipótesis planteada. Los resultados indican que al menos un grupo es significativamente diferente de los demás en relación con la variable que estamos estudiando. Por lo tanto, se respalda la hipótesis alterna y se concluye que hay efectos reales en la resistencia a la compresión de pastas obtenidas por geopolimerización de polvo de ladrillo por parte de la concentración de silicato de sodio a 7 días.

Figura 14

Análisis de Varianza de la influencia de la concentración de Na_2SiO_3 sobre la resistencia a la compresión de pastas obtenidas por geopolimerización de polvo de ladrillo a 14 días

RESUMEN						
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza		
0M	5	66.14	13.228	0.28357		
5M	5	86.08	17.216	1.68173		
7.5M	5	100.67	20.134	0.76298		
10M	5	112.35	22.47	1.03185		
12.5M	5	76.18	15.236	0.71763		

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	274.861304	4	68.715326	76.72957684	7.62867E-12	2.866081402
Dentro de los grupos	17.91104	20	0.895552			
Total	292.772344	24				

En la figura 14 se puede apreciar la variación de resistencia a la compresión que presentaron las pastas obtenidas por geopolimerización de polvo de ladrillo a 14 días con respecto a la concentración de Silicato de sodio. En esta figura encontramos un valor F de 76.73, siendo mayor que el valor crítico para F de 2.87, y una probabilidad de 7.63E^{-12} que es menor a 0.05. Por lo que existe evidencia estadísticamente significativa para aceptar la hipótesis planteada. Los resultados indican que al menos un grupo es significativamente diferente de los demás en relación con la variable que estamos estudiando. Por lo tanto, se respalda la hipótesis alterna y se concluye que hay efectos reales en la resistencia a la compresión de pastas obtenidas por geopolimerización de polvo de ladrillo por parte de la concentración de silicato de sodio a 14 días.

41

Figura 15

Análisis de Varianza de la influencia de la concentración de Na_2SiO_3 sobre la resistencia a la compresión de pastas obtenidas por geopolimerización de polvo de ladrillo a 28 días

RESUMEN				
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
0M	5	89.1	17.82	1.317
5M	5	90.36	18.072	1.19917
7.5M	5	116.03	23.206	1.83018
10M	5	119.6	23.92	1.477
12.5M	5	89.02	17.804	1.76773

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	194.008496	4	48.502124	31.94678755	1.98752E-08	2.866081402
Dentro de los grupos	30.36432	20	1.518216			
Total	224.372816	24				

En la figura 15 se puede apreciar la variación de resistencia a la compresión que presentaron las pastas obtenidas por geopolimerización de polvo de ladrillo a 28 días con respecto a la concentración de Silicato de sodio. En esta figura encontramos un valor F de 31.95, siendo mayor que el valor crítico para F de 2.87, y una probabilidad de 1.99E^{-08} que es menor a 0.05. Por lo que existe evidencia estadísticamente significativa para aceptar la hipótesis planteada. Los resultados indican que al menos un grupo es significativamente diferente de los demás en relación con la variable que estamos estudiando. Por lo tanto, se respalda la hipótesis alterna y se concluye que hay efectos reales en la resistencia a la compresión de pastas obtenidas por geopolimerización de polvo de ladrillo por parte de la concentración de silicato de sodio a 28 días.

Figura 16

Análisis de Varianza de la influencia de la concentración de Na_2SiO_3 sobre la resistencia a la compresión de morteros obtenidos por geopolimerización de polvo de ladrillo a 7 días

RESUMEN				
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
0M	5	40.33	8.066	0.34328
5M	5	43.59	8.718	0.58367
7.5M	5	66.01	13.202	0.74587
10M	5	68.69	13.738	0.63882
12.5M	5	50.98	10.196	0.17923

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	132.87232	4	33.21808	66.67967417	2.80983E-11	2.866081402
Dentro de los grupos	9.96348	20	0.498174			
Total	142.8358	24				

En la figura 16 se puede apreciar la variación de resistencia a la compresión que presentaron los morteros obtenidos por geopolimerización de polvo de ladrillo a 7 días con respecto a la concentración de Silicato de sodio. En esta figura encontramos un valor F de 66.68, siendo mayor que el valor crítico para F de 2.87, y una probabilidad de 2.81×10^{-11} que es menor a 0.05. Por lo que existe evidencia estadísticamente significativa para aceptar la hipótesis planteada. Los resultados indican que al menos un grupo es significativamente diferente de los demás en relación con la variable que estamos estudiando. Por lo tanto, se respalda la hipótesis alterna y se concluye que hay efectos reales en la resistencia a la compresión de morteros obtenidos por geopolimerización de polvo de ladrillo por parte de la concentración de silicato de sodio a 7 días.

Figura 17

Análisis de Varianza de la influencia de la concentración de Na_2SiO_3 sobre la resistencia a la compresión de morteros obtenidos por geopolimerización de polvo de ladrillo a 14 días

RESUMEN				
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
0M	5	59.83	11.966	0.64793
5M	5	55.41	11.082	0.44737
7.5M	5	77.91	15.582	0.30402
10M	5	85.07	17.014	0.61903
12.5M	5	60.98	12.196	0.28883

ANÁLISIS DE
VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	132.80048	4	33.20012	71.94956614	1.38863E-11	2.866081402
Dentro de los grupos	9.22872	20	0.461436			
Total	142.0292	24				

En la figura 17 se puede apreciar la variación de resistencia a la compresión que presentaron los morteros obtenidos por geopolimerización de polvo de ladrillo a 14 días con respecto a la concentración de Silicato de sodio. En esta figura encontramos un valor F de 71.95, siendo mayor que el valor crítico para F de 2.87, y una probabilidad de 1.39E^{-11} que es menor a 0.05. Por lo que existe evidencia estadísticamente significativa para aceptar la hipótesis planteada. Los resultados indican que al menos un grupo es significativamente diferente de los demás en relación con la variable que estamos estudiando. Por lo tanto, se respalda la hipótesis alterna y se concluye que hay efectos reales en la resistencia a la compresión de morteros obtenidos por geopolimerización de polvo de ladrillo por parte de la concentración de silicato de sodio a 14 días.

Figura 18

Análisis de Varianza de la influencia de la concentración de Na_2SiO_3 sobre la resistencia a la compresión de morteros obtenidos por geopolimerización de polvo de ladrillo a 28 días

RESUMEN				
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
0M	5	65.89	13.178	1.03997
5M	5	68.57	13.714	1.37723
7.5M	5	87.54	17.508	2.37437
10M	5	89.9	17.98	1.11575
12.5M	5	67.15	13.43	1.482

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	112.38812	4	28.09703	19.01191855	1.36674E-06	2.866081402
Dentro de los grupos	29.55728	20	1.477864			
Total	141.9454	24				

En la figura 18 se puede apreciar la variación de resistencia a la compresión que presentaron los morteros obtenidos por geopolimerización de polvo de ladrillo a 28 días con respecto a la concentración de Silicato de sodio. En esta figura encontramos un valor F de 19.01, siendo mayor que el valor crítico para F de 2.87, y una probabilidad de 1.37E^{-06} que es menor a 0.05. Por lo que existe evidencia estadísticamente significativa para aceptar la hipótesis planteada. Los resultados indican que al menos un grupo es significativamente diferente de los demás en relación con la variable que estamos estudiando. Por lo tanto, se respalda la hipótesis alterna y se concluye que hay efectos reales en la resistencia a la compresión de morteros obtenidos por geopolimerización de polvo de ladrillo por parte de la concentración de silicato de sodio a 28 días.

3.2.2. Determinación de la influencia de la concentración de Na_2SiO_3 sobre la porosidad de morteros obtenidos por geopolimerización de polvo de ladrillo

Figura 19

Análisis de Varianza de la influencia de la concentración de Na_2SiO_3 sobre la porosidad de morteros obtenidos por geopolimerización de polvo de ladrillo a 7 días

RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
0M	5	71.02	14.204	0.88708
5M	5	54.98	10.996	0.88033
7.5M	5	26.52	5.304	1.06228
10M	5	43.67	8.734	1.22428
12.5M	5	74.68	14.936	0.75993

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	316.002224	4	79.000556	82.0546293	4.07272E-12	2.866081402
Dentro de los grupos	19.2556	20	0.96278			
Total	335.257824	24				

1 En la figura 19 se puede visualizar la variación de la porosidad que presentaron los morteros obtenidos por geopolimerización de polvo de ladrillo a 7 días con respecto a la concentración de Silicato de sodio. En esta figura encontramos un valor F de 82.05, siendo mayor que el valor crítico para F de 2.87, y una probabilidad de 4.07E^{-12} , la cual es menor a 0.05. Por lo que existe evidencia estadísticamente significativa para aceptar la hipótesis planteada. Los resultados indican que al menos un grupo es significativamente diferente de los demás en relación con la variable que estamos estudiando. Por lo tanto, se respalda la hipótesis alterna y se concluye que hay efectos reales en la porosidad de morteros obtenidos por geopolimerización de polvo de ladrillo por parte de la concentración de silicato de sodio a 7 días.

Figura 20

Análisis de Varianza de la influencia de la concentración de Na_2SiO_3 sobre la porosidad de morteros obtenidos por geopolimerización de polvo de ladrillo a 14 días

RESUMEN				
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
0M	5	68.7	13.74	0.85765
5M	5	50.51	10.102	0.89442
7.5M	5	25	5	0.865
10M	5	36.1	7.22	0.927
12.5M	5	71.6	14.32	1.097

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	326.798096	4	81.699524	88.01798292	2.107E-12	2.866081402
Dentro de los grupos	18.56428	20	0.928214			
Total	345.362376	24				

¹ En la figura 20 se puede visualizar la variación de la porosidad que presentaron los morteros obtenidos por geopolimerización de polvo de ladrillo a 14 días con respecto a la concentración de Silicato de sodio. En esta figura encontramos un valor F de 88.02, siendo mayor que el valor crítico para F de 2.87, y una probabilidad de 2.11E^{-12} , la cual es menor a 0.05. Por lo que existe evidencia estadísticamente significativa para aceptar la hipótesis planteada. Los resultados indican que al menos un grupo es significativamente diferente de los demás en relación con la variable que estamos estudiando. Por lo tanto, se respalda la hipótesis alterna y se concluye que hay efectos reales en la porosidad de morteros obtenidos por geopolimerización de polvo de ladrillo por parte de la concentración de silicato de sodio a 14 días.

Figura 21

Análisis de Varianza de la influencia de la concentración de Na_2SiO_3 sobre la porosidad de morteros obtenidos por geopolimerización de polvo de ladrillo a 28 días

RESUMEN				
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
0M	5	64.5	12.9	0.315
5M	5	48.8	9.76	0.723
7.5M	5	13.5	2.7	0.315
10M	5	26.3	5.26	1.063
12.5M	5	69.2	13.84	0.623

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	464.1624	4	116.0406	190.9190523	1.25931E-15	2.866081402
Dentro de los grupos	12.156	20	0.6078			
Total	476.3184	24				

En la figura 21 se puede visualizar la variación de la porosidad que presentaron los morteros obtenidos por geopolimerización de polvo de ladrillo a 28 días con respecto a la concentración de Silicato de sodio. En esta figura encontramos un valor F de 190.92, siendo mayor que el valor crítico para F de 2.87, y una probabilidad de 1.26E^{-15} , la cual es menor a 0.05. Por lo que existe evidencia estadísticamente significativa para aceptar la hipótesis planteada. Los resultados indican que al menos un grupo es significativamente diferente de los demás en relación con la variable que estamos estudiando. Por lo tanto, se respalda la hipótesis alterna y se concluye que hay efectos reales en la porosidad de morteros obtenidos por geopolimerización de polvo de ladrillo por parte de la concentración de silicato de sodio a 28 días.

3.2.3. Determinación de la influencia de la concentración de Na_2SiO_3 sobre la densidad de morteros y pastas obtenidas por geopolimerización de polvo de ladrillo

Figura 22

Análisis de Varianza de la influencia de la concentración de Na_2SiO_3 sobre la densidad de pastas obtenidas por geopolimerización de polvo de ladrillo a 7 días

RESUMEN				
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
0M	5	8.41	1.682	0.00037
5M	5	8.59	1.718	0.00077
7.5M	5	8.97	1.794	0.00058
10M	5	9.21	1.842	0.00067
12.5M	5	8.61	1.722	0.00027

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0.084096	4	0.021024	39.51879699	3.15417E-09	2.866081402
Dentro de los grupos	0.01064	20	0.000532			
Total	0.094736	24				

1 En la figura 22 se puede visualizar la variación de la densidad que presentaron las pastas obtenidas por geopolimerización de polvo de ladrillo a 7 días con respecto a la concentración de Silicato de sodio. En esta figura encontramos un valor F de 39.52, siendo mayor que el valor crítico para F de 2.87, y una probabilidad de 3.15E^{-09} , la cual es menor a 0.05. Por lo que existe evidencia estadísticamente significativa para aceptar la hipótesis planteada. Los resultados indican que al menos un grupo es significativamente diferente de los demás en relación con la variable que estamos estudiando. Por lo tanto, se respalda la hipótesis alterna y se concluye que hay efectos reales en la densidad de pastas obtenidas por geopolimerización de polvo de ladrillo por parte de la concentración de silicato de sodio a 7 días.

Figura 23

Análisis de Varianza de la influencia de la concentración de Na_2SiO_3 sobre la densidad de pastas obtenidas por geopolimerización de polvo de ladrillo a 14 días

RESUMEN				
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
0M	5	8.47	1.694	0.00053
5M	5	8.77	1.754	0.00033
7.5M	5	8.99	1.798	0.00067
10M	5	9.26	1.852	0.00062
12.5M	5	8.75	1.75	0.00025

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0.069696	4	0.017424	36.3	6.62145E-09	2.866081402
Dentro de los grupos	0.0096	20	0.00048			
Total	0.079296	24				

En la figura 23 se puede visualizar la variación de la densidad que presentaron las pastas obtenidas por geopolimerización de polvo de ladrillo a 14 días con respecto a la concentración de Silicato de sodio. En esta figura encontramos un valor F de 36.30, siendo mayor que el valor crítico para F de 2.87, y una probabilidad de 6.62E^{-09} , la cual es menor a 0.05. Por lo que existe evidencia estadísticamente significativa para aceptar la hipótesis planteada. Los resultados indican que al menos un grupo es significativamente diferente de los demás en relación con la variable que estamos estudiando. Por lo tanto, se respalda la hipótesis alterna y se concluye que hay efectos reales en la densidad de pastas obtenidas por geopolimerización de polvo de ladrillo por parte de la concentración de silicato de sodio a 14 días.

Figura 24

Análisis de Varianza de la influencia de la concentración de Na_2SiO_3 sobre la densidad de pastas obtenidas por geopolimerización de polvo de ladrillo a 28 días

RESUMEN				
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
0M	5	8.52	1.704	0.00033
5M	5	8.82	1.764	0.00043
7.5M	5	9.16	1.832	0.00057
10M	5	9.37	1.874	0.00043
12.5M	5	8.88	1.776	0.00043

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0.08544	4	0.02136	48.76712329	4.8704E-10	2.866081402
Dentro de los grupos	0.00876	20	0.000438			
Total	0.0942	24				

1 En la figura 24 se puede visualizar la variación de la densidad que presentaron las pastas obtenidas por geopolimerización de polvo de ladrillo a 28 días con respecto a la concentración de Silicato de sodio. En esta figura encontramos un valor F de 48.77, siendo mayor que el valor crítico para F de 2.87, y una probabilidad de 4.87E^{-10} , la cual es menor a 0.05. Por lo que existe evidencia estadísticamente significativa para aceptar la hipótesis planteada. Los resultados indican que al menos un grupo es significativamente diferente de los demás en relación con la variable que estamos estudiando. Por lo tanto, se respalda la hipótesis alterna y se concluye que hay efectos reales en la densidad de pastas obtenidas por geopolimerización de polvo de ladrillo por parte de la concentración de silicato de sodio a 28 días.

Figura 25

Análisis de Varianza de la influencia de la concentración de Na_2SiO_3 sobre la densidad de morteros obtenidos por geopolimerización de polvo de ladrillo a 7 días

RESUMEN				
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
0M	5	9.15	1.83	0.00125
5M	5	9.92	1.984	0.00158
7.5M	5	9.9	1.98	0.00335
10M	5	10.13	2.026	0.00053
12.5M	5	9.08	1.816	0.00058

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0.187944	4	0.046986	32.22633745	1.84516E-08	2.866081402
Dentro de los grupos	0.02916	20	0.001458			
Total	0.217104	24				

2 En la figura 25 se puede visualizar la variación de la densidad que presentaron los morteros obtenidos por geopolimerización de polvo de ladrillo a 7 días con respecto a la concentración de Silicato de sodio. En esta figura encontramos un valor F de 32.23, siendo mayor que el valor crítico para F de 2.87, y una probabilidad de 1.85E^{-08} , la cual es menor a 0.05. Por lo que existe evidencia estadísticamente significativa para aceptar la hipótesis planteada. Los resultados indican que al menos un grupo es significativamente diferente de los demás en relación con la variable que estamos estudiando. Por lo tanto, se respalda la hipótesis alterna y se concluye que hay efectos reales en la densidad de morteros obtenidos por geopolimerización de polvo de ladrillo por parte de la concentración de silicato de sodio a 7 días.

Figura 26

Análisis de Varianza de la influencia de la concentración de Na_2SiO_3 sobre la densidad de morteros obtenidos por geopolimerización de polvo de ladrillo a 14 días

RESUMEN				
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
0M	5	9.23	1.846	0.00973
5M	5	10.07	2.014	0.01513
7.5M	5	10.01	2.002	0.00037
10M	5	10.33	2.066	0.03868
12.5M	5	9.21	1.842	0.00607

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0.21328	4	0.05332	3.809659903	0.018466316	2.866081402
Dentro de los grupos	0.27992	20	0.013996			
Total	0.4932	24				

2 En la figura 26 se puede visualizar la variación de la densidad que presentaron los morteros obtenidos por geopolimerización de polvo de ladrillo a 14 días con respecto a la concentración de Silicato de sodio. En esta figura encontramos un valor F de 3.81, siendo mayor que el valor crítico para F de 2.87, y una probabilidad de 0.02, la cual es menor a 0.05. Por lo que existe evidencia estadísticamente significativa para aceptar la hipótesis planteada. Los resultados indican que al menos un grupo es significativamente diferente de los demás en relación con la variable que estamos estudiando. Por lo tanto, se respalda la hipótesis alterna y se concluye que hay efectos reales en la densidad de morteros obtenidos por geopolimerización de polvo de ladrillo por parte de la concentración de silicato de sodio a 14 días.

Figura 27

Análisis de Varianza de la influencia de la concentración de Na_2SiO_3 sobre la densidad de morteros obtenidos por geopolimerización de polvo de ladrillo a 28 días

RESUMEN				
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
0M	5	9.31	1.862	0.00017
5M	5	10.2	2.04	0.00025
7.5M	5	10.45	2.09	0.00025
10M	5	10.6	2.12	0.00025
12.5M	5	9.3	1.86	0.00025

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0.312936	4	0.078234	334.3333333	5.23565E-18	2.866081402
Dentro de los grupos	0.00468	20	0.000234			
Total	0.317616	24				

2 En la figura 27 se puede visualizar la variación de la densidad que presentaron los morteros obtenidos por geopolimerización de polvo de ladrillo a 28 días con respecto a la concentración de Silicato de sodio. En esta figura encontramos un valor F de 334.33, siendo mayor que el valor crítico para F de 2.87, y una probabilidad de 5.24E^{-18} , la cual es menor a 0.05. Por lo que existe evidencia estadísticamente significativa para aceptar la hipótesis planteada. Los resultados indican que al menos un grupo es significativamente diferente de los demás en relación con la variable que estamos estudiando. Por lo tanto, se respalda la hipótesis alterna y se concluye que hay efectos reales en la densidad de morteros obtenidos por geopolimerización de polvo de ladrillo por parte de la concentración de silicato de sodio a 28 días.

3.2.4. Determinación de la influencia de la concentración de Na_2SiO_3 sobre el porcentaje de fases amorfas de morteros y pastas obtenidas por geopolimerización de polvo de ladrillo

En este caso, al realizar un método de caracterización SEM, y solo poder obtener descripciones cualitativas de imagen como aproximaciones de porcentaje de fases amorfas mediante estas mismas, la prueba de hipótesis no puede ser realizada.

3.2.5. Determinación de la influencia de la concentración de Na_2SiO_3 sobre la formación geles N-A-S-H de morteros y pastas obtenidas por geopolimerización de polvo de ladrillo

En este caso, al realizar un método de caracterización FTIR, y solo poder obtener descripciones cualitativas de imagen mediante picos de grupos funcionales químicos, la prueba de hipótesis no puede ser realizada.

IV. DISCUSIÓN

- Con respecto a la propiedad de densidad en las figuras 9 y 10, tenemos un aumento de dicha propiedad física en ambas muestras a medida que la concentración del activador alcalino aumenta, precisamente desde los niveles 5M a 10.0 M de Na_2SiO_3 . Este aumento de la propiedad física viene a estar relacionado la alta densidad de la sílice que se encuentra en la solución alcalina a medida que se incrementa su concentración en las muestras (Enoh y Ushie, 2023). La densidad está relacionada directamente proporcional con la resistencia mecánica de los morteros, específicamente con la resistencia a la compresión (Gutiérrez, 2003). Al poseer mayor densidad, las muestras llegan a poseer una mayor cantidad de enlaces químicos, cohesión, mejor transferencia de carga, y menos fragilidad. Por ende, un geopolímero más denso tiene mayor oportunidad de incrementar sus propiedades mecánicas. No obstante, en las mismas figuras 9 y 10, observamos un decaimiento de la densidad a medida que la concentración del activador alcalino aumenta, a partir del nivel 10.0 M a 12.5M. Esta disminución de la densidad puede estar relacionada con el hecho de que las muestras de estos altos niveles, les hizo falta de un mayor contenido de líquido en amasado, al presentar un sistema saturada de sílice. De esta forma se generaron muestras con mayor viscosidad en estado fresco, entorpeciendo a la compactación de muestras y dificultando la formación de los geles poliméricos (Handayanim et al., 2022).
- Asimismo, en la figura 8, tenemos un comportamiento por parte de la propiedad de porosidad inversamente proporcional a los resultados de densidad del anterior párrafo. Disminuyendo la porosidad a medida que la concentración del activador alcalino aumenta, desde los niveles 5M a 7.5M de Na_2SiO_3 . Como también aumentando a medida que la concentración del activador alcalino aumenta a partir del nivel 7.5M a 12.5M. Este comportamiento de la porosidad se da, ya que dicha propiedad está ligada de forma inversa con la densidad de muestra. Por un lado, disminuyendo la porosidad al aumentar los enlaces de geopolimerización por concentración de silicio, y por el otro aumentando la porosidad al presenciar una dificultad de pérdida de agua en las muestras que aún no reaccionan durante el proceso de geopolimerización (Hermeza, 2019). Afectando una vez más a la eficiencia mecánica en resistencia a la compresión.

- Por su parte en la imagen 11, se presentó una serie ⁷ de micrografías obtenidas mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) a 10µm de tamaño. En la primera micrografía (a) ME1-5M, se pudo apreciar regiones que presentaron grietas y poros. Esto se debe a que la baja concentración de Na_2SiO_3 tiende a limitar la disponibilidad de álcalis necesarios para activar la reacción geopolimérica. Asimismo, se apreció una gran presencia de fases amorfas identificadas por las regiones desordenadas de percepción oscura, conformando un 71%. Esto sugiere que la reacción no se ha producido de manera efectiva en algunas áreas, lo que resulta en una estructura menos consolidada y más porosa. Como también pequeñas regiones consolidadas de color más claro, indicando las regiones de geopolimerización completa y por el contrario una cantidad de grandes regiones de estructura menos consolidada, regiones de geopolimerización incompleta. En la segunda micrografía (b) ME2-7.5M, ya no se presentaron regiones con fisuras, aunque sí se evidenciaron regiones porosas. Asimismo, la presencia de fases amorfas identificadas por las regiones desordenadas de percepción oscura fue menor, conformando un 44%. Por lo que se evidenció una mayor presencia de regiones más iluminadas cristalinas. Indicando que la reacción geopolimérica ha avanzado en algunas áreas debido a la concentración intermedia de Na_2SiO_3 . Permitiendo una mezcla de zonas con reacciones geopoliméricas en diferentes etapas, lo que da como resultado una estructura heterogénea. En la tercera micrografía (c) ME3-10.0 M se observó una ⁴⁷ disminución en el tamaño y la cantidad de poros. Como también una reducción en la cantidad de fases amorfas oscuras, conformando un 15%. Esto se debe a que la concentración más alta de Na_2SiO_3 proporciona una mayor disponibilidad de álcalis para activar la reacción geopolimérica. También, se observó una gran presencia de regiones cristalinas y compactas. Esto se debe a una reacción geopolimérica más completa en estas áreas por concentración del activador, lo que conduce a una estructura más densa y menos porosa. En la cuarta micrografía (d) ME4-12.5M, se observó un incremento de tamaño de poros y una combinación de fases cristalinas más iluminadas y fases amorfas oscuras de gran tamaño. Las cuales conformaron un 25%. Esto indica que la reacción geopolimérica es generalmente completa en las regiones compactas, lo que sugiere una estructura geopolimérica bien consolidada. Sin embargo, algunas áreas con gran tamaño que no han reaccionado completamente

pueden deberse a heterogeneidades en la distribución de reactivos o condiciones locales en la muestra (Handayanim et al., 2022).

- En la figura 12, podemos apreciar los espectros FTIR de las muestras por cada nivel concentración de Silicato de Sodio. Observamos múltiples protuberancias de picos, entre ellas la más notoria fue la de número de onda próxima a 1000 cm^{-1} , es decir, las bandas en 995 , 998 , 1010 y 1020 cm^{-1} . Estas bandas nos confirman que la principal estructura de las pastas y morteros obtenidas por geopolimerización de polvo de ladrillo es Si-O-Al (Gao et al., 2014). Demostrando así, que la solución alcalina de silicato de sodio funciona como activador para poder fabricar buenos materiales geopolímeros. A su vez se encontraron picos de menor absorbancia con números de onda de 778 , 693 y 648 cm^{-1} . Estos picos se atribuyen a ciertas vibraciones simétricas Si-O-Si y vibraciones de flexión O-Si-O (Mollah, 1994). Al tener la presencia de los grupos funcionales mencionados, evidenciamos la formación de los geles N-A-S-H en los geopolímeros a partir de la activación alcalina de silicato de sodio en las muestras de concentración 5M-12.5M. Ya que este tipo de geles son identificados con la presencia de grupos funcionales de Si-O , Al-O y Na-O . En esta investigación, el activador de silicato de sodio introduce el ion de sodio (Na) en la estructura del gel, lo que resulta en geles N-A-S-H, los cuales proporcionan propiedades de resistencia y durabilidad a las muestras geopoliméricas. Al no tener un precursor de calcio (Ca), ya sea en la matriz conglomerante, polvo de ladrillo, como en el activador alcalino, Silicato de Sodio, no se pudo confirmar la presencia de geles C-A-S-H en las muestras. Luego de confirmar la presencia de dichos geles geopoliméricos, pasamos a comparar las absorbancias entre los niveles de concentración de activador. Obteniendo un incremento de absorbancia a medida que los niveles de silicato de sodio incrementan, vemos que tenemos espectros de ME1(5M), ME2(7.5) y ME3 (10.0 M) con absorbancias crecientes. Por el contrario, el espectro de ME4(12.5M) decrece en comparación a los otros niveles. De esta forma se explica la tendencia en las propiedades mecánicas obtenidas en los resultados.
- Por último, en las figuras 6 y 7, tenemos como resultados de resistencia a la compresión de los morteros y pastas sometidos a distintas concentraciones de Silicato de Sodio. En aquellas figuras observamos un aumento de dicha resistencia en las muestras a medida que la concentración del activador alcalino aumenta, precisamente

entre los niveles de 5M a 10.0 M de Na_2SiO_3 . Este aumento de propiedades mecánicas viene a estar relacionado con la alta cantidad de dióxido de silicio o sílice (SiO_2) por parte de la solución activadora. Este contenido de sílice actúa de forma primordial en la reacción de enlaces interfaciales entre las matrices de polvo de ladrillo, aumentando así su resistencia (Handyanim et al., 2022). La formación de los enlaces químicos mencionados se da en el proceso de geopolimerización con silicato de sodio y polvo de ladrillo como aglutinante, contribuyendo a la solidificación y la integridad estructural del material geopolímero. Entre ellos tenemos a los enlaces de silicato (Si-O-Si), quienes se producen entre átomos de silicio (Si) y oxígeno (O). En presencia de silicato de sodio (Na_2SiO_3), los átomos de silicio y oxígeno reaccionan para formar enlaces de silicato. Estos átomos son encontrados tanto de la solución alcalina como de los componentes ricos en silicio en el polvo de ladrillo (generalmente minerales de silicato de aluminio). Creando así la estructura de red tridimensional que da a los geopolímeros su fuerza y estabilidad. También tenemos a los enlaces de aluminosilicatos (Al-O-Si), los cuales se forman cuando los átomos de aluminio (Al) en el polvo de ladrillo reaccionan con los átomos de silicio (Si) en la solución de silicato de sodio. Estos enlaces proporcionan resistencia adicional a la matriz de geopolímero. Por lo tanto, la combinación de estos diversos enlaces e interacciones químicas da como resultado una estructura de red tridimensional compleja e interconectada dentro del geopolímero. Otorgando a los geopolímeros su resistencia mecánica, durabilidad y resistencia a factores ambientales (Thang, 2016). Por otro lado, en las mismas figuras 6 y 7, observamos un decaimiento de la resistencia mecánica de compresión a medida que la concentración del activador alcalino de Na_2SiO_3 aumenta, a partir del nivel de 10.0 M a 12.5M. Esta disminución de la resistencia teniendo un contenido alto de Na_2SiO_3 consigue estar relacionado con la saturación en el sistema de cantidad de silicato, ya que el exceso de silicato de sodio dificulta la evaporación del agua y la formación de estructuras, dificultando un mayor desarrollo de la resistencia de muestras (Morsy et al., 2014). El agua que se consume durante las reacciones de geopolimerización como reactante es necesaria para la formación de enlaces Si-O-Al siempre y cuando se emplee una proporción adecuada. Si la concentración de sílice satura al sistema, se necesitará una mayor cantidad de solución, la cual contiene mayor proporción de agua. Al ocurrir esto, la tasa de evaporación de agua se prolongará como también el

tiempo de curado, haciendo la reacción más lenta. De modo que la formación de estructuras en los aglutinantes se verá comprometida. Decayendo la resistencia mecánica por formación reducida de enlaces SI-O-Al (Handayanim et al., 2022).

V. CONCLUSIONES

- Tras llevar a cabo la investigación, se observó que la adición de Silicato de Sodio (Na_2SiO_3) a las pastas y morteros obtenidos por geopolimerización de polvo de ladrillo tiene un efecto significativo en sus propiedades. Estas modificaciones fueron favorables, como desfavorables según la concentración de silicato de sodio utilizado.
- Los ensayos de densidad realizados revelaron cambios favorables en dicha propiedad física a primeras concentraciones de activador ((5M a 10.0 M) a alcanzando densidades máximas de 1.87 g/cm^3 y 2.12 g/cm^3 en pastas y morteros de contenido de 10.0 M respectivamente a 28 días. Los ensayos de porosidad, por su parte revelaron una relación inversa con los resultados de densidad, obteniendo cambios favorables en dicha propiedad física a primeras concentraciones de activador (5M a 10.0 M) alcanzando una porosidad mínima de 2.7 % en morteros de contenido 7.5M a 28 días. Además, la caracterización microscópica mediante SEM permitió visualizar alteraciones en la morfología de los materiales, lo que sugiere la concentración de Na_2SiO_3 influye en la efectividad de la reacción de geopolimerización y, por lo tanto, en la morfología y la estructura resultante de los morteros. A medida que aumenta su concentración en los niveles 5M-10.0 M, se tiende a lograr una mayor reacción geopolimérica y una estructura geopolimérica más densa y consolidada.
- Los ensayos de FTIR proporcionaron información valiosa sobre las propiedades químicas de los grupos funcionales presentes en las pastas y morteros. Corroborando la formación de geles geopoliméricos de tipo N-A-S-H. Encontrando cambios en absorbancia de geopolímeros debido a la adición de silicato de sodio, lo que implica mejoras potenciales a nivel de desempeño mecánico en los niveles 5M-10.0 M.
- Los ensayos de compresión siguiendo la norma ASTM C109 demostraron que el Silicato de Sodio puede tener un impacto notable en las propiedades mecánicas de las pastas y morteros geopoliméricos. Obteniendo resultados mecánicos favorables gracias a las optimizaciones físicas y químicas que la concentración de silicato de sodio otorga. Estos cambios favorables se dieron en concentraciones de activador de 5M a 10.0 M, alcanzando resistencias a la compresión máximas de 23.92 MPa y 17.98 MPa en pastas y morteros de contenido de 10.0 M respectivamente a 28 días.

VI. RECOMENDACIONES

- Investigar y ajustar sistemáticamente la concentración de silicato de sodio para maximizar las propiedades físicas, químicas y mecánicas de las pastas y morteros geopoliméricos a base de polvo de ladrillo.
- Evaluar la durabilidad a largo plazo de los materiales geopoliméricos modificados con silicato de sodio, incluyendo pruebas de resistencia a la corrosión, resistencia al desgaste y estabilidad en diversas condiciones ambientales.
- Investigar y analizar las posibles aplicaciones específicas de estos materiales geopoliméricos mejorados con silicato de sodio en la construcción y otras industrias relacionadas.
- Realizar un análisis de costo-beneficio para evaluar la viabilidad económica de la incorporación de silicato de sodio en comparación con otros aditivos o materiales disponibles en el mercado.
- Proponer normativas y estándares específicos para el uso de estos materiales geopoliméricos en la industria de la construcción.
- Evaluar el impacto ambiental y la sostenibilidad de los materiales geopoliméricos mejorados con silicato de sodio en comparación con alternativas convencionales.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Assi, Lateef. (2018). *Understanding Geopolymerization Process for Enhancement of Mechanical Properties of Fly Ash Based-Geopolymer Concrete*. 10.13140/RG.2.2.27756.41608.
- Atria. (2021). *¿Cómo medir la porosidad de los materiales?*. Atria Innovation. Recuperado de: <https://www.construction21.org/articles/h/sustainable-construction-in-peru-between-informality-unskilled-labour-self-construction-and-corruption.html>
- Calderon, N., (2022). *Caracterización de morteros geopoliméricos sintetizados por activación alcalina de ceniza volcánica y agregados finos*. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. <http://hdl.handle.net/20.500.12773/13786>
- Chee, W.; Kim, H.; Soon, P.; Johnson, A, y Tung, L. (2018). *Potential use of brick waste as alternate concrete-making materials: A review*. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.193>
- Ding, Z., Su, Q., Bian, H., Wang, Q. y Zhou, J. (2022). *Water-glass Module on Mechanical Properties of Geopolymer Recycled Aggregate Concrete*. Journal of Physics: Conference Series. 2148.012060. 10.1088/1742-6596/2148/1/012060.
- Du, T. y Liu, Y. (2020). *Effect of water glass on setting time and mechanical properties of fly ash slag geopolymer*. Journal of Physics: Conference Series. 1676.012024. 10.1088/1742-6596/1676/1/012024.
- Ebnesajjad, S. y Landrock, A. (2015). *Chapter 5 - Characteristics of Adhesive Materials*.
- Enoh, M. y Ushie, D. (2023). *Effect of Sodium Silicate to Hydroxide Ratio and Sodium Hydroxide Concentration on the Physico-Mechanical Properties of Geopolymer Binders*. East African Journal of Engineering. 6. 113-121. 10.37284/eaje.6.1.1361.
- Gao, K., ³⁴Lin, K.-L.; Wang, D.; Hwang, C.-L.; Shiu, H.-S.; Chang, Y.-M.; Cheng, T.-W. (2014). *Effects SiO₂/Na₂O molar ratio on mechanical properties and the microstructure of nano-SiO₂ metakaolin-based geopolymers*. Constr. Build. Mater.
- Handayani, L., Aprilia, S., Abdullah, A., Rahmawati, C., Abdullah, M., & A Aziz, I. y Azimi, E. (2021). *Synthesis of Sodium Silicate from Rice Husk Ash as an Activator to Produce Epoxy-Geopolymer Cement*. Journal of Physics: Conference Series. 1845.012072. 10.1088/1742-6596/1845/1/012072.
- Handayani, L., Aprilia, S., Abdullah, A., Rahmawati, C., Aulia, T., Ludvig, P & Ahmad, J. (2022). *Sodium Silicate from Rice Husk Ash and Their Effects as Geopolymer Cement*. Polymers. 14. 2920. 10.3390/polym14142920.
- He, Rui & Fu, C.Q. & Ma, Hongyan & Ye, Hailong & Jin, Xianyu. (2020). *Prediction of Effective Chloride Diffusivity of Cement Paste and Mortar from Microstructural Features*. Journal of Materials in Civil Engineering. 32. 04020211. 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003288.

- Hermoza, M., (2019). *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, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa.
<http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/8146>
- Fernández, L. (2005). *Fichas para investigadores*. Recuperado de:
<https://www.ub.edu/idp/web/sites/default/files/fitxes/ficha3-cast.pdf>
- Gaillard, C. (2019). *[Hot climates - dossier] #17 - Sustainable construction in Peru between informality, unskilled labour, self-construction and corruption*. Recuperado de: <https://www.construction21.org/articles/h/sustainable-construction-in-peru-between-informality-unskilled-labour-self-construction-and-corruption.html>
- Gutiérrez, L. (2003). “*El Concreto Y Otros Materiales Para La Construcción*”
- Khan, Muhammad & Liaqat, Nabeel & Ahmed, Ibrar & Basit, Abdul & Umar, Muhammad & Khan, Aftab. (2018). *Effect of Brick Dust on Strength and Workability of Concrete*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 414. 012005. 10.1088/1757-899X/414/1/012005.
- Lead. (2022). *A Complete Guide to Understand Surface Roughness in Manufacturing*. Recuperado de: https://leadrp.net/blog/a-complete-guide-to-understand-surface-roughness-in-manufacturing/#Surface_Roughness
- Luhar, S.; Cheng, T.; Nicolaidis, D.; Luhar, I.; Panias, D. y Sakkas, K. (2019). *Valorisation of glass waste for development of Geopolymer composites – Mechanical properties and rheological characteristics: A review*.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.041>
- Maqsood, T.; Shooshtarian, S.; Wong, P.; Khalfan, M. y Yang, R. (2019). *Resource circular economy: opportunities to reduce waste disposal across the supply chain*. Recuperado de: <https://sbenrc.com.au/app/uploads/2020/09/1.65-Report-5-Material-case-study-Brick.pdf>
- Meesala, Chakradhara. (2020). *Influence of brick dust, stone dust, and recycled fine aggregate on properties of natural and recycled aggregate concrete*. Structural Concrete. 22. 10.1002/suco.202000103.
- Mijarsh, M. J. A., Megat Johari, M. A., & Ahmad, Z. A. (2015). *Effect of delay time and Na₂SiO₃ concentrations on compressive strength development of geopolymer mortar synthesized from TPOFA*. Construction and Building Materials, 86, 64–74. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.03.078
- Mishra, G. (2021). *Compressive Strength of concrete – Cube Test (PDF), Procedure, Results*. The constructor: Building ideas. Recuperado de:
<https://theconstructor.org/concrete/compressive-strength-concrete-cube-test/1561/>

- Mohan, Mani & Apurva, Aditya & Kumar, Nishant & Ojha, Abhishek. (2020). *A Review on Use of Crushed Brick Powder as a Supplementary Cementitious Material*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 936. 012001. 10.1088/1757-899X/936/1/012001.
- Mohseni, E. (2018). *Assessment of Na₂SiO₃ to NaOH ratio impact on the performance of polypropylene fiber-reinforced geopolymer composites*. Construction and Building Materials, 186, 904–911. doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.08.032
- Mokhtar, Norfaniza & Hassan, Muhammad. (2021). *Performance of Sodium Silicate as Self-Healing Agent on Concrete Properties: A Review*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 1144. 012024. 10.1088/1757-899X/1144/1/012024.
- Mollah, M.Y.A.; Hess, T.R.; Cocke, D.L. (1994). *Surface and bulk studies of leached and unleached fly ash using XPS, SEM, EDS and FTIR techniques*. Cem. Concr. Res.
- Morsy, M., Alsayed, S., Al-Salloum, Y & Almusallam, T. (2014). *Effect of Sodium Silicate to Sodium Hydroxide Ratios on Strength and Microstructure of Fly Ash Geopolymer Binder*. Arabian Journal for Science and Engineering. 39. 4333-4339. 10.1007/s13369-014-1093-8.
- Okdiario (2019). *Conoce el método de observación directa*. Recuperado de: <https://okdiario.com/curiosidades/conoce-metodo-observacion-directa-3628568>
- Pachta, Vasiliki & Konopisi, Stavroula & Stefanidou, Maria. (2021). *The influence of brick dust and crushed brick on the properties of lime-based mortars exposed at elevated temperatures*. Construction and Building Materials. 296. 123743.
- Rao, Feng & Liu, Qi. (2015). *Geopolymerization and Its Potential Application in Mine Tailings Consolidation: A Review*. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review. 36. 150603070223003. 10.1080/08827508.2015.1055625.
- Regalado, A., Goicochea, H. (2020). *Efecto del contenido de inquemados y molienda de cenizas volantes en el desarrollo de la resistencia y porosidad de geopolímeros*. Universidad Nacional de Trujillo.
- Ridzuan, Ruslan & A. A., Khairulniza & Arshad, Mohd. (2014). *Effect of Sodium Silicate Types on the High Calcium Geopolymer Concrete*. Materials Science Forum. 803. 185-193.
- Sadam, K. (2023). *Amorphous Solids: Properties, Examples, and Applications*. Recuperado de: <https://psiberg.com/amorphous-solids/>
- Shaik, Mohammad & Vummaneni, Ranga Rao. (2017). *Experimental study on behaviour of flyash based geopolymer concrete*. 8. 575-582.

- Skinder, Bhat & Sheikh, Afeefa & Pandit, Ashok & Ganai, Bashir. (2013). *Brick kiln emissions and its environmental impact: A Review*. Journal of Ecology and the Natural Environment. 6. 1-11. 10.5897/JENE2013.0423.
- Team careers360. (2022). *Unit of Density - Meaning, Definition, Example, Unit, Formula FAQs*. Recuperado de: <https://school.careers360.com/physics/unit-of-density-topic-pge>
- Thang, X (2016). *Influence of Curing and Water to the Mechanical Properties of Geopolymer Mortar*. Vol. 5. 49-52.
- The Economist. (2019). *Safe Cities Index 2019: Urban security and resilience in an interconnected world*. Recuperado de: <https://safecities.economist.com/wp-content/uploads/2019/08/Aug-5-ENG-NEC-Safe-Cities-2019-270x210-19-screen.pdf>
- Tintisan, M & Siomin, Adrian-Cristian & Moldoveanu, Marta & Zaharie, A & Iştoan, Raluca & Jumate, Elena & Manea, Daniela & Fechete, Radu. (2022). *Investigation of microstructural development in mortars with recycled paper ash used as cement replacement, using NMR relaxometry*.
- Wagle, K. (2020). *Research Ethics: Definition, Principles and Advantages*. Recuperado de: <https://www.publichealthnotes.com/research-ethics-definition-principles-and-advantages/>
- Wang, H.; Kuo, W. y Po-Yo, C. (2013). *Study of the material properties of fly ash added to oyster cement mortar*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.021>
- Xu, L., Alrefaei, Y., Wang, Y & Dai, J. (2021). *Recent advances in molecular dynamics simulation of the N-A-S-H geopolymer system: modeling, structural analysis, and dynamics*. Construction and Building Materials. 276. 122196. 10.1016/j.conbuildmat.2020.122196.
- Zhao, Z., Grellier, A., El Karim Bouarroudj, M., Michel, F., Bulteel, D., & Courard, L. (2021). *Substitution of limestone filler by waste brick powder in self-compacting mortars: Properties and durability*. Journal of Building Engineering, 43, 102898. doi:10.1016/j.job.2021.102898

ANEXOS

Anexo 1: Matriz de consistencia

TITULO	FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	HIPÓTESIS	OBJETIVOS	VARIABLES	DIMENSIONES	METODOLOGÍA
EFFECTO DE LAS PROPIEDADES FISICO-QUIMICAS Y MECANICAS DE PASTAS Y MORTEROS OBTENIDAS POR GEOPOLIMERIZACIÓN DE POLVO DE LADRILLO?	<p>¿Cuál es el efecto del silicato (11) sódico (Na₂SiO₃) sobre las propiedades físico-químicas y mecánicas de pastas y morteros obtenidas por geopolimerización de polvo de ladrillo?</p>	<p>Hipótesis General El incremento de la concentración de silicato de sodio modifica las propiedades físico-químicas y mecánicas de pastas y morteros obtenidas por geopolimerización de polvo de ladrillo</p> <p>Hipótesis específicas</p> <ul style="list-style-type: none"> El incremento de la concentración de silicato de sodio en el rango de 5M a 12.5M, modifica la composición química; (18) incrementa la formación de geles tipo N-A-S-H de pastas y morteros obtenidas por geopolimerización de polvo de ladrillo. El incremento de la concentración 	<p>Objetivo General Determinar el efecto del silicato de sodio (Na₂SiO₃) sobre las propiedades físico-químicas y mecánicas de pastas y morteros obtenidas por geopolimerización de polvo de ladrillo.</p> <p>Objetivos específicos</p> <ul style="list-style-type: none"> Determinar las propiedades físicas en densidad, porosidad y caracterización microscópica de la morfología de las pastas y morteros mediante ensayos estándar ASTM C188 y SEM respectivamente. Determinar las propiedades químicas de los grupos funcionales resultantes de las pastas y morteros mediante ensayos estándar FTIR. Determinar las propiedades mecánicas en esfuerzos de 	<p>Variable Independiente Concentración de silicato de sodio</p> <p>Variables dependientes</p> <ul style="list-style-type: none"> Esfuerzo de compresión Densidad Porosidad Porcentaje de fases amorfas Formación de geles tipo N-A-S-H 	<p>M: Molaridad (M)</p> <p>σ: Esfuerzo (MPa)</p> <p>ρ: Densidad (g/cm³)</p> <p>P: Porosidad (%)</p> <p>Registro fotografico digital de porcentajes</p> <p>Registro de diferencia de espectros IR</p>	<p>Tipo Aplicada, explicativa y Cuantitativa</p> <p>Métodos Deductivo</p> <p>Diseño Experimental</p> <p>2.6 Plación La población de esta investigación estuvo conformada por todas las pastas y morteros obtenidos por geopolimerización a partir de polvo de ladrillo activado de forma alcalina por NaOH y por Na₂SiO₃.</p> <p>Muestra 75 pastas cilíndricas y 75 morteros cúbicos obtenidas por geopolimerización a partir de polvo de ladrillo activado de forma alcalina. Siendo, 15 pastas y 15</p>

de silicato de sodio en el rango de 5M a 12.5M, modifica la resistencia mecánica, **1** incrementa la resistencia a la **compresión de** pastas y morteros obtenidas por geopolimerización de polvo de ladrillo.

- El incremento de la concentración de silicato de sodio en el rango de 5M a 12.5M, modifica las propiedades físicas; incrementa la densidad y porcentaje de fases amorfas. Al igual que reduce la porosidad de pastas y morteros obtenidas por geopolimerización de polvo de ladrillo.

compresión de las pastas y morteros mediante ensayos estándar, siguiendo la norma ASTM C109.

morteros de grupo control activados con NaOH 8M. Como también, 60 pastas y 60 morteros de grupo experimental activados en distintas concentraciones de Na_2SiO_3 , de dimensiones 25mm diámetro x 50mm altura y 50x50x50mm respectivamente.

1 **Técnicas e instrumentos de recolección de datos**
Observación directa y Formatos de instrumentos de medición.

Métodos de análisis de investigación
ANOVA unidireccional

1 Anexo 2: Matriz de operacionalización de variables

Variable	Definición conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores	Items	Instrumentos	Escala de medición
Variable independiente Concentración de silicato de sodio	El silicato de sodio es un compuesto cuya composición puede variar 23 términos de la proporción de óxido de sodio (Na ₂ O) y dióxido de silicio (SiO ₂). Se presenta en forma de una solución acuosa, que es viscosa y carece de color, y posee una baja capacidad de adhesión. Sus aplicaciones principales incluyen la unión de papel y la fabricación de cartón corrugado, cajas y envases de cartón en diversas industrias. (1) Mesajad y Landrock, 2015).	Medida de masa soluto sobre el peso molecular de soluto por volumen de solución.	M = m/(PM*V) M: Molaridad (M) m: masa (g) PM: peso molecular (g/mol) V: volumen (L)	Formulario	Nominal	Fichas de observación	M
Variable dependiente Esfuerzo de compresión	Es la capacidad del material o la estructura para soportar las cargas en su superficie 1 agrietarse ni deformarse. Un material bajo compresión tiende a reducir el tamaño, mientras que, bajo tensión, el tamaño se alarga (Mishra, 2021).	Registro de carga aplicada versus área de muestra en función del tiempo	EC = F/A EC: Esfuerzo (MPa) F: Fuerza (N) A: Área (mm ²)	Formulario	Nominal	Fichas de observación	MPa
Variable dependiente Densidad	La densidad de un material indica qué tan denso es ese 28 erial en un área particular. La densidad de un material se calcula considerando su masa en relación con su volumen, proporcionando una medida de	Registro unidad de masa sobre unidad de volumen de muestra	27 p = m/v p: Densidad (g/cm ³) m: Masa (g) v: Volumen (cm ³)	Formulario	Nominal	Fichas de observación	g/cm ³

	<p>cuán compacta o densa es una sustancia en un espacio dado. Es una medida de la firmeza con que se empaquetan las cosas (Team careers360, 2022).</p>						
<p>Variable dependiente Porosidad</p>	<p>Es la proporción de espacios vacíos dentro de un material, ya sea en su superficie o en su estructura interna. Esta característica está relacionada con la densidad del material, su composición y la presencia de vacíos entre sus componentes (Atria, 2021).</p>	<p>Registro del cociente del volumen de vacíos sobre volumen total de muestra</p>	<p>$P = ((pa - pr)/pa) * 100$ P: Porosidad (%) pa: Densidad aparente sin compactación (g/cm³) pr: Densidad real (g/cm³)</p>	<p>Formulario</p>	<p>Nominal</p>	<p>Fichas de observación</p>	<p>%</p>
<p>Variable dependiente Porcentaje de fases amorfas</p>	<p>Son una clase de materiales que carecen de una estructura ordenada de largo alcance. Los sólidos amorfos tienen una disposición desordenada de átomos, moléculas o iones, lo que da como resultado una variedad de propiedades únicas (Sadam, 2023).</p>	<p>Registro de porcentaje de fases de muestra</p>	<p>Registro fotográfico digital de porcentajes</p>	<p>Formulario</p>	<p>Nominal</p>	<p>Fichas de observación</p>	<p>%</p>
<p>Variable dependiente Formación de geles tipo NASH</p>	<p>Son productos de la reacción de activación alcalina en la hidratación del cemento y desempeñan un papel crucial en la formación y el comportamiento del concreto endurecido (Xu et al., 2021).</p>	<p>Registro de transmitancia sobre número de onda de muestra</p>	<p>Registro de diferencia de espectros IR</p>	<p>Formulario</p>	<p>Nominal</p>	<p>Fichas de observación</p>	<p>Espectro FTIR</p>

Anexo 3: Resultados análisis de varianza ⁸

Análisis de Varianza de la influencia de la concentración de Na_2SiO_3 sobre la resistencia a la compresión de pastas obtenidas por geopolimerización de polvo de ladrillo a 7 días ⁴

RESUMEN				
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
0M	5	59.7	11.94	0.4126
5M	5	67.62	13.524	0.67173
7.5M	5	72.5	14.5	0.56115
10M	5	69.1	13.82	0.91655
12.5M	5	66.01	13.202	1.03077

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	17.862704	4	4.465676	6.214757292	0.002029946	2.866081402
Dentro de los grupos	14.3712	20	0.71856			
Total	32.233904	24				

Análisis de Varianza de la influencia de la concentración de Na_2SiO_3 sobre la resistencia a la compresión de pastas obtenidas por geopolimerización de polvo de ladrillo a 14 días ⁴

RESUMEN				
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
0M	5	66.14	13.228	0.28357
5M	5	86.08	17.216	1.68173
7.5M	5	100.67	20.134	0.76298
10M	5	112.35	22.47	1.03185
12.5M	5	76.18	15.236	0.71763

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	274.861304	4	68.715326	76.72957684	7.62867E-12	2.866081402
Dentro de los grupos	17.91104	20	0.895552			
Total	292.772344	24				

8

Análisis de Varianza de la influencia de la concentración de Na_2SiO_3 sobre la resistencia a la compresión de pastas obtenidas por geopolimerización de polvo de ladrillo a 28 días

RESUMEN				
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
0M	5	89.1	17.82	1.317
5M	5	90.36	18.072	1.19917
7.5M	5	116.03	23.206	1.83018
10M	5	119.6	23.92	1.477
12.5M	5	89.02	17.804	1.76773

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	194.008496	4	48.502124	31.94678755	1.98752E-08	2.866081402
Dentro de los grupos	30.36432	20	1.518216			
Total	224.372816	24				

12

Análisis de Varianza de la influencia de la concentración de Na_2SiO_3 sobre la resistencia a la compresión de morteros obtenidos por geopolimerización de polvo de ladrillo a 7 días

RESUMEN				
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
0M	5	40.33	8.066	0.34328
5M	5	43.59	8.718	0.58367
7.5M	5	66.01	13.202	0.74587
10M	5	68.69	13.738	0.63882
12.5M	5	50.98	10.196	0.17923

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	132.87232	4	33.21808	66.67967417	2.80983E-11	2.866081402
Dentro de los grupos	9.96348	20	0.498174			
Total	142.8358	24				

8

Análisis de Varianza de la influencia de la concentración de Na_2SiO_3 sobre la resistencia a la compresión de morteros obtenidos por geopolimerización de polvo de ladrillo a 14 días

RESUMEN				
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
0M	5	59.83	11.966	0.64793
5M	5	55.41	11.082	0.44737
7.5M	5	77.91	15.582	0.30402
10M	5	85.07	17.014	0.61903
12.5M	5	60.98	12.196	0.28883

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	132.80048	4	33.20012	71.94956614	1.38863E-11	2.866081402
Dentro de los grupos	9.22872	20	0.461436			
Total	142.0292	24				

15

Análisis de Varianza de la influencia de la concentración de Na_2SiO_3 sobre la resistencia a la compresión de morteros obtenidos por geopolimerización de polvo de ladrillo a 28 días

RESUMEN				
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
0M	5	65.89	13.178	1.03997
5M	5	68.57	13.714	1.37723
7.5M	5	87.54	17.508	2.37437
10M	5	89.9	17.98	1.11575
12.5M	5	67.15	13.43	1.482

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	112.38812	4	28.09703	19.01191855	1.36674E-06	2.866081402
Dentro de los grupos	29.55728	20	1.477864			
Total	141.9454	24				

8

Análisis de Varianza de la influencia de la concentración de Na_2SiO_3 sobre la porosidad de morteros obtenidos por geopolimerización de polvo de ladrillo a 7 días

RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
0M	5	71.02	14.204	0.88708
5M	5	54.98	10.996	0.88033
7.5M	5	26.52	5.304	1.06228
10M	5	43.67	8.734	1.22428
12.5M	5	74.68	14.936	0.75993

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	316.002224	4	79.000556	82.0546293	4.07272E-12	2.866081402
Dentro de los grupos	19.2556	20	0.96278			
Total	335.257824	24				

Análisis de Varianza de la influencia de la concentración de Na_2SiO_3 sobre la porosidad de morteros obtenidos por geopolimerización de polvo de ladrillo a 14 días

RESUMEN

Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
0M	5	68.7	13.74	0.85765
5M	5	50.51	10.102	0.89442
7.5M	5	25	5	0.865
10M	5	36.1	7.22	0.927
12.5M	5	71.6	14.32	1.097

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	326.798096	4	81.699524	88.01798292	2.107E-12	2.866081402
Dentro de los grupos	18.56428	20	0.928214			
Total	345.362376	24				

8

Análisis de Varianza de la influencia de la concentración de Na_2SiO_3 sobre la porosidad de morteros obtenidos por geopolimerización de polvo de ladrillo a 28 días

RESUMEN				
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
0M	5	64.5	12.9	0.315
5M	5	48.8	9.76	0.723
7.5M	5	13.5	2.7	0.315
10M	5	26.3	5.26	1.063
12.5M	5	69.2	13.84	0.623

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	464.1624	4	116.0406	190.9190523	1.25931E-15	2.866081402
Dentro de los grupos	12.156	20	0.6078			
Total	476.3184	24				

Análisis de Varianza de la influencia de la concentración de Na_2SiO_3 sobre la densidad de pastas obtenidas por geopolimerización de polvo de ladrillo a 7 días

RESUMEN				
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
0M	5	8.41	1.682	0.00037
5M	5	8.59	1.718	0.00077
7.5M	5	8.97	1.794	0.00058
10M	5	9.21	1.842	0.00067
12.5M	5	8.61	1.722	0.00027

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0.084096	4	0.021024	39.51879699	3.15417E-09	2.866081402
Dentro de los grupos	0.01064	20	0.000532			
Total	0.094736	24				

8

Análisis de Varianza de la influencia de la concentración de Na_2SiO_3 sobre la densidad de pastas obtenidas por geopolimerización de polvo de ladrillo a 14 días

RESUMEN				
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
0M	5	8.47	1.694	0.00053
5M	5	8.77	1.754	0.00033
7.5M	5	8.99	1.798	0.00067
10M	5	9.26	1.852	0.00062
12.5M	5	8.75	1.75	0.00025

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0.069696	4	0.017424	36.3	6.62145E-09	2.866081402
Dentro de los grupos	0.0096	20	0.00048			
Total	0.079296	24				

Análisis de Varianza de la influencia de la concentración de Na_2SiO_3 sobre la densidad de pastas obtenidas por geopolimerización de polvo de ladrillo a 28 días

RESUMEN				
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza
0M	5	8.52	1.704	0.00033
5M	5	8.82	1.764	0.00043
7.5M	5	9.16	1.832	0.00057
10M	5	9.37	1.874	0.00043
12.5M	5	8.88	1.776	0.00043

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0.08544	4	0.02136	48.76712329	4.8704E-10	2.866081402
Dentro de los grupos	0.00876	20	0.000438			
Total	0.0942	24				

8

Análisis de Varianza de la influencia de la concentración de Na_2SiO_3 sobre la densidad de morteros obtenidos por geopolimerización de polvo de ladrillo a 7 días

RESUMEN				
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
0M	5	9.15	1.83	0.00125
5M	5	9.92	1.984	0.00158
7.5M	5	9.9	1.98	0.00335
10M	5	10.13	2.026	0.00053
12.5M	5	9.08	1.816	0.00058

ANÁLISIS DE
VARIANZA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	0.187944	4	0.046986	32.22633745	1.84516E-08	2.866081402
Dentro de los grupos	0.02916	20	0.001458			
Total	0.217104	24				

Análisis de Varianza de la influencia de la concentración de Na_2SiO_3 sobre la densidad de morteros obtenidos por geopolimerización de polvo de ladrillo a 14 días

RESUMEN				
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
0M	5	9.23	1.846	0.00973
5M	5	10.07	2.014	0.01513
7.5M	5	10.01	2.002	0.00037
10M	5	10.33	2.066	0.03868
12.5M	5	9.21	1.842	0.00607

ANÁLISIS DE
VARIANZA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	0.21328	4	0.05332	3.809659903	0.018466316	2.866081402
Dentro de los grupos	0.27992	20	0.013996			
Total	0.4932	24				

8

Análisis de Varianza de la influencia de la concentración de Na_2SiO_3 sobre la densidad de morteros obtenidos por geopolimerización de polvo de ladrillo a 28 días

RESUMEN				
<i>Grupos</i>	<i>Cuenta</i>	<i>Suma</i>	<i>Promedio</i>	<i>Varianza</i>
0M	5	9.31	1.862	0.00017
5M	5	10.2	2.04	0.00025
7.5M	5	10.45	2.09	0.00025
10M	5	10.6	2.12	0.00025
12.5M	5	9.3	1.86	0.00025

ANÁLISIS DE VARIANZA						
<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Entre grupos	0.312936	4	0.078234	334.3333333	5.23565E-18	2.866081402
Dentro de los grupos	0.00468	20	0.000234			
Total	0.317616	24				

Anexo 4: Resultados de laboratorio

⁴
 Datos de Resistencia a la compresión de pastas obtenidas por geopolimerización de polvo de ladrillo

Resistencia a la compresión (MPa) - 7 días						
Muestra	R1	R2	R3	R4	R5	PROM
PEP - 1 / GC	11.78	12.64	11.90	12.40	10.98	11.94
PE1 - 1 / 5M	13.82	13.92	13.55	12.12	14.21	13.52
PE2 - 1 / 7.5M	15.47	13.72	14.63	14.90	13.78	14.50
PE3 - 1 / 10.0 M	13.12	14.22	13.77	12.78	15.21	13.82
PE4 - 1 / 12.5M	12.50	13.85	12.95	14.60	12.11	13.20
Resistencia a la compresión (MPa) - 14 días						
Muestra	R1	R2	R3	R4	R5	PROM
PEP - 2 / GC	13.20	13.01	12.68	14.11	13.14	13.23
PE1 - 2 / 5M	18.73	16.80	15.28	17.35	17.92	17.22
PE2 - 2 / 7.5M	19.43	20.72	20.00	21.30	19.22	20.13
PE3 - 2 / 10.0 M	23.17	21.85	21.27	23.80	22.26	22.47
PE4 - 2 / 12.5M	14.54	15.58	15.59	14.2	16.27	15.24
Resistencia a la compresión (MPa) - 28 días						
Muestra	R1	R2	R3	R4	R5	PROM
PEP - 3 / GC	19.20	16.50	16.90	18.70	17.80	17.82
PE1 - 3 / 5M	16.76	18.89	17.31	19.42	17.98	18.07
PE2 - 3 / 7.5M	21.66	22.78	24.12	25.03	22.44	23.21
PE3 - 3 / 10.0 M	22.20	24.50	25.00	23.10	24.80	23.92
PE4 - 3 / 12.5M	16.32	19.12	17.57	16.78	19.23	17.80

Datos de Resistencia a la compresión de morteros obtenidos por geopolimerización de polvo de ladrillo

Resistencia a la compresión (MPa) - 7 días						
Muestra	R1	R2	R3	R4	R5	PROM
MEP - 1 / GC	7.40	8.52	8.12	7.55	8.74	8.07
ME1 - 1 / 5M	8.22	9.42	8.35	7.95	9.65	8.72
ME2 - 1 / 7.5M	13.92	12.44	12.15	13.45	14.05	13.20
ME3 - 1 / 10.0 M	12.94	14.84	13.85	12.98	14.08	13.74
ME4 - 1 / 12.5M	9.73	10.17	10.54	9.84	10.70	10.20
Resistencia a la compresión (MPa) - 14 días						
Muestra	R1	R2	R3	R4	R5	PROM
MEP - 2 / GC	12.77	12.29	11.24	12.55	10.98	11.97
ME1 - 2 / 5M	10.94	11.69	11.32	11.47	9.99	11.08
ME2 - 2 / 7.5M	16.42	15.27	15.46	15.78	14.98	15.58
ME3 - 2 / 10.0 M	16.31	17.34	17.02	16.25	18.15	17.01
ME4 - 2 / 12.5M	11.50	12.27	12.34	11.92	12.95	12.20
Resistencia a la compresión (MPa) - 28 días						
Muestra	R1	R2	R3	R4	R5	PROM
MEP - 3 / GC	14.33	13.25	11.78	13.92	12.61	13.18
ME1 - 3 / 5M	12.48	13.32	14.67	15.21	12.89	13.71
ME2 - 3 / 7.5M	16.12	18.23	17.98	19.45	15.76	17.51
ME3 - 3 / 10.0 M	16.8	17.25	19.5	18.45	17.9	17.98
ME4 - 3 / 12.5M	14.50	13.25	11.90	12.70	14.80	13.43

Datos de densidad de pastas obtenidas por geopolimerización de polvo de ladrillo

Densidad (g/cm ³) - 7 días						
Muestra	R1	R2	R3	R4	R5	PROM
PEP - 1 / GC	1.67	1.69	1.71	1.66	1.68	1.68
PE1 - 1 / 5M	1.70	1.73	1.71	1.76	1.69	1.72
PE2 - 1 / 7.5M	1.81	1.78	1.80	1.76	1.82	1.79
PE3 - 1 / 10.0 M	1.82	1.86	1.85	1.81	1.87	1.84
PE4 - 1 / 12.5M	1.74	1.71	1.73	1.70	1.73	1.72
Densidad (g/cm ³) - 14 días						
Muestra	R1	R2	R3	R4	R5	PROM
PEP - 2 / GC	1.67	1.71	1.70	1.67	1.72	1.69
PE1 - 2 / 5M	1.77	1.73	1.76	1.74	1.77	1.75
PE2 - 2 / 7.5M	1.82	1.78	1.79	1.83	1.77	1.80
PE3 - 2 / 10.0 M	1.87	1.81	1.87	1.85	1.86	1.85
PE4 - 2 / 12.5M	1.73	1.76	1.74	1.77	1.75	1.75
Densidad (g/cm ³) - 28 días						
Muestra	R1	R2	R3	R4	R5	PROM
PEP - 3 / GC	1.72	1.69	1.68	1.72	1.71	1.70
PE1 - 3 / 5M	1.75	1.78	1.79	1.76	1.74	1.76
PE2 - 3 / 7.5M	1.82	1.85	1.86	1.83	1.80	1.83
PE3 - 3 / 10.0 M	1.86	1.89	1.87	1.90	1.85	1.87
PE4 - 3 / 12.5M	1.79	1.76	1.80	1.75	1.78	1.78

Datos de densidad de morteros obtenidos por geopolimerización de polvo de ladrillo

Densidad (g/cm ³) - 7 días						
Muestra	R1	R2	R3	R4	R5	PROM
MEP - 1 / GC	1.81	1.85	1.82	1.88	1.79	1.83
ME1 - 1 / 5M	1.96	2.05	1.99	1.97	1.95	1.98
ME2 - 1 / 7.5M	1.98	1.96	1.91	1.98	2.07	1.98
ME3 - 1 / 10.0 M	2.01	2.05	2.02	2.05	2.00	2.03
ME4 - 1 / 12.5M	1.80	1.83	1.85	1.81	1.79	1.82
Densidad (g/cm ³) - 14 días						
Muestra	R1	R2	R3	R4	R5	PROM
MEP - 2 / GC	1.88	1.97	1.75	1.74	1.89	1.85
ME1 - 2 / 5M	1.86	2.03	1.97	2.20	2.01	2.01
ME2 - 2 / 7.5M	2.01	1.98	2.00	1.99	2.03	2.00
ME3 - 2 / 10.0 M	2.38	2.04	1.87	1.94	2.10	2.07
ME4 - 2 / 12.5M	1.78	1.94	1.75	1.89	1.85	1.84
Densidad (g/cm ³) - 28 días						
Muestra	R1	R2	R3	R4	R5	PROM
MEP - 3 / GC	1.85	1.87	1.88	1.86	1.85	1.86
ME1 - 3 / 5M	2.03	2.05	2.06	2.04	2.02	2.04
ME2 - 3 / 7.5M	2.10	2.08	2.09	2.11	2.07	2.09
ME3 - 3 / 10.0 M	2.14	2.12	2.10	2.13	2.11	2.12
ME4 - 3 / 12.5M	1.87	1.86	1.84	1.88	1.85	1.86

Datos de porosidad de morteros obtenidos por geopolimerización de polvo de ladrillo

Porosidad (%) - 7 días						
Muestra	R1	R2	R3	R4	R5	PROM
MEP - 1 / GC	13.50	14.80	14.20	13.10	15.42	14.20
ME1 - 1 / 5M	10.37	11.75	10.50	10.12	12.24	11.00
ME2 - 1 / 7.5M	4.67	5.98	4.87	4.25	6.75	5.30
ME3 - 1 / 10.0 M	7.99	9.53	8.51	7.47	10.17	8.73
ME4 - 1 / 12.5M	14.21	15.34	14.80	14.11	16.22	14.94
Porosidad (%) - 14 días						
Muestra	R1	R2	R3	R4	R5	PROM
MEP - 2 / GC	14.24	14.57	13.32	12.31	14.26	13.74
ME1 - 2 / 5M	9.31	11.34	9.42	9.54	10.90	10.10
ME2 - 2 / 7.5M	4.30	5.70	4.80	4.00	6.20	5.00
ME3 - 2 / 10.0 M	6.50	7.90	7.00	6.20	8.50	7.22
ME4 - 2 / 12.5M	13.60	15.00	14.20	13.10	15.70	14.32
Porosidad (%) - 28 días						
Muestra	R1	R2	R3	R4	R5	PROM
MEP - 3 / GC	12.30	12.80	13.20	12.50	13.70	12.90
ME1 - 3 / 5M	10.30	9.00	9.90	10.80	8.80	9.76
ME2 - 3 / 7.5M	2.20	3.10	2.70	3.40	2.10	2.70
ME3 - 3 / 10.0 M	4.50	6.00	5.30	4.00	6.50	5.26
ME4 - 3 / 12.5M	13.20	14.50	13.70	14.80	13.00	13.84

Anexo 5: Evidencias de investigación

Residuos de construcción principalmente ladrillo



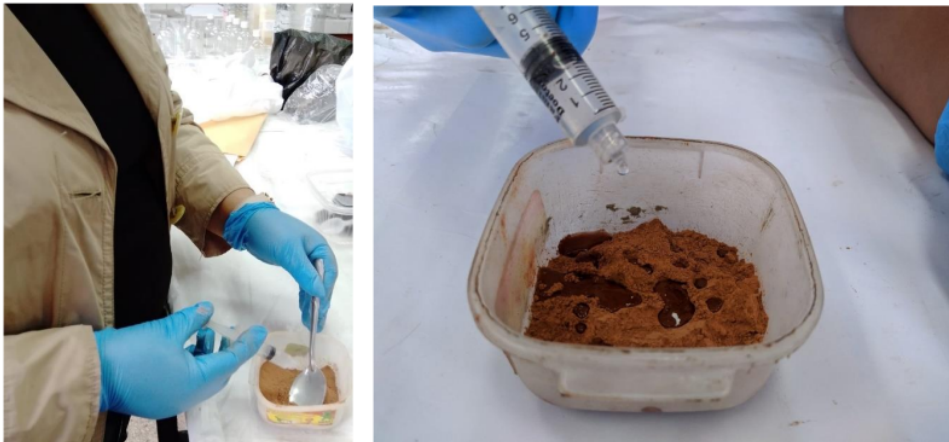
Tamizado por la malla N° 400 del polvo de ladrillo



Polvo de ladrillo



Geopolimerización con activador alcalino de solución de Na_2SiO_3



Amasado de geopolímeros



Colocación de aceite en el molde de pastas



Colocación de pastas en molde



Aplicación de prensa hidráulica a pastas



Desmolde de las pastas



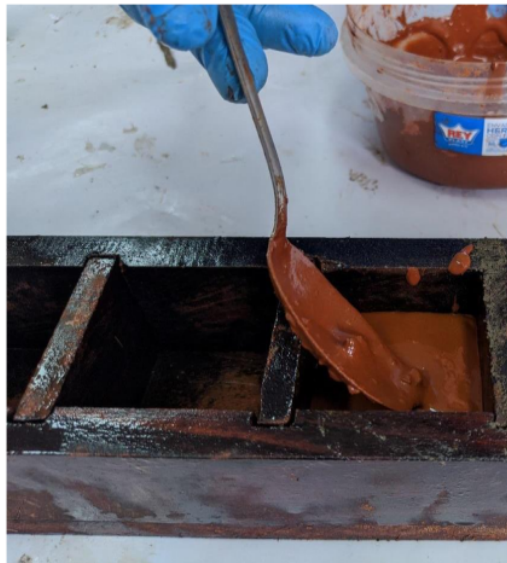
Medición de las dimensiones de las probetas de pastas con vernier



Colocación de aceite en el molde de morteros



Colocación de morteros en molde



Colocación de las probetas de pastas y morteros en el horno



Morteros de grupo experimental con Na_2SiO_3 5M



Morteros de grupo control con NaOH 8M



Morteros de grupo experimental con Na₂SiO₃ 5M



Morteros de grupo experimental con Na_2SiO_3 7.5M



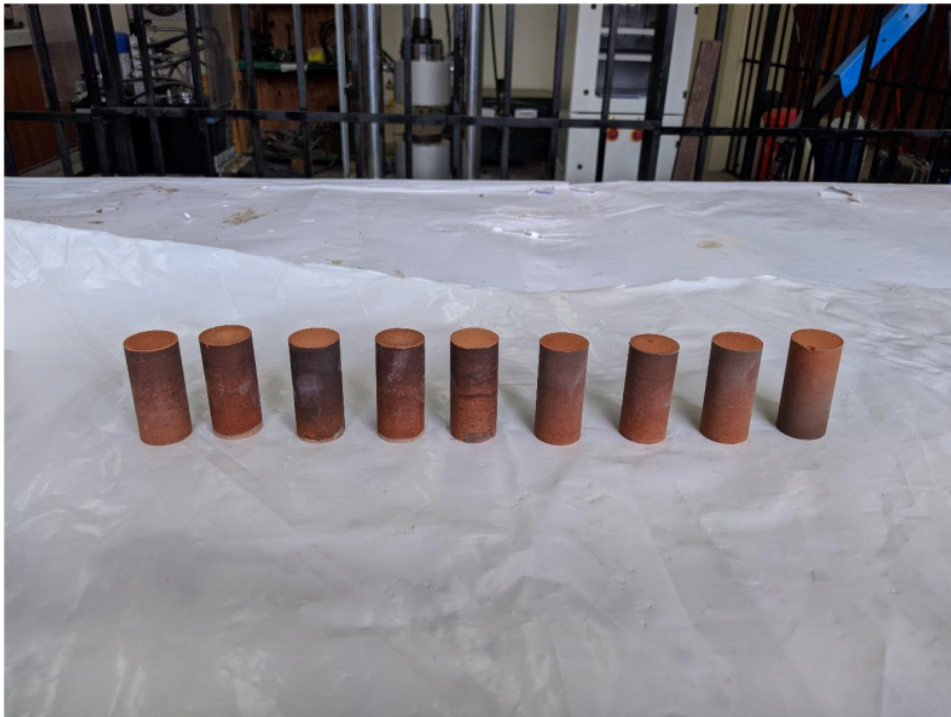
Morteros de grupo experimental con Na_2SiO_3 10.0 M



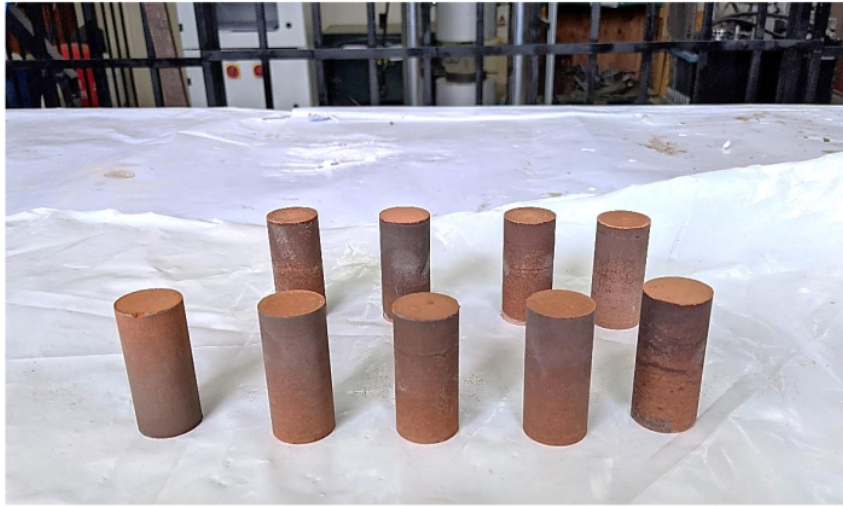
Morteros de grupo experimental con Na_2SiO_3 12.5M



Pastas de grupo control con NaOH 8M



Pastas de grupo experimental con Na_2SiO_3 5M



Pastas de grupo experimental con Na_2SiO_3 7.5M



Pastas de grupo experimental con Na_2SiO_3 10.0 M



Pastas de grupo experimental con Na_2SiO_3 12.5M



Base superior de pasta



Base inferior de pasta



Pasta obtenida por geopolimerización de polvo de ladrillo



Ensayo de compresión de pastas obtenidas por geopolimerización de polvo de ladrillo



Ensayo de compresión de pastas obtenidas por geopolimerización de polvo de ladrillo



Ensayo de compresión de pastas obtenidas por geopolimerización de polvo de ladrillo



Pastas obtenidas por geopolimerización de polvo de ladrillo luego de ensayo compresivo



Falla de pasta por ensayo de compresión



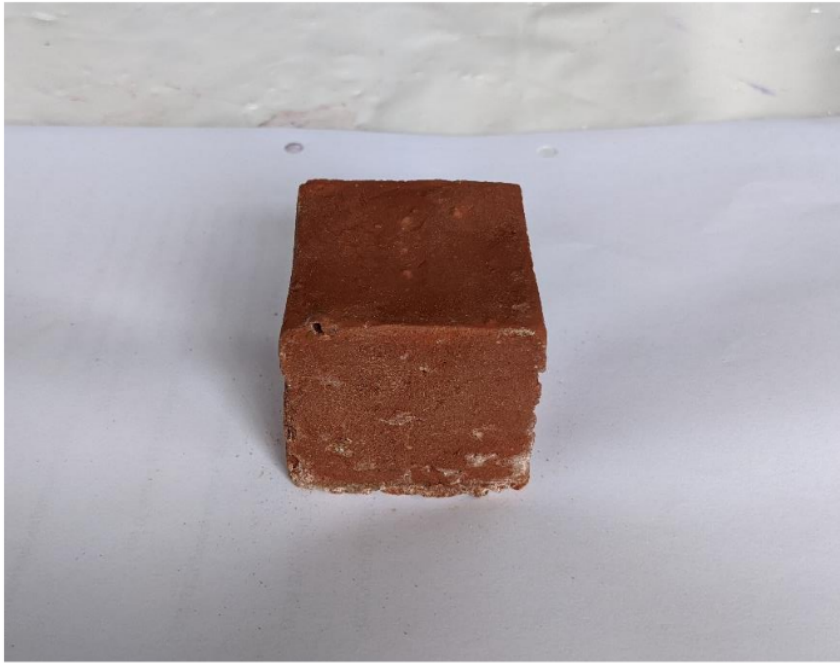
Base superior de mortero



Base inferior de mortero



Mortero obtenido por geopolimerización de polvo de ladrillo



Ensayo de compresión de pastas obtenidas por geopolimerización de polvo de ladrillo

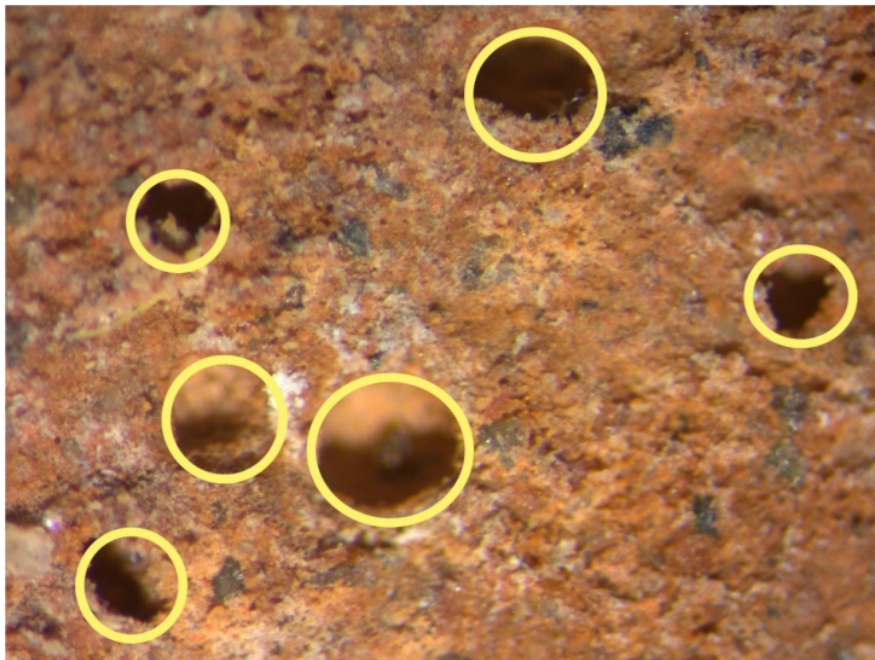




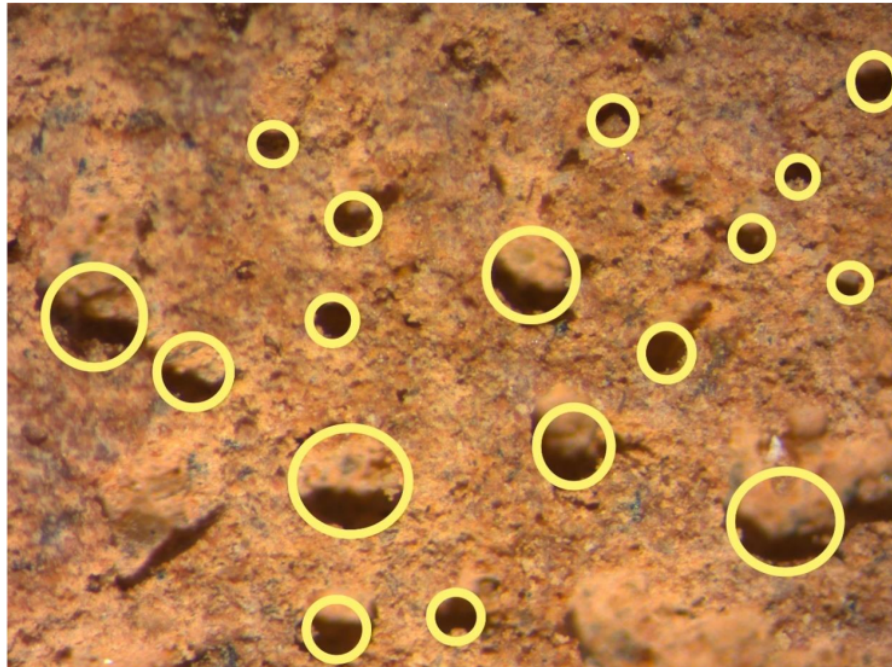
Falla de mortero por ensayo de compresión



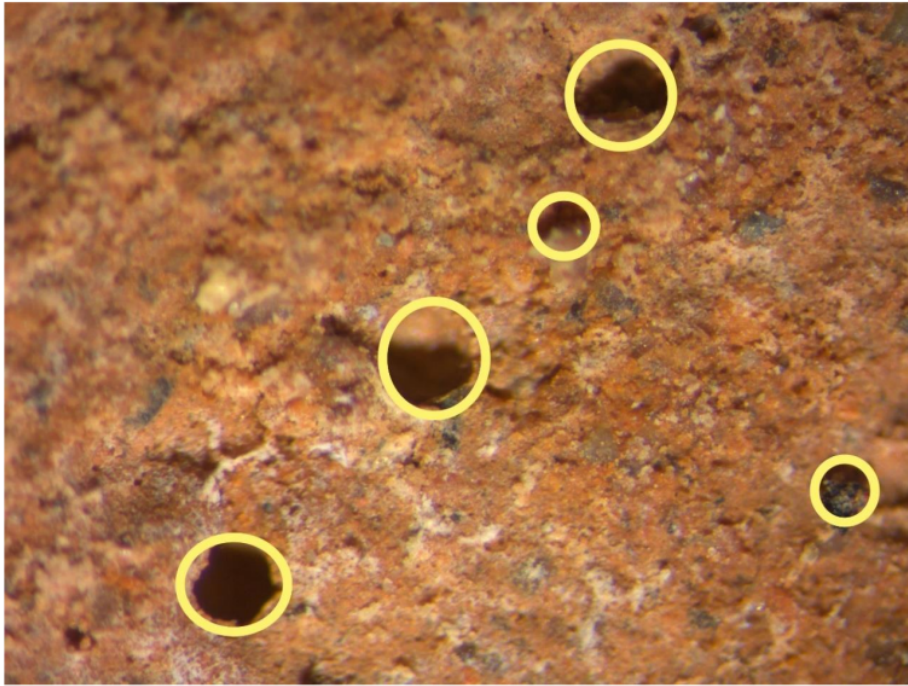
Porosidad de morteros de grupo control con NaOH 8M



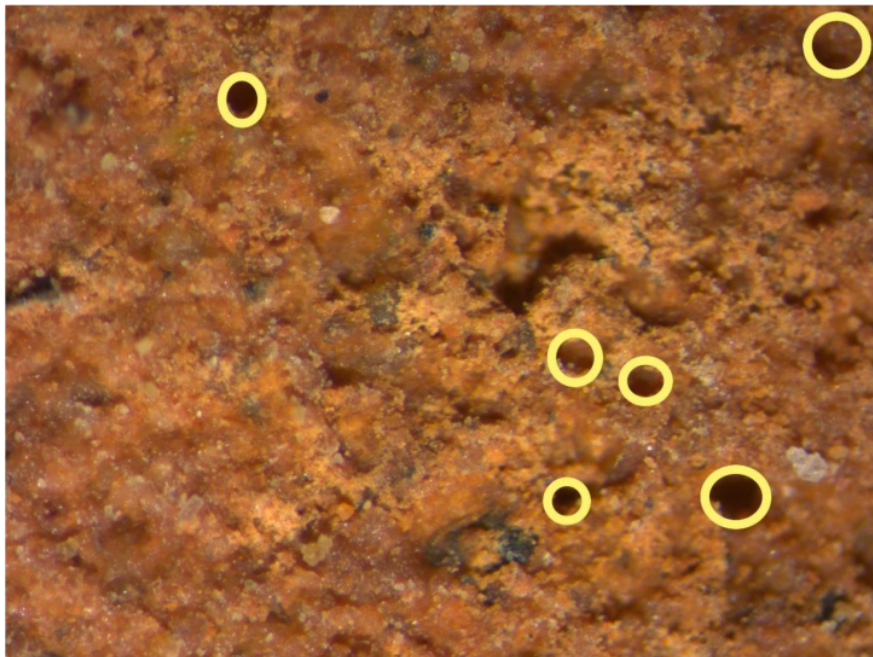
Porosidad de morteros de grupo experimental con Na₂SiO₃ 5M



Porosidad de morteros de grupo experimental con Na_2SiO_3 7.5M



Porosidad de morteros de grupo experimental con Na_2SiO_3 10.0 M



Porosidad de morteros de grupo experimental con Na_2SiO_3 12.5M



Porosidad de pastas de grupo control con NaOH 8M



Porosidad de pastas de grupo experimental con Na₂SiO₃ 5M



Porosidad de pastas de grupo experimental con Na₂SiO₃ 7.5M



Porosidad de pastas de grupo experimental con Na₂SiO₃ 10.0 M



Porosidad de pastas de grupo experimental con Na₂SiO₃ 12.5M



Anexo 6: Normas empleadas

Norma ASTM C109



Designation: C 109/C 109M – 08

Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens)¹

This standard is issued under the fixed designation C 109/C 109M; 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.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.

1. Scope*

1.1 This test method covers determination of the compressive strength of hydraulic cement mortars, using 2-in. or [50-mm] cube specimens.

NOTE 1—Test Method C 349 provides an alternative procedure for this determination (not to be used for acceptance tests).

1.2 This test method covers the application of the test using either inch-pound or SI units. The values stated in either SI units or inch-pound units are to be regarded separately as standard. Within the text, the SI units are shown in brackets. The values stated in each system may not be exact equivalents; therefore, each system shall be used independently of the other. Combining values from the two systems may result in nonconformance with the standard.

1.3 Values in SI units shall be obtained by measurement in SI units or by appropriate conversion, using the Rules for Conversion and Rounding given in Standard **IEEE/ASTM SI 10**, of measurements made in other units.

1.4 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use. (Warning—Fresh hydraulic cementitious mixtures are caustic and may cause chemical burns to skin and tissue upon prolonged exposure.)²*

2. Referenced Documents

2.1 *ASTM Standards*:³

C 91 Specification for Masonry Cement

C 114 Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement

C 150 Specification for Portland Cement

C 230/C 230M Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement

C 305 Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency

C 349 Test Method for Compressive Strength of Hydraulic-Cement Mortars (Using Portions of Prisms Broken in Flexure)

C 511 Specification for Mixing Rooms, Moist Cabinets, Moist Rooms, and Water Storage Tanks Used in the Testing of Hydraulic Cements and Concretes

C 595 Specification for Blended Hydraulic Cements

C 618 Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete

C 670 Practice for Preparing Precision and Bias Statements for Test Methods for Construction Materials

C 778 Specification for Standard Sand

C 989 Specification for Ground Granulated Blast-Furnace Slag for Use in Concrete and Mortars

C 1005 Specification for Reference Masses and Devices for Determining Mass and Volume for Use in the Physical Testing of Hydraulic Cements

C 1157 Performance Specification for Hydraulic Cement

C 1328 Specification for Plastic (Stucco) Cement

C 1329 Specification for Mortar Cement

C 1437 Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar

IEEE/ASTM SI 10 Standard for Use of the International System of Units (SI): The Modern Metric System

3. Summary of Test Method

3.1 The mortar used consists of 1 part cement and 2.75 parts of sand proportioned by mass. Portland or air-entraining portland cements are mixed at specified water/cement ratios. Water content for other cements is that sufficient to obtain a flow of 110 ± 5 in 25 drops of the flow table. Two-inch or [50-mm] test cubes are compacted by tamping in two layers.

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee C01 on Cement and is the direct responsibility of Subcommittee C01.27 on Strength.

Current edition approved Dec. 1, 2008. Published January 2009. Originally approved in 1934. Last previous edition approved in 2007 as C 109/C 109M – 07¹.

² See the section on Safety, Manual of Cement Testing, *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 04.01.

³ For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, www.astm.org, or contact ASTM Customer Service at service@astm.org. For *Annual Book of ASTM Standards* volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

*A Summary of Changes section appears at the end of this standard.

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

Copyright by ASTM Int'l (all rights reserved); Thu Apr 16 06:08:49 EDT 2009
Downloaded/printed by
Laurentian University pursuant to License Agreement. No further reproductions authorized.

The cubes are cured one day in the molds and stripped and immersed in lime water until tested.

4. Significance and Use

4.1 This test method provides a means of determining the compressive strength of hydraulic cement and other mortars and results may be used to determine compliance with specifications. Further, this test method is referenced by numerous other specifications and test methods. Caution must be exercised in using the results of this test method to predict the strength of concretes.

5. Apparatus

5.1 *Weights and Weighing Devices*, shall conform to the requirements of Specification C 1005. The weighing device shall be evaluated for precision and accuracy at a total load of 2000 g.

5.2 *Glass Graduates*, of suitable capacities (preferably large enough to measure the mixing water in a single operation) to deliver the indicated volume at 20 °C. The permissible variation shall be ±2 mL. These graduates shall be subdivided to at least 5 mL, except that the graduation lines may be omitted for the lowest 10 mL for a 250-mL graduate and for the lowest 25 mL of a 500-mL graduate. The main graduation lines shall be circles and shall be numbered. The least graduations shall extend at least one seventh of the way around, and intermediate graduations shall extend at least one fifth of the way around.

5.3 *Specimen Molds*, for the 2-in. or [50-mm] cube specimens shall be tight fitting. The molds shall have not more than three cube compartments and shall be separable into not more than two parts. The parts of the molds when assembled shall be positively held together. The molds shall be made of hard metal not attacked by the cement mortar. For new molds the Rockwell hardness number of the metal shall be not less than 55 HRB. The sides of the molds shall be sufficiently rigid to prevent spreading or warping. The interior faces of the molds shall be plane surfaces and shall conform to the tolerances of Table 1.

5.4 *Mixer, Bowl and Paddle*, an electrically driven mechanical mixer of the type equipped with paddle and mixing bowl, as specified in Practice C 305.

5.5 *Flow Table and Flow Mold*, conforming to the requirements of Specification C 230/C 230M.

5.6 *Tamper*, a nonabsorptive, nonabrasive, nonbrittle material such as a rubber compound having a Shore A durometer hardness of 80 ± 10 or seasoned oak wood rendered nonabsorptive by immersion for 15 min in paraffin at approximately 392 °F or [200 °C], shall have a cross section of about ½ by

1 in. or [13 by 25 mm] and a convenient length of about 5 to 6 in. or [120 to 150 mm]. The tamping face shall be flat and at right angles to the length of the tamper.

5.7 *Trowel*, having a steel blade 4 to 6 in. [100 to 150 mm] in length, with straight edges.

5.8 *Moist Cabinet or Room*, conforming to the requirements of Specification C 511.

5.9 *Testing Machine*, either the hydraulic or the screw type, with sufficient opening between the upper bearing surface and the lower bearing surface of the machine to permit the use of verifying apparatus. The load applied to the test specimen shall be indicated with an accuracy of ±1.0 %. If the load applied by the compression machine is registered on a dial, the dial shall be provided with a graduated scale that can be read to at least the nearest 0.1 % of the full scale load (Note 2). The dial shall be readable within 1 % of the indicated load at any given load level within the loading range. In no case shall the loading range of a dial be considered to include loads below the value that is 100 times the smallest change of load that can be read on the scale. The scale shall be provided with a graduation line equal to zero and so numbered. The dial pointer shall be of sufficient length to reach the graduation marks; the width of the end of the pointer shall not exceed the clear distance between the smallest graduations. Each dial shall be equipped with a zero adjustment that is easily accessible from the outside of the dial case, and with a suitable device that at all times until reset, will indicate to within 1 % accuracy the maximum load applied to the specimen.

5.9.1 If the testing machine load is indicated in digital form, the numerical display must be large enough to be easily read. The numerical increment must be equal to or less than 0.10 % of the full scale load of a given loading range. In no case shall the verified loading range include loads less than the minimum numerical increment multiplied by 100. The accuracy of the indicated load must be within 1.0 % for any value displayed within the verified loading range. Provision must be made for adjusting to indicate true zero at zero load. There shall be provided a maximum load indicator that at all times until reset will indicate within 1 % system accuracy the maximum load applied to the specimen.

NOTE 2—As close as can be read is considered ½ in. or [0.5 mm] along the arc described by the end of the pointer. Also, one half of the scale interval is about as close as can reasonably be read when the spacing on the load indicating mechanism is between ½ in. or [1 mm] and ¼ in. or [1.6 mm]. When the spacing is between ¼ in. or [1.6 mm] and ⅛ in. or [3.2 mm], one third of the scale interval can be read with reasonable certainty. When the spacing is ⅛ in. or [3.2 mm] or more, one fourth of the scale interval can be read with reasonable certainty.

TABLE 1 Permissible Variations of Specimen Molds

Parameter	2-in. Cube Molds		[50-mm] Cube Molds	
	New	In Use	New	In Use
Planeness of sides	<0.001 in.	<0.002 in.	<0.025 mm]	<0.05 mm]
Distance between opposite sides	2 in. ± 0.005	2 in. ± 0.02	[50 mm ± 0.13 mm]	[50 mm ± 0.50 mm]
Height of each compartment	2 in. + 0.01 in. to - 0.005 in.	2 in. + 0.01 in. to - 0.015 in.	[50 mm + 0.25 mm to - 0.13 mm]	[50 mm + 0.25 mm to - 0.38 mm]
Angle between adjacent faces ^A	90 ± 0.5°	90 ± 0.5°	90 ± 0.5°	90 ± 0.5°

^A Measured at points slightly removed from the intersection. Measured separately for each compartment between all the interior faces and the adjacent face and between interior faces and top and bottom planes of the mold.

5.9.2 The upper bearing shall be a spherically seated, hardened metal block firmly attached at the center of the upper head of the machine. The center of the sphere shall lie at the center of the surface of the block in contact with the specimen. The block shall be closely held in its spherical seat, but shall be free to tilt in any direction. A hardened metal bearing block shall be used beneath the specimen to minimize wear of the lower platen of the machine. To facilitate accurate centering of the test specimen in the compression machine, one of the two surfaces of the bearing blocks shall have a diameter or diagonal of between 2.83 in. [70.7 mm] (See [Note 3](#)) and 2.9 in. [73.7 mm]. When the upper block bearing surface meets this requirement, the lower block bearing surface shall be greater than 2.83 in. [70.7 mm]. When the lower block bearing surface meets this requirement, the diameter or diagonal of upper block bearing surface shall be between 2.83 and 3 $\frac{1}{8}$ in. [70.7 and 79.4 mm]. When the lower block is the only block with a diameter or diagonal between 2.83 and 2.9 in. [70.7 and 73.7 mm], the lower block shall be used to center the test specimen. In that case, the lower block shall be centered with respect to the upper bearing block and held in position by suitable means. The bearing block surfaces intended for contact with the specimen shall have a Rockwell hardness number not less than 60 HRC. These surfaces shall not depart from plane surfaces by more than 0.0005 in. [0.013 mm] when the blocks are new and shall be maintained within a permissible variation of 0.001 in. or [0.025 mm].

NOTE 3—The diagonal of a 2 in. [50 mm] cube is 2.83 in. [70.7 mm].

6. Materials

6.1 Graded Standard Sand:

6.1.1 The sand ([Note 4](#)) used for making test specimens shall be natural silica sand conforming to the requirements for graded standard sand in Specification [C 778](#).

NOTE 4—*Segregation of Graded Sand*—The graded standard sand should be handled in such a manner as to prevent segregation, since variations in the grading of the sand cause variations in the consistency of the mortar. In emptying bins or sacks, care should be exercised to prevent the formation of mounds of sand or craters in the sand, down the slopes of which the coarser particles will roll. Bins should be of sufficient size to permit these precautions. Devices for drawing the sand from bins by gravity should not be used.

7. Temperature and Humidity

7.1 *Temperature*—The temperature of the air in the vicinity of the mixing slab, the dry materials, molds, base plates, and mixing bowl, shall be maintained between 73.5 \pm 5.5 °F or [23.0 \pm 3.0 °C]. The temperature of the mixing water, moist closet or moist room, and water in the storage tank shall be set at 73.5 \pm 3.5 °F or [23 \pm 2 °C].

7.2 *Humidity*—The relative humidity of the laboratory shall be not less than 50 %. The moist closet or moist room shall conform to the requirements of Specification [C 511](#).

8. Test Specimens

8.1 Make two or three specimens from a batch of mortar for each period of test or test age.

9. Preparation of Specimen Molds

9.1 Apply a thin coating of release agent to the interior faces of the mold and non-absorptive base plates. Apply oils and greases using an impregnated cloth or other suitable means. Wipe the mold faces and the base plate with a cloth as necessary to remove any excess release agent and to achieve a thin, even coating on the interior surfaces. When using an aerosol lubricant, spray the release agent directly onto the mold faces and base plate from a distance of 6 to 8 in. or [150 to 200 mm] to achieve complete coverage. After spraying, wipe the surface with a cloth as necessary to remove any excess aerosol lubricant. The residue coating should be just sufficient to allow a distinct finger print to remain following light finger pressure ([Note 5](#)).

9.2 Seal the surfaces where the halves of the mold join by applying a coating of light cup grease such as petrolatum. The amount should be sufficient to extrude slightly when the two halves are tightened together. Remove any excess grease with a cloth.

9.3 Seal molds to their base plates with a watertight sealant. Use microcrystalline wax or a mixture of three parts paraffin to five parts rosin by mass. Paraffin wax is permitted as a sealant with molds that clamp to the base plate. Liquefy the wax by heating it to a temperature of between 230 and 248 °F or [110 and 120 °C]. Effect a watertight seal by applying the liquefied sealant at the outside contact lines between the mold and its base plate ([Note 6](#)).

9.4 Optionally, a watertight sealant of petroleum jelly is permitted for clamped molds. Apply a small amount of petroleum jelly to the entire surface of the face of the mold that will be contacting the base plate. Clamp the mold to the base plate and wipe any excess sealant from the interior of the mold and base plate.

NOTE 5—Because aerosol lubricants evaporate, molds should be checked for a sufficient coating of lubricant immediately prior to use. If an extended period of time has elapsed since treatment, retreatment may be necessary.

NOTE 6—*Watertight Molds*—The mixture of paraffin and rosin specified for sealing the joints between molds and base plates may be found difficult to remove when molds are being cleaned. Use of straight paraffin is permissible if a watertight joint is secured, but due to the low strength of paraffin it should be used only when the mold is not held to the base plate by the paraffin alone. When securing clamped molds with paraffin, an improved seal can be obtained by slightly warming the mold and base plate prior to applying the wax. Molds so treated should be allowed to return to room temperature before use.

10. Procedure

10.1 Composition of Mortars:

10.1.1 The proportions of materials for the standard mortar shall be one part of cement to 2.75 parts of graded standard sand by weight. Use a water-cement ratio of 0.485 for all portland cements and 0.460 for all air-entraining portland cements. The amount of mixing water for other than portland and air-entraining portland cements shall be such as to produce a flow of 110 \pm 5 as determined in accordance with [10.3](#) and shall be expressed as weight percent of cement.

10.1.2 The quantities of materials to be mixed at one time in the batch of mortar for making six and nine test specimens shall be as follows:

	Number of Specimens	
	6	9
Cement, g	500	740
Sand, g	1375	2035
Water, mL		
Portland (0.485)	242	359
Air-entraining portland (0.460)	230	340
Other (to flow of 110 ± 5)

10.2 Preparation of Mortar:

10.2.1 Mechanically mix in accordance with the procedure given in Practice C 305.

10.3 Determination of Flow:

10.3.1 Determine flow in accordance with procedure given in Test Method C 1437.

10.3.2 For portland and air-entraining portland cements, merely record the flow.

10.3.3 In the case of cements other than portland or air-entraining portland cements, make trial mortars with varying percentages of water until the specified flow is obtained. Make each trial with fresh mortar.

10.3.4 Immediately following completion of the flow test, return the mortar from the flow table to the mixing bowl. Quickly scrape the bowl sides and transfer into the batch the mortar that may have collected on the side of the bowl and then remix the entire batch 15 s at medium speed. Upon completion of mixing, the mixing paddle shall be shaken to remove excess mortar into the mixing bowl.

10.3.5 When a duplicate batch is to be made immediately for additional specimens, the flow test may be omitted and the mortar allowed to stand in the mixing bowl 90 s without covering. During the last 15 s of this interval, quickly scrape the bowl sides and transfer into the batch the mortar that may have collected on the side of the bowl. Then remix for 15 s at medium speed.

10.4 Molding Test Specimens:

10.4.1 Complete the consolidation of the mortar in the molds either by hand tamping or by a qualified alternative method. Alternative methods include but are not limited to the use of a vibrating table or mechanical devices.

10.4.2 Hand Tamping—Start molding the specimens within a total elapsed time of not more than 2 min and 30 s after completion of the original mixing of the mortar batch. Place a layer of mortar about 1 in. or [25 mm] (approximately one half of the depth of the mold) in all of the cube compartments. Tamp the mortar in each cube compartment 32 times in about 10 s in 4 rounds, each round to be at right angles to the other and consisting of eight adjoining strokes over the surface of the specimen, as illustrated in Fig. 1. The tamping pressure shall be just sufficient to ensure uniform filling of the molds. The 4 rounds of tamping (32 strokes) of the mortar shall be completed in one cube before going to the next. When the tamping of the first layer in all of the cube compartments is completed, fill the compartments with the remaining mortar and then tamp as specified for the first layer. During tamping of the second layer, bring in the mortar forced out onto the tops of the molds after each round of tamping by means of the gloved fingers and

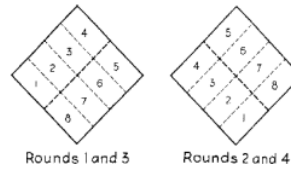


FIG. 1 Order of Tamping in Molding of Test Specimens

the tamper upon completion of each round and before starting the next round of tamping. On completion of the tamping, the tops of all cubes should extend slightly above the tops of the molds. Bring in the mortar that has been forced out onto the tops of the molds with a trowel and smooth off the cubes by drawing the flat side of the trowel (with the leading edge slightly raised) once across the top of each cube at right angles to the length of the mold. Then, for the purpose of leveling the mortar and making the mortar that protrudes above the top of the mold of more uniform thickness, draw the flat side of the trowel (with the leading edge slightly raised) lightly once along the length of the mold. Cut off the mortar to a plane surface flush with the top of the mold by drawing the straight edge of the trowel (held nearly perpendicular to the mold) with a sawing motion over the length of the mold.

10.4.3 Alternative Methods—Any consolidation method may be used that meets the qualification requirements of this section. The consolidation method consists of a specific procedure, equipment and consolidation device, as selected and used in a consistent manner by a specific laboratory. The mortar batch size of the method may be modified to accommodate the apparatus, provided the proportions maintain the same ratios as given in 10.1.2.

10.4.3.1 Separate qualifications are required for the following classifications:

Class A, Non-air entrained cements—for use in concrete, such as sold under Specifications C 150, C 595, and C 1157.

Class B, Air-entrained cements—for use in concrete, such as sold under Specifications C 150, C 595, and C 1157.

Class C, Masonry, Mortar and Stucco Cements—such as sold under Specifications C 91, C 1328, and C 1329.

10.4.3.2 An alternative method may only be used to test the cement types as given in 10.4.3.1 above, for which it has been qualified.

10.4.3.3 It can also be used for Strength Activity Index determinations for fly ash and slag, such as sold under Specifications C 618 and C 989, provided the alternative method has qualified for both Class A and Class C cements.

10.4.4 Qualification Procedure—Contact CCRL to purchase cement samples that have been used in the Proficiency Sample Program (PSP). Four samples (5 Kg each) of the class to be qualified will be required to complete a single qualification (See Note 7).

10.4.4.1 In one day, prepare replicate 6-cube or 9-cube batches using one of the cements and cast a minimum of 36 cubes. Complete one round of tests on each cement on different days. Store and test all specimens as prescribed in the sections below. Test all cubes at the age of 7-days.

10.4.4.2 Tabulate the compressive strength data and complete the mathematical analyses as instructed in Annex A1.

10.4.5 *Requalification of the Alternate Compaction Method:*

10.4.5.1 Requalification of the method shall be required if any of the following occur:

(1) Evidence that the method may not be providing data in accordance with the requirements of Table 2.

(2) Results that differ from the reported final average of a CCRL-PSP sample with a rating of 3 or less.

(3) Results that differ from the accepted value of a known reference sample with established strength values by more than twice the multi-laboratory 1s % values of Table 2.

Before starting the requalification procedure, evaluate all aspects of cube fabrication and testing process to determine if the offending result is due to some systematic error or just an occasional random event.

10.4.5.2 If the compaction equipment is replaced, significantly modified, repaired, or has been recalibrated, requalify the equipment in accordance with 10.4.4.

NOTE 7—It is recommended that a large homogenous sample of cement be prepared at the time of qualification for use as a secondary standard and for method evaluation. Frequent testing of this sample will give early warning of any changes in the performance of the apparatus.

10.5 *Storage of Test Specimens*—Immediately upon completion of molding, place the test specimens in the moist closet or moist room. Keep all test specimens, immediately after molding, in the molds on the base plates in the moist closet or moist room from 20 to 72 h with their upper surfaces exposed to the moist air but protected from dripping water. If

the specimens are removed from the molds before 24 h, keep them on the shelves of the moist closet or moist room until they are 24-h old, and then immerse the specimens, except those for the 24-h test, in saturated lime water in storage tanks constructed of noncorroding materials. Keep the storage water clean by changing as required.

10.6 *Determination of Compressive Strength:*

10.6.1 Test the specimens immediately after their removal from the moist closet in the case of 24-h specimens, and from storage water in the case of all other specimens. All test specimens for a given test age shall be broken within the permissible tolerance prescribed as follows:

Test Age	Permissible Tolerance
24 h	±½ h
3 days	±1 h
7 days	±3 h
28 days	±12 h

If more than one specimen at a time is removed from the moist closet for the 24-h tests, keep these specimens covered with a damp cloth until time of testing. If more than one specimen at a time is removed from the storage water for testing, keep these specimens in water at a temperature of 73.5 ± 3.5 °F or [23 ± 2 °C] and of sufficient depth to completely immerse each specimen until time of testing.

10.6.2 Wipe each specimen to a surface-dry condition, and remove any loose sand grains or incrustations from the faces that will be in contact with the bearing blocks of the testing machine. Check these faces by applying a straightedge (NOTE 8). If there is appreciable curvature, grind the face or faces to plane surfaces or discard the specimen. A periodic check of the cross-sectional area of the specimens should be made.

NOTE 8—*Specimen Faces*—Results much lower than the true strength will be obtained by loading faces of the cube specimen that are not truly plane surfaces. Therefore, it is essential that specimen molds be kept scrupulously clean, as otherwise, large irregularities in the surfaces will occur. Instruments for cleaning molds should always be softer than the metal in the molds to prevent wear. In case grinding specimen faces is necessary, it can be accomplished best by rubbing the specimen on a sheet of fine emery paper or cloth glued to a plane surface, using only a moderate pressure. Such grinding is tedious for more than a few thousandths of an inch (hundredths of a millimetre); where more than this is found necessary, it is recommended that the specimen be discarded.

10.6.3 Apply the load to specimen faces that were in contact with the true plane surfaces of the mold. Carefully place the specimen in the testing machine below the center of the upper bearing block. Prior to the testing of each cube, it shall be ascertained that the spherically seated block is free to tilt. Use no cushioning or bedding materials. Bring the spherically seated block into uniform contact with the surface of the specimen. Apply the load rate at a relative rate of movement between the upper and lower platens corresponding to a loading on the specimen with the range of 200 to 400 lbs/s [900 to 1800 N/s]. Obtain this designated rate of movement of the platen during the first half of the anticipated maximum load and make no adjustment in the rate of movement of the platen in the latter half of the loading especially while the cube is yielding before failure.

NOTE 9—It is advisable to apply only a very light coating of a good quality, light mineral oil to the spherical seat of the upper platen.

TABLE 2 Precision

	Test Age, Days	Coefficient of Variation, 1s % ^A	Acceptable Range of Test Results d2s % ^A
Portland Cements			
Constant water-cement ratio:			
Single-lab	3	4.0	11.3
	7	3.6	10.2
Av	3	3.8	10.7
	7	3.8	10.7
Multi-lab	3	6.8	19.2
	7	6.4	18.1
Av	3	6.6	18.7
	7	6.6	18.7
Blended Cements			
Constant flow mortar:			
Single-lab	3	4.0	11.3
	7	3.8	10.7
Av	28	3.4	9.6
	28	3.8	10.7
Multi-lab	3	7.8	22.1
	7	7.6	21.5
Av	28	7.4	20.9
	28	7.6	21.5
Masonry Cements			
Constant flow mortar:			
Single-lab	7	7.9	22.3
	28	7.5	21.2
Av	7	7.7	21.8
	28	7.7	21.8
Multi-lab	7	11.8	33.4
	28	12.0	33.9
Av	7	11.9	33.7
	28	11.9	33.7

^A These numbers represent, respectively, the (1s %) and (d2s %) limits as described in Practice C 670.

11. Calculation

11.1 Record the total maximum load indicated by the testing machine, and calculate the compressive strength as follows:

$$f_m = P/A \tag{1}$$

where:

- f_m = compressive strength in psi or [MPa],
- P = total maximum load in lbf or [N], and
- A = area of loaded surface in² or [mm²].

Either 2-in. or [50-mm] cube specimens may be used for the determination of compressive strength, whether inch-pound or SI units are used. However, consistent units for load and area must be used to calculate strength in the units selected. If the cross-sectional area of a specimen varies more than 1.5 % from the nominal, use the actual area for the calculation of the compressive strength. The compressive strength of all acceptable test specimens (see Section 12) made from the same sample and tested at the same period shall be averaged and reported to the nearest 10 psi [0.1 MPa].

12. Report

12.1 Report the flow to the nearest 1 % and the water used to the nearest 0.1 %. Average compressive strength of all specimens from the same sample shall be reported to the nearest 10 psi [0.1 MPa].

13. Faulty Specimens and Retests

13.1 In determining the compressive strength, do not consider specimens that are manifestly faulty.

13.2 The maximum permissible range between specimens from the same mortar batch, at the same test age is 8.7 % of the average when three cubes represent a test age and 7.6 % when two cubes represent a test age (Note 10).

NOTE 10—The probability of exceeding these ranges is 1 in 100 when the within-batch coefficient of variation is 2.1 %. The 2.1 % is an average for laboratories participating in the portland cement and masonry cement

reference sample programs of the Cement and Concrete Reference Laboratory.

13.3 If the range of three specimens exceeds the maximum in 13.2, discard the result which differs most from the average and check the range of the remaining two specimens. Make a retest of the sample if less than two specimens remain after disregarding faulty specimens or disregarding tests that fail to comply with the maximum permissible range of two specimens.

NOTE 11—Reliable strength results depend upon careful observance of all of the specified requirements and procedures. Erratic results at a given test period indicate that some of the requirements and procedures have not been carefully observed; for example, those covering the testing of the specimens as prescribed in 10.6.2 and 10.6.3. Improper centering of specimens resulting in oblique fractures or lateral movement of one of the heads of the testing machine during loading will cause lower strength results.

14. Precision and Bias

14.1 *Precision*—The precision statements for this test method are listed in Table 2 and are based on results from the Cement and Concrete Reference Laboratory Reference Sample Program. They are developed from data where a test result is the average of compressive strength tests of three cubes molded from a single batch of mortar and tested at the same age. A significant change in precision will not be noted when a test result is the average of two cubes rather than three.

14.2 These precision statements are applicable to mortars made with cements mixed, and tested at the ages as noted. The appropriate limits are likely, somewhat larger for tests at younger ages and slightly smaller for tests at older ages.

14.3 *Bias*—The procedure in this test method has no bias because the value of compressive strength is defined in terms of the test method.

15. Keywords

15.1 compressive strength; hydraulic cement mortar; hydraulic cement strength; mortar strength; strength

ANNEX

(Mandatory Information)

A1. ANALYSES OF TEST RESULTS FOR QUALIFICATION OF ALTERNATE COMPACTION METHODS

A1.1 *Calculation of Average Within-Batch Standard Deviation and Elimination of Outliers*—Tabulate the results for each cement sample (or round) in separate spreadsheets. In the spreadsheet, list results of each batch in columns and complete the calculations as shown in Table A1.1.

A1.1.1 Eliminate any outliers from the test data and repeat the calculations until none of the values lie outside the normal range.

A1.1.2 Tabulate the cube strengths with all the outliers eliminated and complete the calculations as shown in Table A1.2.

A1.2 *Summary of Results*—Compile the results of the four

rounds and complete the calculations as shown in Table A1.3. The number of outliers shall not exceed 5 % of the total number of tests when rounded to the nearest whole number (for example, 4 rounds × 4 batches × 9 cubes = 144 tests × (5%/100) = 7.2 or 7).

A1.3 *Precision Qualification*—Calculate the relative within batch error (RWBE %) as shown in Table A1.3. This value must be less than 2.1 % to comply with the limit established in Note 10 of this specification.

A1.4 *Bias Qualification*—The test results compiled in Table A1.3 are evaluated against three limits to demonstrate an acceptable qualification. The limits have been established

TABLE A1.1 Example Using 9 Cube Batch

Round – 2					
CCRL Sample # 140		Industry Average Strength, $X_i = 32.923$			
Cast Date – 00/00/00					
7-Day Strengths, MPa					
A	B	C	D	E	
Batch No.	1	2	3	4	
Cube 1	33.0	34.3	34.4	33.2	
Cube 2	33.9	32.5	34.0	34.0	
Cube 3	33.4	34.0	34.1	33.8	
Cube 4	33.1	33.8	34.0	33.8	
Cube 5	33.0	33.4	34.2	34.0	
Cube 6	32.8	33.7	31.8	33.1	
Cube 7	33.6	32.6	33.9	32.8	
Cube 8	31.5	32.1	33.0	33.3	
Cube 9	33.6	34.3	33.4	34.4	
Average, X_b	33.10	33.42	33.65	33.60	
SD_b	0.70	0.82	0.81	0.52	
N_b	9	9	9	9	
$(N_b - 1)SD_b^2$	3.936	5.432	5.265	2.145	
			N_i	36	
			X_i	33.44	
			SD_i	0.692	
			MND	1.703	
Normal Range					
Max	34.81	35.12	35.35	35.30	
Min	31.40	31.71	32.95	31.89	
Outliers	None	None	Cube 6	None	

where:
 X_i = industry average strength (CCRL),
 X_b = average of tests values in a single batch,
 SD_b = standard deviation of a single batch = $\sqrt{\frac{\sum_{batch} (X - X_b)^2}{N_b - 1}}$
 N_b = number of tests per batch,
 $(N_b - 1)SD_b^2$ = an intermediate calculation,
 N_i = total number of tests per round,
 X_i = grand average of tests values obtained per round, MPa,
 SD_i = mean standard deviation of round = $\sqrt{\frac{\sum_{batch} [(N_b - 1)SD_b^2]}{N_i - 1}}$
MND = maximum normal deviation: use Excel® function “=norminv(1-0.25/N_i,0,SD_i)” or equivalent, or use statistical tables to find the inverse integrated normal distribution for an integral value of (1-0.25/n_i) in a normal distribution with $\sigma = SD_i$.

Normal Range:
Maximum = ($X_b + MND$).
Minimum = ($X_b - MND$).
Outlier = any test value falling outside the calculated normal range.

statistically from analyses of historical CCRL data and are given in Table A1.4.

A1.5 Rationale for the Limits Given in A1.4:

A1.5.1 The multi-laboratory precision (1s%) for the average of n batches is given by:

$$s\%_{ML,n} = \sqrt{s\%_{ML}^2 - \left(1 - \frac{1}{n}\right) s\%_{SO}^2}$$

A1.5.2 The limit for deviation of the individual rounds (no failures being allowed when 4 rounds are performed) is 1.2 s%_{ML,n}, as used in Test Methods C 114.

A1.5.3 The multi-laboratory precision (1s%) for the mean of 4 rounds is 0.5 s%_{ML,n}.

TABLE A1.2 Test Data After the Elimination of Outliers (Example Using 9 Cube Batch)

Round – 2					
CCRL Sample # 140		Industry Average Strength, $X_i = 32.923$			
Cast Date – 00/00/00					
7-Day Strengths, MPa					
A	B	C	D	E	
Batch No.	1	2	3	4	
Cube 1	33.0	34.3	34.4	33.2	
Cube 2	33.9	32.5	34.0	34.0	
Cube 3	33.4	34.0	34.1	33.8	
Cube 4	33.1	33.8	34.0	33.8	
Cube 5	33.0	33.4	34.2	34.0	
Cube 6	32.8	33.7	31.8	33.1	
Cube 7	33.6	32.6	33.9	32.8	
Cube 8	31.5	32.1	33.0	33.3	
Cube 9	33.6	34.3	33.4	34.4	
Average, X_{bv}	33.29	33.42	33.89	33.60	
SD_{bv}	0.39	0.82	0.46	0.52	
N_{bv}	8	9	8	9	
$(N_{bv} - 1)SD_{bv}^2$	1.092	5.348	1.462	2.159	
			N_{iv}	34	
			X_{iv}	33.55	
			SD_{iv}	0.55	
			E_r , MPa	0.63	
			RE_r , %	1.91	

where:
 X_{bv} = average of valid test values obtained per batch, MPa,
 X_i = industry average strength (CCRL), MPa,
 SD_{bv} = $\sqrt{\frac{\sum_{valid} (X - X_{bv})^2}{N_{bv} - 1}}$
 N_{bv} = number of valid tests per batch,
 $(N_{bv} - 1)SD_{bv}^2$ = an intermediate calculation,
 N_{iv} = total number of valid tests of the round,
 X_{iv} = grand average of valid tests for the round, MPa,
 SD_{iv} = mean standard deviation of the round = $\sqrt{\frac{\sum_{batch} [(N_{bv} - 1)SD_{bv}^2]}{N_{iv} - 1}}$
 E_r = error = ($X_i - X_{iv}$), MPa, and
 RE_r = relative error for the round, % = 100(E_r/X_{iv}).

A1.5.4 The limit for deviation of the mean of 4 rounds (95 % confidence) is 1.96 times this, or 0.98 s%_{ML,n}.

A1.5.5 The values for s%_{ML} and s%_{SO} for Cement Classes A and C (non-air-entrained cements for concrete and cements for mortar respectively) are the 7-day values in the current precision statement of Test Method C 109/C 109M. There appears to be no data for Cement Class B (air-entrained cements for concrete). Working on the assumption that the value of this quantity is related to the air content, the values adopted for Class B are the mean of the A- and C-values.

A1.5.6 For the applicable conditions, the equations above give the following:

Derivation of Limits for Table A1.4	A	B	C	A	B	C
Cement Class						
Batches per Round (n)	6	6	6	4	4	4
Single Operator s% (single batch)	3.6	5.75	7.9	3.6	5.75	7.9
Multi-Laboratory s% (single batch)	6.4	9.1	11.8	6.4	9.1	11.8
Multi-Laboratory s% (n batches)	5.5	7.4	9.3	5.6	7.6	9.6
Limit for deviation of a single round %	6.6	8.9	11.2	6.7	9.1	11.5
Limit for deviation of mean of four rounds %	5.4	7.3	9.2	5.5	7.5	9.4


 **C 109/C 109M – 08**

TABLE A1.3 Summary of Results

A	B	C	D	E	F	G	H	I
	CCRL #	Day	X_i MPa	X_{iv} MPa	RE_i %	N_{iv}	SD_{iv}	$(N_i-1)SD_i^2$
Round 1	139	1	28.47	30.42	6.85	36	0.97	32.93
Round 2	140	2	32.92	33.55	1.91	34	0.55	9.98
Round 3	141	3	32.64	33.14	1.53	34	0.47	7.29
Round 4	142	4	32.24	33.01	2.39	36	0.51	9.10
							Max, RE_i , %	6.85
							Mean, RE_i , %	3.17
							GMWBE, MPa	0.65
							RWBE, %	2.01
							Max RWBE, % ^a	2.1
							Precision Test	Pass

where:

- X_i = industry average strength, MPa,
- X_{iv} = grand mean value of the valid tests of a round,
- RE_i , % = relative error = $100(X_i - X_{iv})$,
- N_{iv} = total number of valid tests of the round,
- SD_{iv} = mean standard deviation of a round = $\sqrt{\frac{\sum_{batch} [(N_{iv} - 1)SD_{iv}^2]}{N_{iv} - 1}}$
- $(N_i-1)SD_i^2$ = intermediate calculation,
- X_g = grand mean value of all valid tests (4 rounds),
- N_g = total number of valid tests in 4 rounds,
- GMWBE = grand mean within-batch error, MPa = $\sqrt{\frac{\sum_{round} [(N_{iv} - 1)SD_{iv}^2]}{N_g - 1}}$
- RWBE = relative within batch error, % = $100(GMWBE / X_g)$, and
- Max RWBE = maximum allowed RWBE = 2.10 % (See Note 10).

^a See Note 9.

TABLE A1.4 Bias Qualification Requirements

	6 Cube Batches (Min 6 Batches per Round)			9 Cube Batches (Min 4 Batches per Round)		
	A	B	C	A	B	C
Cement Classification (see 10.4.3.1)						
Max allowable relative error any 4 or 6 batches, MAREr %	6.6	8.9	11.2	6.7	9.1	11.5
Max allowable relative error mean of 4 rounds of 4 or 6 batches ~5 % failures, GRE%	5.4	7.3	9.2	5.5	7.5	9.4
Minimum allowable confidence limit, % MACL %	95	95	95	95	95	95

 **C 109/C 109M – 08**

**TABLE A1.5 Bias Tests
(Example Using 9-Cube Batches, Class A Cement)**

MREr %, the maximum relative error value of the four rounds	6.85
MAREr %, max allowable MREr from Table A1.4	6.7
	Fail
GRE %, the average REr % of the four rounds	3.13
Maximum limit of MGREG % from Table A1.4	5.5
	Pass
Bias confidence limit, CL %	96.99
Minimum allowable confidence limit, MACL % (from Table A1.4)	95
	Pass

The above results indicate the data fails to show compliance.

where:

- MREr, % = the maximum relative error, % obtained for any round (from values in column F, Table A1.3).
- MAREr, % = the maximum allowable relative error, % of any Round (Table A1.4).
- GRE, % = the grand average of the REr, % values of the four rounds.
- MAREg, % = maximum allowed GRE, % value (average of column F, Table A1.3), and
- CL, % = bias confidence limit, %, the confidence with which it can be stated that the error of the mean of 4 rounds is non-zero. Calculate this by use of Excel® function “=ttest(<range of industry means>,<range of values obtained>,-1,1)” or equivalent, or use statistical tables to find the confidence in a one-tailed, paired-value t-test on the set of round errors.

NOTE—The qualification method fails for bias if (1) the MREr exceeds the MAREr, % limit; or if (2) the GRE, % exceeds the MGREG limit and the CL, % exceeds 95 %.

SUMMARY OF CHANGES

Committee C01 has identified the location of selected changes to this test method since the last issue, C 109/C 109M – 07^{e1}, that may impact the use of this test method. (Approved December 1, 2008).

- (1) Revised 5.1.
- (2) Revised 9.3, added new 9.4, and revised Note 6.

Committee C01 has identified the location of selected changes to this test method since the last issue, C 109/C 109M – 05, that may impact the use of this test method. (Approved August 15, 2007).

- (1) Revised 5.9.2.

ASTM International takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM International Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.

This standard is copyrighted by ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or service@astm.org (e-mail); or through the ASTM website (www.astm.org).



Designation: C 188 – 95 (Reapproved 2003)

American Association State Highway and Transportation Officials Standard AASHTO No.: T133

Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement¹

This standard is issued under the fixed designation C 188; 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.

This standard has been approved for use by agencies of the Department of Defense.

1. Scope

1.1 This test method covers the determination of the density of hydraulic cement. Its particular usefulness is in connection with the design and control of concrete mixtures.

1.2 The density of hydraulic cement is defined as the mass of a unit volume of the solids.

1.3 The values stated in SI units are to be regarded as the standard.

1.4 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Referenced Documents

2.1 *ASTM Standards:*

C 114 Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement²

C 670 Practice for Preparing Precision and Bias Statements for Test Methods for Construction Materials³

3. Apparatus

3.1 *Le Chatelier flask*—The standard flask, which is circular in cross section, with shape and dimensions conforming essentially to Fig. 1 (Note 1). The requirements in regard to tolerance, inscription and length, spacing, and uniformity of graduation will be rigidly observed. There shall be a space of at least 10 mm between the highest graduation mark and the lowest point of grinding for the glass stopper.

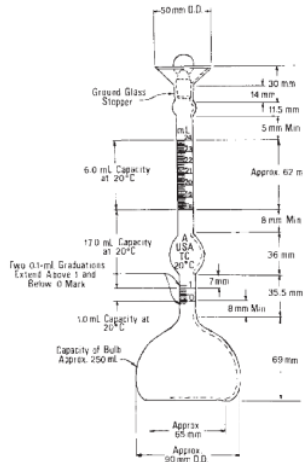
3.1.1 The material of construction shall be excellent quality glass, transparent and free of striae. The glass shall be chemically resistant and shall have small thermal hysteresis. The flasks shall be thoroughly annealed before being graduated. They shall be of sufficient thickness to ensure reasonable resistance to breakage.

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee C01 on Cement, and is the direct responsibility of Subcommittee C01.25 on Fineness.

Current edition approved June 10, 2003. Published August 2003. Originally approved in 1944. Last previous edition approved in 1995 as C 188 – 95.

² Annual Book of ASTM Standards, Vol 04.01.

³ Annual Book of ASTM Standards, Vol 04.02.



NOTE—Variations of a few millimetres in such dimensions as total height of flask, diameter of base, and so forth, are to be expected and will not be considered sufficient cause for rejection. The dimensions of the flask shown in Fig. 1 apply only to new flasks and not to flasks in use which meet the other requirements of this test method.

FIG. 1 Le Chatelier Flask for Density Test

3.1.2 The neck shall be graduated from 0 to 1 mL and from 18 to 24 mL in 0.1-mL graduations. The error of any indicated capacity shall not be greater than 0.05 mL.

3.1.3 Each flask shall bear a permanent identification number and the stopper, if not interchangeably ground, shall bear the same number. Interchangeable ground-glass parts shall be marked on both members with the standard-taper symbol, followed by the size designation. The standard temperature shall be indicated, and the unit of capacity shall be shown by the letters "mL" placed above the highest graduation mark.



3.2 Kerosine, free of water, or naphtha, having a density greater than 0.73 g/mL at $23 \pm 2^\circ\text{C}$ shall be used in the density determination.

3.3 The use of alternative equipment or methods for determining density is permitted provided that a single operator can obtain results within $\pm 0.03\text{ Mg/m}^3$ of the results obtained using the flask method.

NOTE 1—The design is intended to ensure complete drainage of the flask when emptied, and stability of standing on a level surface, as well as accuracy and precision of reading.

4. Procedure

4.1 Determine the density of cement on the material as received, unless otherwise specified. If the density determination on a loss-free sample is required, first ignite the sample as described in the test for loss on ignition in section 16.1 on Portland Cement of Test Methods C 114.

4.2 Fill the flask (Note 2) with either of the liquids specified in 3.2 to a point on the stem between the 0 and the 1-mL mark. Dry the inside of the flask above the level of the liquid, if necessary, after pouring. Record the first reading after the flask has been immersed in the water bath (Note 3) in accordance with 4.4.

NOTE 2—It is advisable to use a rubber pad on the table top when filling or rolling the flask.

NOTE 3—Before the cement has been added to the flask, a loose-fitting, lead-ring weight around the stem of the flask will be helpful in holding the flask in an upright position in the water bath, or the flask may be held in the water bath by a buret clamp.

4.3 Introduce a quantity of cement, weighed to the nearest 0.05 g, (about 64 g for portland cement) in small increments at the same temperature as the liquid (Note 2). Take care to avoid splashing and see that the cement does not adhere to the inside of the flask above the liquid. A vibrating apparatus may be used to accelerate the introduction of the cement into the flask and to prevent the cement from sticking to the neck. After all the cement has been introduced, place the stopper in the flask and roll the flask in an inclined position (Note 2), or gently whirl it in a horizontal circle, so as to free the cement from air until no further air bubbles rise to the surface of the liquid. If a proper amount of cement has been added, the level of the liquid will be in its final position at some point of the upper series of

graduations. Take the final reading after the flask has been immersed in the water bath in accordance with 4.4.

4.4 Immerse the flask in a constant-temperature water bath for sufficient periods of time in order to avoid flask temperature variations greater than 0.2°C between the initial and the final readings.

5. Calculation

5.1 The difference between the first and the final readings represents the volume of liquid displaced by the mass of cement used in the test.

5.2 Calculate the cement density, ρ , as follows:

$$\rho(\text{Mg/m}^3) = \rho(\text{g/cm}^3) = \text{mass of cement, g/displaced volume, cm}^3$$

NOTE 4—The displaced volume in millilitres is numerically equal to the displaced volume in cubic centimetres.

NOTE 5—Density in megagrams per cubic metre (Mg/m^3) is numerically equal to grams per cubic centimetre (g/cm^3). Calculate the cement density, ρ , to three decimal places and round to the nearest 0.01 Mg/m^3 .

NOTE 6—In connection with proportioning and control of concrete mixtures, density may be more usefully expressed as specific gravity, the latter being a dimensionless number. Calculate the specific gravity as follows: $\text{Sp gr} = \text{cement density/water density at } 4^\circ\text{C}$ (at 4°C the density of water is $1\text{ Mg/m}^3(1\text{ g/cm}^3)$).

6. Precision and Bias

6.1 The single-operator standard deviation for portland cements has been found to be 0.012.⁴ Therefore, the results of two properly conducted tests by the same operator on the same material should not differ by more than 0.03.

6.2 The multilaboratory standard deviation for portland cements has been found to be 0.037.⁴ Therefore, the results of two properly conducted tests from two different laboratories on samples of the same cement should not differ by more than 0.10.⁴

6.3 Since there is no accepted reference material suitable for determining any bias that might be associated with this test method, no statement on bias is being made.

7. Keywords

7.1 density; hydraulic cement; specific gravity

⁴ These numbers represent the 1s and d2s limits described in Practice C 670.

ASTM International takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM International Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.

This standard is copyrighted by ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or service@astm.org (e-mail); or through the ASTM website (www.astm.org).



Anexo 7: Certificados de ensayo



UNIVERSIDAD NACIONAL DE TRUJILLO

Facultad de Ingeniería

Departamento Académico de Ingeniería de Materiales

REPORTE DE ANALISIS DE FISICO QUIMICO MECANICOS DE MUESTRAS

SOLICITANTE: Br. Gisella Yossely Carrasco Domínguez

Fecha: 20 octubre 2023. Nota: Muestras puestas en laboratorio

Anexo 4: Resultados de laboratorio

Tabla 1.0 Resistencia a la compresión de pastas obtenidas por geopolimerización de polvo de ladrillo

Resistencia a la compresión (MPa) - 7 días						
Muestra	R1	R2	R3	R4	R5	PROM
PEP - 1 / GC	11.78	12.64	11.90	12.40	10.98	11.94
PE1 - 1 / 5M	13.82	13.92	13.55	12.12	14.21	13.52
PE2 - 1 / 7.5M	15.47	13.72	14.63	14.90	13.78	14.50
PE3 - 1 / 10M	13.12	14.22	13.77	12.78	15.21	13.82
PE4 - 1 / 12.5M	12.50	13.85	12.95	14.60	12.11	13.20
Resistencia a la compresión (MPa) - 14 días						
Muestra	R1	R2	R3	R4	R5	PROM
PEP - 2 / GC	13.20	13.01	12.68	14.11	13.14	13.23
PE1 - 2 / 5M	18.73	16.80	15.28	17.35	17.92	17.22
PE2 - 2 / 7.5M	19.43	20.72	20.00	21.30	19.22	20.13
PE3 - 2 / 10M	23.17	21.85	21.27	23.80	22.26	22.47
PE4 - 2 / 12.5M	14.54	15.58	15.59	14.2	16.27	15.24
Resistencia a la compresión (MPa) - 28 días						
Muestra	R1	R2	R3	R4	R5	PROM
PEP - 3 / GC	19.20	16.50	16.90	18.70	17.80	17.82
PE1 - 3 / 5M	16.76	18.89	17.31	19.42	17.98	18.07
PE2 - 3 / 7.5M	21.66	22.78	24.12	25.03	22.44	23.21
PE3 - 3 / 10M	22.20	24.50	25.00	23.10	24.80	23.92
PE4 - 3 / 12.5M	16.32	19.12	17.57	16.78	19.23	17.80



UNIVERSIDAD NACIONAL DE TRUJILLO

Facultad de Ingeniería

Departamento Académico de Ingeniería de Materiales

Tabla 2.0 Resistencia a la compresión de morteros obtenidos por geopolimerización de polvo de ladrillo

Resistencia a la compresión (MPa) - 7 días						
Muestra	R1	R2	R3	R4	R5	PROM
MEP - 1 / GC	7.40	8.52	8.12	7.55	8.74	8.07
ME1 - 1 / 5M	8.22	9.42	8.35	7.95	9.65	8.72
ME2 - 1 / 7.5M	13.92	12.44	12.15	13.45	14.05	13.20
ME3 - 1 / 10M	12.94	14.84	13.85	12.98	14.08	13.74
ME4 - 1 / 12.5M	9.73	10.17	10.54	9.84	10.70	10.20
Resistencia a la compresión (MPa) - 14 días						
Muestra	R1	R2	R3	R4	R5	PROM
MEP - 2 / GC	12.77	12.29	11.24	12.55	10.98	11.97
ME1 - 2 / 5M	10.94	11.69	11.32	11.47	9.99	11.08
ME2 - 2 / 7.5M	16.42	15.27	15.46	15.78	14.98	15.58
ME3 - 2 / 10M	16.31	17.34	17.02	16.25	18.15	17.01
ME4 - 2 / 12.5M	11.50	12.27	12.34	11.92	12.95	12.20
Resistencia a la compresión (MPa) - 28 días						
Muestra	R1	R2	R3	R4	R5	PROM
MEP - 3 / GC	14.33	13.25	11.78	13.92	12.61	13.18
ME1 - 3 / 5M	12.48	13.32	14.67	15.21	12.89	13.71
ME2 - 3 / 7.5M	16.12	18.23	17.98	19.45	15.76	17.51
ME3 - 3 / 10M	16.8	17.25	19.5	18.45	17.9	17.98
ME4 - 3 / 12.5M	14.50	13.25	11.90	12.70	14.80	13.43



UNIVERSIDAD NACIONAL DE TRUJILLO
Facultad de Ingeniería
Departamento Académico de Ingeniería de Materiales

Tabla 3.0 Densidad de pastas obtenidas por geopolimerización de polvo de ladrillo

Densidad (g/cm ³) - 7 días						
Muestra	R1	R2	R3	R4	R5	PROM
PEP - 1 / GC	1.67	1.69	1.71	1.66	1.68	1.68
PE1 - 1 / 5M	1.70	1.73	1.71	1.76	1.69	1.72
PE2 - 1 / 7.5M	1.81	1.78	1.80	1.76	1.82	1.79
PE3 - 1 / 10M	1.82	1.86	1.85	1.81	1.87	1.84
PE4 - 1 / 12.5M	1.74	1.71	1.73	1.70	1.73	1.72
Densidad (g/cm ³) - 14 días						
Muestra	R1	R2	R3	R4	R5	PROM
PEP - 2 / GC	1.67	1.71	1.70	1.67	1.72	1.69
PE1 - 2 / 5M	1.77	1.73	1.76	1.74	1.77	1.75
PE2 - 2 / 7.5M	1.82	1.78	1.79	1.83	1.77	1.80
PE3 - 2 / 10M	1.87	1.81	1.87	1.85	1.86	1.85
PE4 - 2 / 12.5M	1.73	1.76	1.74	1.77	1.75	1.75
Densidad (g/cm ³) - 28 días						
Muestra	R1	R2	R3	R4	R5	PROM
PEP - 3 / GC	1.72	1.69	1.68	1.72	1.71	1.70
PE1 - 3 / 5M	1.75	1.78	1.79	1.76	1.74	1.76
PE2 - 3 / 7.5M	1.82	1.85	1.86	1.83	1.80	1.83
PE3 - 3 / 10M	1.86	1.89	1.87	1.90	1.85	1.87
PE4 - 3 / 12.5M	1.79	1.76	1.80	1.75	1.78	1.78



UNIVERSIDAD NACIONAL DE TRUJILLO
Facultad de Ingeniería
Departamento Académico de Ingeniería de Materiales

Tabla 4.0 Densidad de morteros obtenidos por geopolimerización de polvo de ladrillo

Densidad (g/cm ³) - 7 días						
Muestra	R1	R2	R3	R4	R5	PROM
MEP - 1 / GC	1.81	1.85	1.82	1.88	1.79	1.83
ME1 - 1 / 5M	1.96	2.05	1.99	1.97	1.95	1.98
ME2 - 1 / 7.5M	1.98	1.96	1.91	1.98	2.07	1.98
ME3 - 1 / 10M	2.01	2.05	2.02	2.05	2.00	2.03
ME4 - 1 / 12.5M	1.80	1.83	1.85	1.81	1.79	1.82
Densidad (g/cm ³) - 14 días						
Muestra	R1	R2	R3	R4	R5	PROM
MEP - 2 / GC	1.88	1.97	1.75	1.74	1.89	1.85
ME1 - 2 / 5M	1.86	2.03	1.97	2.20	2.01	2.01
ME2 - 2 / 7.5M	2.01	1.98	2.00	1.99	2.03	2.00
ME3 - 2 / 10M	2.38	2.04	1.87	1.94	2.10	2.07
ME4 - 2 / 12.5M	1.78	1.94	1.75	1.89	1.85	1.84
Densidad (g/cm ³) - 28 días						
Muestra	R1	R2	R3	R4	R5	PROM
MEP - 3 / GC	1.85	1.87	1.88	1.86	1.85	1.86
ME1 - 3 / 5M	2.03	2.05	2.06	2.04	2.02	2.04
ME2 - 3 / 7.5M	2.10	2.08	2.09	2.11	2.07	2.09
ME3 - 3 / 10M	2.14	2.12	2.10	2.13	2.11	2.12
ME4 - 3 / 12.5M	1.87	1.86	1.84	1.88	1.85	1.86



UNIVERSIDAD NACIONAL DE TRUJILLO
Facultad de Ingeniería
Departamento Académico de Ingeniería de Materiales

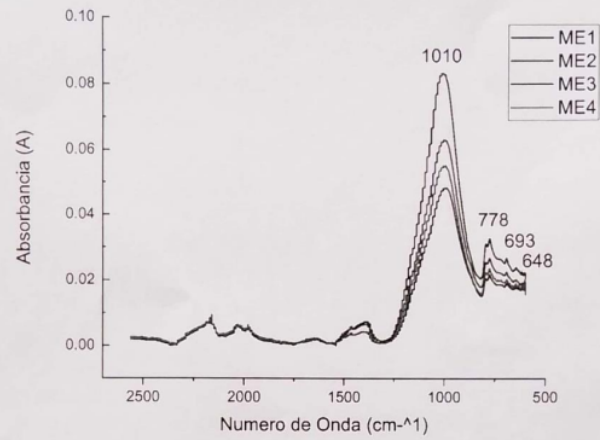
Tabla 5.0 Porosidad de morteros obtenidos por geopolimerización de polvo de ladrillo

Porosidad (%) - 7 días						
Muestra	R1	R2	R3	R4	R5	PROM
MEP - 1 / GC	13.50	14.80	14.20	13.10	15.42	14.20
ME1 - 1 / 5M	10.37	11.75	10.50	10.12	12.24	11.00
ME2 - 1 / 7.5M	4.67	5.98	4.87	4.25	6.75	5.30
ME3 - 1 / 10M	7.99	9.53	8.51	7.47	10.17	8.73
ME4 - 1 / 12.5M	14.21	15.34	14.80	14.11	16.22	14.94
Porosidad (%) - 14 días						
Muestra	R1	R2	R3	R4	R5	PROM
MEP - 2 / GC	14.24	14.57	13.32	12.31	14.26	13.74
ME1 - 2 / 5M	9.31	11.34	9.42	9.54	10.90	10.10
ME2 - 2 / 7.5M	4.30	5.70	4.80	4.00	6.20	5.00
ME3 - 2 / 10M	6.50	7.90	7.00	6.20	8.50	7.22
ME4 - 2 / 12.5M	13.60	15.00	14.20	13.10	15.70	14.32
Porosidad (%) - 28 días						
Muestra	R1	R2	R3	R4	R5	PROM
MEP - 3 / GC	12.30	12.80	13.20	12.50	13.70	12.90
ME1 - 3 / 5M	10.30	9.00	9.90	10.80	8.80	9.76
ME2 - 3 / 7.5M	2.20	3.10	2.70	3.40	2.10	2.70
ME3 - 3 / 10M	4.50	6.00	5.30	4.00	6.50	5.26
ME4 - 3 / 12.5M	13.20	14.50	13.70	14.80	13.00	13.84



UNIVERSIDAD NACIONAL DE TRUJILLO
Facultad de Ingeniería
Departamento Académico de Ingeniería de Materiales

Figura 1.0. Espectro FTIR de geopolimerización de polvo de ladrillo



Dr. Ing. Vega Anticona Alexander Y.
Jefe de Laboratorio

INFORME DE TESIS - GYCD

INFORME DE ORIGINALIDAD

13%

INDICE DE SIMILITUD

12%

FUENTES DE INTERNET

4%

PUBLICACIONES

5%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	repositorio.uct.edu.pe Fuente de Internet	3%
2	Submitted to Universidad Catolica de Trujillo Trabajo del estudiante	1%
3	www.dspace.unitru.edu.pe Fuente de Internet	1%
4	materconstrucc.revistas.csic.es Fuente de Internet	<1%
5	renati.sunedu.gob.pe Fuente de Internet	<1%
6	repositorio.unsa.edu.pe Fuente de Internet	<1%
7	minas.medellin.unal.edu.co Fuente de Internet	<1%
8	Submitted to UNIV DE LAS AMERICAS Trabajo del estudiante	<1%
9	Submitted to Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga	<1%

10

hdl.handle.net

Fuente de Internet

<1 %

11

dspace.unitru.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

12

repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080

Fuente de Internet

<1 %

13

Submitted to Universidad Católica San Pablo

Trabajo del estudiante

<1 %

14

Tania Ariadna García Mejía, Rosa María Ramírez Zamora. "Activación alcalina de residuos industriales. Una alternativa para su reutilización en la construcción", Academia XXII, 2023

Publicación

<1 %

15

alicia.concytec.gob.pe

Fuente de Internet

<1 %

16

YASNA PAMELA SEGURA SIERPE. "Reutilización de residuos de construcción en la fabricación de conglomerantes de activación alcalina.", Universitat Politecnica de Valencia, 2016

Publicación

<1 %

17

repositorio.upn.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

18

I. Higuera, C. Varga, J. G. Palomo, A. Gil-Maroto, T. Vázquez, F. Puertas.

"Comportamiento mecánico de mezclas de escoria vítrea de horno alto y metacaolín activadas alcalinamente. Estudio estadístico",
Materiales de Construcción, 2012

Publicación

<1 %

19

Submitted to Universidad Cesar Vallejo

Trabajo del estudiante

<1 %

20

repositorioinstitucional.ufpso.edu.co

Fuente de Internet

<1 %

21

repositorioacademico.upc.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

22

eprints.uanl.mx

Fuente de Internet

<1 %

23

repositorio.uas.edu.mx

Fuente de Internet

<1 %

24

Submitted to Universidad Andina del Cusco

Trabajo del estudiante

<1 %

25

Erich David Rodríguez Martínez. "EFECTO DE LA INCORPORACIÓN DE MATERIALES BASADOS EN SÍLICE SOBRE LAS PROPIEDADES DE MATRICES DE CEMENTO PÓRTLAND Y ACTIVADAS ALCALINAMENTE",
Universitat Politecnica de Valencia, 2012

Publicación

<1 %

26	repositorio.ucv.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
27	plus.si.cobiss.net Fuente de Internet	<1 %
28	www.slideshare.net Fuente de Internet	<1 %
29	Armando Nicolás Moreno, Marco Antonio García Lobato, Felipe Avalos Bemolte, Elia Martha Múzquiz Ramos. "Residuos de mármol en materiales para la construcción: una revisión del uso del polvo de mármol en morteros, concretos y ladrillos", Revista ALCONPAT, 2022 Publicación	<1 %
30	repo.sibdi.ucr.ac.cr:8080 Fuente de Internet	<1 %
31	stutzartists.org Fuente de Internet	<1 %
32	apps.ucsm.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
33	fdocuments.es Fuente de Internet	<1 %
34	link.springer.com Fuente de Internet	<1 %
35	www.prnewswire.com	

Fuente de Internet

<1 %

36

es.scribd.com

Fuente de Internet

<1 %

37

idus.us.es

Fuente de Internet

<1 %

38

repositorio.untrm.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

39

core.ac.uk

Fuente de Internet

<1 %

40

docplayer.es

Fuente de Internet

<1 %

41

hcl.usr.ro

Fuente de Internet

<1 %

42

repositorio.unesc.net

Fuente de Internet

<1 %

43

helvia.uco.es

Fuente de Internet

<1 %

44

www.dspace.espol.edu.ec

Fuente de Internet

<1 %

45

repositorio.unach.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

46

repositorio.uns.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

47	www.paginadigital.org Fuente de Internet	<1 %
48	repository.uamerica.edu.co Fuente de Internet	<1 %
49	Leidy Indira Hinestroza Còrdoba. "Aplicación de tecnologías sostenibles para el desarrollo de alimentos nutritivos y saludables dirigidos a mejorar el estado nutricional de la población del departamento del Chocó (Colombia)", Universitat Politecnica de Valencia, 2021 Publicación	<1 %
50	econ.worldbank.org Fuente de Internet	<1 %
51	repositorio.urp.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
52	www.easycalculation.com Fuente de Internet	<1 %
53	1library.co Fuente de Internet	<1 %
54	repositorio.unac.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
55	rodrigojpr.myaiesec.net Fuente de Internet	<1 %
56	tangara.uis.edu.co	

Fuente de Internet

<1 %

57

www.3dprintingdesign.es

Fuente de Internet

<1 %

58

www.coursehero.com

Fuente de Internet

<1 %

59

www.project-syndicate.org

Fuente de Internet

<1 %

60

www.researchgate.net

Fuente de Internet

<1 %

61

Sugenith Margarita Arteaga Castillo. "Cultivos para el cambio climático: selección y caracterización de variedades de judía (*Phaseolus vulgaris* L.) y *Phaseolus lunatus* tolerantes a la sequía y salinidad", Universitat Politecnica de Valencia, 2021

Publicación

<1 %

62

catalogo-intra.escuelaing.edu.co

Fuente de Internet

<1 %

63

foristom.org

Fuente de Internet

<1 %

64

library.ifla.org

Fuente de Internet

<1 %

65

ocs.editorial.upv.es

Fuente de Internet

<1 %

66 patents.google.com <1 %
Fuente de Internet

67 repositorio.unc.edu.pe <1 %
Fuente de Internet

68 repositorio.unesum.edu.ec <1 %
Fuente de Internet

69 www.lanteksms.com <1 %
Fuente de Internet

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias < 10 words

Excluir bibliografía

Activo