

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL SANTA
ESCUELA DE POSGRADO
PROGRAMA DE DOCTORADO EN INGENIERÍA CIVIL



UNS
ESCUELA DE
POSGRADO

**“Influencia de la CCA con yeso y fibras de ichu en la
elaboración de Geopolímeros”**

**Tesis para optar el grado Académico de
Doctor en Ingeniería Civil**

Autor:

M.Sc. Muñoz Pérez, Sócrates Pedro

Asesor:

Dr. Charca Mamani, Samuel
DNI N° 24717255
Código ORCID: 0000-0002-8302-7393

Línea de Investigación
Nuevos materiales para la construcción

Nuevo Chimbote - PERÚ
2023



UNS
ESCUELA DE
POSGRADO

CONSTANCIA DE ASESORAMIENTO DE TESIS

Yo, **Dr. Charca Mamani, Samuel,** mediante la presente certifico mi asesoramiento de la Tesis: Doctorado en Ingeniería Civil titulado: **“Influencia de la CCA con yeso y fibras de Ichu en la elaboración de Geopolímeros”**, elaborado por el **M,Sc. Muños Pérez, Sócrates Pedro**, para obtener el grado académico de **Doctor en Ingeniería Civil** en la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional del Santa.

.....
Dr. Charca Mamani, Samuel

Asesor

DNI. 24717255

Código ORCID: 0000-0002-8302-7393



UNS
ESCUELA DE
POSGRADO

CONFORMIDAD DEL JURADO EVALUADOR

INFLUENCIA DE LA CCA CON YESO Y FIBRAS DE ICHU EN LA ELABORACIÓN DE GEOPOLÍMEROS

TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE DOCTOR EN INGENIERÍA CIVIL

Revisado y Aprobado por el Jurado Evaluador:

Dr. Abner Itamar León Bobadilla

PRESIDENTE (A)

CODIGO ORCID: 0000-0003-2949-6591

DNI N° 32942184

Dr. Atilo Rubén López Carranza

SECRETARIO

CODIGO ORCID: 0000-0002-3631-2001

DNI N° 32965940

Dr. Samuel Charca Mamani

VOCAL

CODIGO ORCID: 0000-0002-8302-7393

DNI N° 24717255



UNS
ESCUELA DE
POSGRADO

ACTA DE EVALUACIÓN DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

A los quince días del mes de junio del año 2023, siendo las 11.00 horas, en el aula multimedia N° 01 de la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional del Santa, se reunieron los miembros del Jurado Evaluador conformado por los docentes: Dr. Abner Itamar León Bobadilla (Presidente), Dr. Atilio Rubén López Carranza (Secretario) y el Dr. Samuel Charca Mamani (Vocal), designados mediante Resolución Directoral N° 064-2023-EPGUNS de fecha 23 marzo 2023, con la finalidad de evaluar la tesis titulada: **INFLUENCIA DE LA CCA CON YESO Y FIBRAS DE ICHU EN LA ELABORACIÓN DE GEOPOLÍMEROS**; presentado por el tesista **Sócrates Pedro Muñoz Pérez**, egresado del programa de **Doctorado en Ingeniería Civil**.

Sustentación autorizada mediante Resolución Directoral N° 124-2023-EPG-UNS de fecha 06 de junio de 2023.


El presidente del jurado autorizó el inicio del acto académico; producido y concluido el acto de sustentación de tesis, los miembros del jurado procedieron a la evaluación respectiva, haciendo una serie de preguntas y recomendaciones al tesista, quien dio respuestas a las interrogantes y observaciones.

El jurado después de deliberar sobre aspectos relacionados con el trabajo, contenido y sustentación del mismo y con las sugerencias pertinentes, declara la sustentación como: BUENO asignándole la calificación de: DIECIOCHO (18)

Siendo las 12.00 horas del mismo día se da por finalizado el acto académico, firmando la presente acta en señal de conformidad.


Dr. Abner Itamar León Bobadilla
Presidente


Dr. Atilio Rubén López Carranza
Secretario


Dr. Samuel Charca Mamani
Vocal

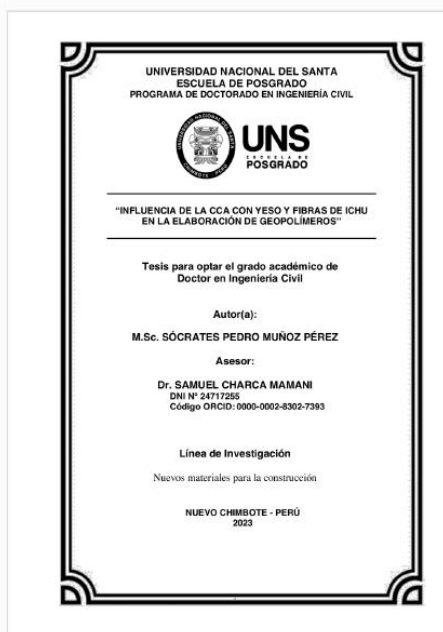


Recibo digital

Este recibo confirma que su trabajo ha sido recibido por Turnitin. A continuación podrá ver la información del recibo con respecto a su entrega.

La primera página de tus entregas se muestra abajo.

Autor de la entrega: Socrates Pedro Muñoz Perez
Título del ejercicio: Tesis
Título de la entrega: Tesis Doctoral: INFLUENCIA DE LA CCA CON YESO Y FIBRAS D...
Nombre del archivo: UNIVERSIDAD_NACIONAL_DEL_SANTA_tesis_doctorado.docx
Tamaño del archivo: 17.72M
Total páginas: 110
Total de palabras: 29,423
Total de caracteres: 141,512
Fecha de entrega: 18-jun.-2023 02:16p. m. (UTC-0500)
Identificador de la entre... 2118367553



DEDICATORIA

A mi Dios que todos los días derrama su infinita misericordia en mi vida, luchando mis batallas y bendiciendo las cosas que hago. Dios es mi luz y mi guía.

A mi esposa Angélica María por estar conmigo y motivándome a continuar con mis estudios de doctorado.

A mis padres Sócrates y Jennifer que con su ejemplo me enseñaron que la educación me traerá cosas buenas.

A mis hijos Paris Cristina, Juana Micaela, Sócrates Santiago, Emilia Valentina y Angélica Cataleya, que son mi motivo y mi aliento para poder seguir desarrollando la parte académica, profesional e investigativa, los llevó en mi corazón.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por haberme entregado regalado las cosas espirituales y materiales necesarios para poder culminar mis estudios de doctorado.

A mi asesor de Tesis, el Dr. Samuel Charca Mamani por guiarme a centrar las ideas y plasmando el objetivo de manera oportuna para la realización del trabajo de investigación.

Índice general

CONSTANCIA DE ASESORAMIENTO DE TESIS DOCTORAL.....	ii
CONFORMIDAD DE JURADO EVALUADOR.....	iii
ACTA DE EVALUACIÓN DE SUSTENTACIÓN DE TESIS.....	iv
DEDICATORIA.....	vi
AGRADECIMIENTOS	vii
RESUMEN.....	xvii
ABSTRACT	xviii
CAPÍTULO I.....	19
PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	19
1.1 Planteamiento y fundamentación del problema:.....	19
1.2 Antecedentes de la investigación:	28
1.3 Formulación del problema de investigación.....	35
1.4 Delimitación del estudio.....	35
1.5 Justificación e importancia de la investigación	36
1.6 Objetivos de la investigación	38
CAPÍTULO II.....	40
MARCO TEÓRICO.....	40
2.1 Fundamentos teóricos de la investigación.....	40
2.2 Marco Conceptual.....	42
CAPÍTULO III.....	49
MARCO METODOLÓGICO.....	49
3.1 Hipótesis central de la investigación.....	49
3.2 Variables e indicadores de la investigación.....	49
3.3 Métodos de la investigación	53
3.4 Diseño o esquema de la investigación	53
3.5 Población y muestra	66
3.6 Actividades del proceso investigativo	72
3.7 Técnicas e instrumentos de la investigación	72

3.8 Procedimiento de la recolección de datos	74
3.9 Técnicas de procesamiento y análisis de los resultados	74
CAPÍTULO IV	77
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	77
4.1 Análisis del resultado térmico de la ceniza de la cáscara de arroz.....	77
4.2 Análisis químico de la ceniza de la cáscara de arroz	79
4.3 Análisis de los resultados de prueba a la compresión del geopolimero a 8, 10, 12 y 14 molar con CCA.....	80
4.4 Análisis de los resultados de prueba a la compresión del geopolimero a 8, 10, 12 y 14 molar con CCA y con 10, 20, 30, 40 y 50% de yeso.....	82
4.5 Análisis mecánico del geopolimero con la óptima molaridad con CCA con el óptimo porcentaje de yeso con los procesos A, B y C de mezclado.	88
4.6 Análisis mecánico del geopolimero con la óptima molaridad con CCA con el óptimo porcentaje de yeso con el óptimo mezclado y con 0.5, 1, 1.5 y 2% de fibra natural de ichu.	96
4.7 Difracción de Rayos X (DRX).	109
4.8 Microscopía de Barrido SEM y EDS	112
4.9 Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR).	119
4.10 Analisis Termogravimétrico (TGA).....	120
CAPÍTULO V	122
5.1 Conclusiones	122
5.2 Recomendaciones	123
REFERENCIA BIBLIOGRÁFICAS.....	125
ANEXOS.....	135
Anexo 01. Ensayos de granulometría, peso unitario suelto y compactado, contenido de humedad, peso específico y absorción de los agregados fino y grueso.....	135
Anexo 02. Panel Fotográfico	141

Índice de tablas

Tabla 1. Operacionalización de variables.....	50
Tabla 2. Factores de estudio de la quema de la CCA.....	54
Tabla 3. ANOVA para el diseño factorial 4x4x5	55
Tabla 4. ANOVA para el diseño de DCA.....	56
Tabla 5. Muestras cúbicas de 5cm x 5cm x 5cm para evaluar la óptima temperatura de quemado de las CCA, según normativa ASTM C618.....	67
Tabla 6. Muestras cúbicas de 5cm x 5cm x 5cm para la elaboración de Geopolímeros con CCA a 8 molar para determinar la óptima prueba a la compresión con la CCA	67
Tabla 7. Muestras cúbicas de 5cm x 5cm x 5cm para la elaboración de Geopolímeros con CCA a 10 Molar para determinar la óptima prueba a la compresión con la CCA.....	67
Tabla 8. Muestras cúbicas de 5cm x 5cm x 5cm para la elaboración de Geopolímeros con CCA a 12 Molar para determinar la óptima prueba a la compresión con la CCA.....	68
Tabla 9. Muestras cúbicas de 5cm x 5cm x 5cm para la elaboración de Geopolímeros con CCA a 14 Molar para determinar la óptima prueba a la compresión con la CCA.....	68
Tabla 10. Muestras cúbicas de 5cm x 5cm x 5cm para la elaboración de Geopolímeros con CCA y yeso a 8 Molar.....	68
Tabla 11. Muestras cúbicas de 5cm x 5cm x 5cm para la elaboración de Geopolímeros con CCA y yeso a 10 Molar.....	69
Tabla 12. Muestras cúbicas de 5cm x 5cm x 5cm para la elaboración de Geopolímeros con CCA y yeso a 12 Molar.....	69
Tabla 13. Muestras cúbicas de 5cm x 5cm x 5cm para la elaboración de Geopolímeros con CCA y yeso a 14 Molar r	70
Tabla 14. Muestras de los especímenes para la elaboración de Geopolímeros con CCA, con la óptima molaridad y el óptimo porcentaje de yeso.....	70
Tabla 15. Muestras de los especímenes para la elaboración de Geopolímeros con CCA, con la óptima molaridad, con el óptimo procedimiento de mezclado, con el óptimo porcentaje de yeso y la fibra de ichu.....	71
Tabla 16. Resultados de prueba a la compresión a los 7, 14 y 28 a 600, 650, 700 y 750 °C de temperatura de quemado de las cenizas	77

Tabla 17. Análisis de varianza de la interacción “Temperatura vs. Días de curado”	78
Tabla 18. Prueba de comparación de Medías “TUKEY”	78
Tabla 19. Análisis químico de la Ceniza de cáscara de arroz (%)	79
Tabla 20. Prueba a la compresión de los geopolimeros con CCA, a 8, 10, 12 y 14 molar	81
Tabla 21. Análisis de Varianza de la interacción “Molaridad vs. Días de curado”	81
Tabla 22. Prueba de Comparación de Medías “TUKEY”	82
Tabla 23. Resultados de prueba a la compresión de geopolimeros a 8, 10, 12 y 14 molar con CCA con 10, 20, 30, 40 y 50% de yeso”	83
Tabla 24. Análisis de Varianza de la interacción “Molaridad vs. Porcentaje de Yeso vs. Días de curado”	85
Tabla 25. Prueba de Comparación de Medías “TUKEY”	85
Tabla 26. Resultados de las resistencias mecánicas con la óptima molaridad, óptimo porcentaje de yeso, con los procesos de mezclado A, B y C rotos a 7, 14 y 28 días de curado”	88
Tabla 27. Análisis de Varianza a la “Prueba a la compresión”	90
Tabla 28. Prueba de Comparación de Medías “TUKEY”	90
Tabla 29. Análisis de Varianza para la “Módulos Elásticos”	92
Tabla 30. Prueba de Comparación de Medías “TUKEY”	92
Tabla 31 Análisis de Varianza para la “Prueba a la Tracción”	93
Tabla 32 Prueba de Comparación de Medías “TUKEY”	94
Tabla 33. Análisis de Varianza para la “Prueba a la Flexión”	95
Tabla 34. Prueba de Comparación de Medías “TUKEY”	95
Tabla 35. Resultados de las resistencias mecánicas con la óptima molaridad, óptimo porcentaje de yeso, con el óptimo mezclado y con porcentaje de 0.5, 1, 1.5 y 2% de ichu rotos a 7, 14 y 28 días de curado	97
Tabla 36. Análisis de varianza para la “Prueba a la compresión”	98
Tabla 37. Prueba de Comparación de Medías “TUKEY”	99
Tabla 38. Análisis de varianza para “Módulos elásticos”	100
Tabla 39. Prueba de Comparación de Medías “TUKEY”	101
Tabla 40. Análisis de varianza para “Prueba a la tracción”	102
Tabla 41 Prueba de Comparación de Medías “TUKEY”	102

Tabla 42. Análisis de Varianza para “Prueba a la Flexión”	104
Tabla 43 Prueba de Comparación de Medías “TUKEY””	104
Tabla 44. Análisis de Varianza para “Densidad del Geopolímero”	106
Tabla 45. Prueba de Comparación de Medías “TUKEY”	106
Tabla 46. Concentración de fases cristalinas en la muestra "Geopolímero sin yeso", "Geopolímero con 20% de yeso" y "Geopolímero con 20% de yeso z 1,5% de ichu"	112
Tabla 47. Composición química medida por EDS en diversas regiones de interés de la muestra M1 – “Trozos de geopolímeros sin yeso”	114
Tabla 48. Composición química medida por EDS en diversas regiones de interés de la muestra M2 – “Trozos de geopolímeros con 20% de yeso”	116
Tabla 49. Composición química medida por EDS en diversas regiones de interés de la muestra M3 – “Trozos de geopolímeros con 20% de yeso + 1.5% de ichu	118
Tabla 50. Resultados del análisis termogravimétrico (TGA).	121

Índice de figuras

Figura 1. Producción per cápita de cemento al año 2017.....	20
Figura 2. Emisiones globales de la producción del cemento, con un intervalo de confianza del 95%.	21
Figura 3. Proceso de geopolimerización.....	41
Figura 4. Policondensación de caolinita $\text{Si}_2\text{O}_5, \text{Al}_2(\text{OH})_4$ en medio alcalino.....	43
Figura 5. Diagrama de prueba de procesos de geopolímero.....	47
Figura 6 Procesos de mezcla A, B y C adoptados en el presente estudio	47
Figura 7. Esquema del proceso del método de investigación.....	53
Figura 8. Diagrama del proceso para definir la temperatura de quemado de la CCA	57
Figura 9. Calcinación de la cáscara de arroz y control de la temperatura con un termómetro	58
Figura 10. Enfriamiento de las CCA.	58
Figura 11. CCA a 600, 650, 700 y 750 °C triturada	59
Figura 12. Molino de bolas usado para la molienda de la CCA.	59
Figura 13. CCA a 600, 650, 700 y 750 °C triturada y pasante la malla N° 325 (45 μm)......	59
Figura 14. Medición de la fluidez del mortero con CCA.....	60
Figura 15. Producción de las muestras patrón, y morteros con CCA a 600, 650, 700 y 750 °C.....	60
Figura 16. Curado de las muestras patrón, y morteros con CCAS a 600, 650, 700 y 750 °C.....	61
Figura 17. Rotura de las muestras patrón, y morteros con CCA a 600, 650, 700 y 750 °C	61
Figura 18. Calcinación de la muestra para análisis de Sílice.....	62
Figura 19. Muestras después de calcinación a 900 ^a C	62
Figura 20. Muestra disuelta y filtrada para análisis por absorción atómica.....	62
Figura 21. Diagrama del proceso del tratamiento previo del yeso	63
Figura 22. Diagrama del proceso del tratamiento previo de la fibra de lchu	64
Figura 23. Diagrama del proceso del tratamiento de elaboración del geopolímero con CCA y fibra de lchu.....	64

Figura 24. Prueba de prueba a la tracción según de las muestras de geopolimeros ASTM C496.....	64
Figura 25. Prueba de prueba a la compresión y módulos elásticos de las muestras de geopolimeros según ASTM C496 y ASTM C 469.....	64
Figura 26. Prueba de prueba a la tracción según de las muestras de geopolimeros ASTM C496.....	65
Figura 27 Diagrama de flujo de la presente investigación	65
Figura 28. Diagrama conceptual sobre la estructura de tesis	73
Figura 29. Diagrama del proceso de flujo del procedimiento de análisis de recolección de datos.....	76
Figura 30 Prueba a la compresión a los 7, 14 y 28 días a 600, 650, 700 y 750 °C de temperatura de quemado de las cenizas.....	78
Figura 31. Prueba a la compresión de los geopolimeros con CCA, a 8, 10 12 y 14 molar	81
Figura 32. Prueba a la compresión promedio a los 28 días de los geopolimeros con CCA, a 8, 10 12 y 14 molar y con 10, 20, 30, 40 y 50% de yeso.....	85
Figura 33. Resultados de la prueba a la compresión a los 28 días de curado con la óptima molaridad, óptimo porcentaje de yeso, con los procesos de mezclado A, B y C.....	90
Figura 34. Resultados de los módulos elásticos a los 28 días de curado con la óptima molaridad, óptimo porcentaje de yeso, con los procesos de mezclado A, B y C.....	91
Figura 35. Resultados de la prueba a la tracción a los 28 días de curado con la óptima molaridad, óptimo porcentaje de yeso, con los procesos de mezclado A, B y C.....	93
Figura 36. Resultados de la prueba a la flexión a los 28 días de curado con la óptima molaridad, óptimo porcentaje de yeso, con los procesos de mezclado A, B y C.....	95
Figura 37. Resultados de la prueba a la compresión a los 7, 14 y 28 días de curado con la óptima molaridad, óptimo porcentaje de yeso, con el óptimo procedimiento de mezclado con los porcentajes de 0.5, 1, 1.5 y 2% de fibra de ichu	98
Figura 38. Resultados del módulo de elasticidad a los 7, 14 y 28 días de curado con la óptima molaridad, óptimo porcentaje de yeso, con el óptimo procedimiento	

de mezclado con los porcentajes de 0.5, 1, 1.5 y 2% de fibra de ichu	100
Figura 39. Resultados de la prueba a la tracción a los 7, 14 y 28 días de curado con la óptima molaridad, óptimo porcentaje de yeso, con el óptimo procedimiento de mezclado con los porcentajes de 0.5, 1, 1.5 y 2% de fibra de ichu	102
Figura 40. Resultados de la prueba a la flexión a los 7, 14 y 28 días de curado con la óptima molaridad, óptimo porcentaje de yeso, con el óptimo procedimiento de mezclado con los porcentajes de 0.5, 1, 1.5 y 2% de fibra de ichu	104
Figura 41. Resultados de la densidad de los geopolímeros a 8, 10, 12 y 14M.	106
Figura 42. Patrón de DRX de los activadores sólidos.	110
Figura 43. Difractograma de rayos X de la muestra de CCA y las fases cristalinas identificadas.	110
Figura 44. Difractogramas de rayos X de las muestras de “Geopolímeros” y fases cristalinas identificadas.	112
Figura 45. Micrografía de muestra M1 – “Trozos de geopolímeros sin yeso” a 200x con regiones de interés señaladas de yeso (20% de yeso), con el óptimo mezclado y a 1.5% de fibra de ichu	113
Figura 46. Micrografía de muestra M1 – “Trozos de geopolímeros sin yeso” a 500x	114
Figura 47. Micrografía de muestra M2 – “Trozos de geopolímeros con 20% de yeso” a 200x con regiones de interés señaladas.	116
Figura 48. Micrografía de muestra M2 – “Trozos de geopolímeros con 20% de yeso” a 400x con regiones de interés señaladas.	117
Figura 49. Micrografía de muestra M3 – “Trozos de geopolímeros con 20% de yeso+ 1.5% de ichu” a 400x con regiones de interés señaladas	118
Figura 50. Espectro FTIR de la muestra Geopolímero con 20% de yeso + 1.5% de fibra de ichu pulverizado.	120
Figura 51. Termograma de la muestra Geopolímero Pulverizado, Análisis termogravimétrico (TGA – línea azul y roja) Derivada de la pérdida de masa (DTG - línea verde)	121

Índice de ecuaciones

Ecuación 1. Valor del i-ésimo nivel del factor A, j-ésimo nivel del factor B, k-ésimo nivel del factor C a la resistencia por compresión	54
Ecuación 2. Modelo estadístico del diseño completamente al azar	55

RESUMEN

La producción de cemento consume enormes cantidades de combustibles fósiles generando emisiones importantes de CO₂ provocando grave impacto al medio ambiente, y anualmente se genera enormes cantidades de cenizas de cáscara de arroz (CCA) donde muchas no son usadas eliminándolas en vertederos provocando una grave degradación del medio ambiente. La presente investigación tiene como objetivo estudiar las propiedades mecánicas y microestructurales del geopolimero elaborado con CCA, yeso y fibra de ichu, con activadores alcalinos de hidróxido de sodio y silicato de sodio. Se elaboraron geopolimeros a 8, 10, 12 y 14 molar de hidróxido de sodio con proporciones de 10, 20, 30, 40 y 50% de yeso y 0.5, 1.0, 1.5 y 2.0% de fibra de ichu que fueron sometidos a resistencias mecánicas y análisis de la microestructura. Los resultados revelaron que la mejor combinación fue la de 12 Molar con 20% de yeso y 1.5% de fibra de ichu, con resistencias a la compresión, flexión y tracción en 97.22, 79.86 y 22.47 kg/cm² respectivamente, las imágenes SEM mostraron la generación de una gran cantidad de productos geopoliméricos por la reacción del OH con los componentes de aluminosilicato de la CCA en una fuente alcalina. La DRX muestra como fases cristalinas a la albita, el cuarzo, la ortoclasa, la silvita y también fase cristalina amorfa, Los espectros FTIR mostraron relacionadas a las vibraciones de estiramiento H–O–H y O–H de bandas anchas alrededor de 3450 cm⁻¹, el análisis termogravimétrico muestra que la masa residual al final del ensayo a 990°C es de 90,6%. Se concluye que el hidróxido de sodio, el silicato de sodio junto con las CCA, yeso y fibras de ichu pueden ser usados como materiales reactivos para producir geopolimeros con buenas características mecánicas

Palabras clave: Fibra de ichu, ceniza de cáscara de arroz, yeso, propiedades mecánicas, microestructura, geopolímero.

ABSTRACT

The production of cement consumes enormous amounts of fossil fuels generating significant CO₂ emissions causing serious impact on the environment, and huge amounts of rice husk ash (RHA) are generated annually where many are not used and are disposed of in landfills causing serious environmental degradation. The present research aims to study the mechanical and microstructural properties of the geopolymer elaborated with RHA, gypsum and ichu fiber, with alkaline activators of sodium hydroxide and sodium silicate. Geopolymers at 8, 10, 12 and 14 molar of sodium hydroxide with proportions of 10, 20, 30, 40 and 50% of gypsum and 0.5, 1.0, 1.5 and 2.0% of ichu fiber were elaborated and subjected to mechanical strength and microstructure analysis. The results revealed that the best combination was 12 Molar with 20% gypsum and 1.5% ichu fiber, with compressive, flexural and tensile strengths at 97.22, 79.86 and 22.47 kg/cm² respectively, SEM images showed the generation of a large amount of geopolymeric products by the reaction of OH with the aluminosilicate components of the RHA in an alkaline source. XRD shows albite, quartz, orthoclase, sylvite and also amorphous crystalline phase as crystalline phases, FTIR spectra showed related to H-O-H and O-H stretching vibrations of broad bands around 3450 cm⁻¹, thermogravimetric analysis shows that the residual mass at the end of the test at 990°C is 90.6%. It is concluded that sodium hydroxide, sodium silicate together with RHA, gypsum and ichu fibers can be used as reactive materials to produce geopolymers with good mechanical characteristics

Keywords: Ichu fiber, rice husk ash, gypsum, mechanical properties, microstructure, geopolymer.

CAPÍTULO I

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1 Planteamiento y fundamentación del problema:

Tun et al., manifiestan que el desarrollo de las principales economías mundiales acompañado con el crecimiento poblacional, ha llevado a un aumento progresivo en el uso de materiales de construcción y por lo tanto en la demanda de cemento, particularmente en la región asiática lo que ha impulsado que la industria del cemento sea uno de los sectores líderes que consume una gran cantidad de combustibles fósiles (2021, p.1), lo cual es contrastado por lo afirmado por Ali y sus colaboradores que el sector de la industria del cemento por sí solo consume casi entre el 12 al 15% del uso total de energía industrial, y que emite un aproximado del 7% de dióxido de carbono (CO₂) (2011, p.1), lo mencionado se alinea por lo afirmado por Torres y Puertas, (2017) quienes indican que la producción del cemento consume energía primaria, que aproximadamente es alrededor de un 3% del consumo mundial.

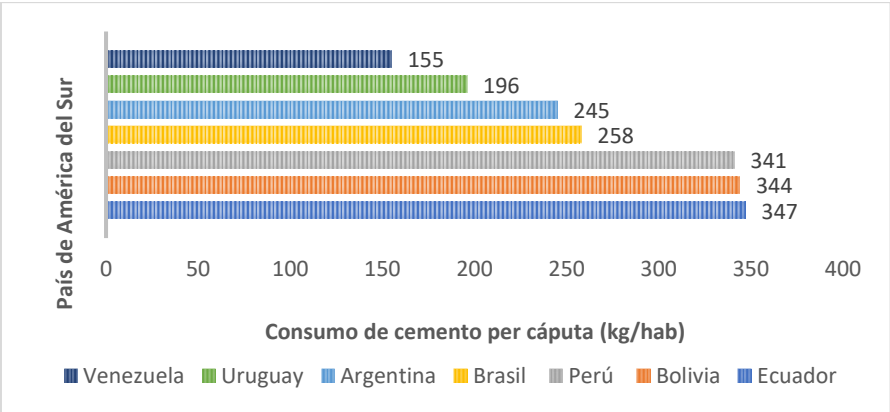
El incremento del consumo de hormigón y sus componentes, especialmente el Cemento Portland, ocasiona contaminación ambiental debido al crecimiento vertiginoso de la emisión del dióxido de carbono (CO₂) (Danish & Mosaberpanah, 2021), generando severo impacto ambiental que se estima que para producir 1000 kilogramos de cemento se va a emitir 1000 kilogramos de CO₂ tal como lo afirman Shehata y sus colaboradores., (2021, p.1), estas preocupaciones medioambientales exigen el empleo de materiales eco amigables renovables y sostenibles para producir hormigón (Hamada y otros, 2021). Por tal motivo Han y sus colaboradores (2021) sugieren la incorporación de materiales suplementarios con características cementantes como las cenizas volantes, humo de sílice y escoria como sustitución parcial y total del cemento para disminuir el impacto perjudicial que genera en el medio ambiente y promover buenas prácticas de sostenibilidad en la industria de la construcción.

Según la Asociación de Productores de cemento (2019), afirman que en el 2016 la producción mundial del cemento alcanzó a los 4,129 millones de toneladas (Mt) logrando superar en un 1.8% con respecto al 2015. China incesantemente lidera el requerimiento de cemento con 2,395 Mt en el 2016, llegando al 58% de la

contribución del mundo. Esta contribución llegó a la cumbre máxima en el año 2014 con 59.4%. La producción per cápita se visualiza en la Figura 1, el Perú está en el tercer puesto de los diez países que conforman América del Sur con 341 kilogramos per cápita, superándolo Bolivia y Ecuador, tal como lo muestra la Figura 1 (Federación Interamericana del Cemento, 2019).

Figura 1.

Producción per cápita de cemento al año 2019

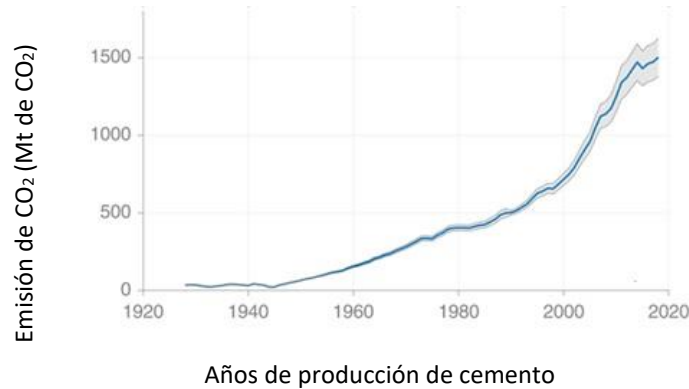


Nota. La Figura muestra la producción de per cápita, el Perú está en el tercer puesto de los diez países que conforman América del Sur. Tomado de la Federación Interamericana del Cemento (2019).

Teniendo en cuenta el escenario del aumento de la temperatura superficial media mundial podría aumentar en 2 °C para el año 2050 en relación con el período preindustrial, con cambios aún mayores a nivel regional, estos cambios de temperatura tienen implicaciones claras y pertinentes con problemas de salud inducidos por el calor para las personas que viven en climas particularmente cálidos (Sherman y otros, 2022), es por ello que el sector del cemento se ha convertido en un objetivo de debate, que equivale a 1,50 Gt de CO₂ en el 2018, en la Figura 2 se visualiza lo mencionado (Robbie, 2019).

Figura 2.

Emisiones globales de la producción del cemento, con un intervalo de confianza del 95%.



Nota. La Figura detalla la cantidad de emisión de Mt de CO₂ que se ha producido por año debido a la producción de cemento. Tomado de: (Robbie, 2019)

Por tanto, Adnan y sus colaboradores (2019) propone que para poder reducir el consumo del cemento, se usen materiales puzolánicos como molido granulado de escoria de alto horno, cenizas de combustible de aceite de palma (POFA), cenizas de cáscara de arroz (CCA), “cenizas volantes”, “humo de sílice” como insumos de cementación suplementarios, de esta manera poder disminuir la contaminación debido a la descomposición incontrolada de desechos agroindustriales tal como lo hace notar Ranganathan y sus colaboradores, (2020). Pero también es necesario que la utilización de subproductos industriales y agrícolas empleados para la producción de hormigón activado con álcalis que aporta importantes beneficios a los objetivos de sostenibilidad y de viabilidad.

La industria de la construcción requiere materiales que alcancen la resistencia requerida y los demás requisitos de propiedades especificados en los códigos y normas, a la vez que demuestren criterios de sostenibilidad mejorados, así como lo manifiestan Fernando y sus colaboradores (2021, p.1). De esta manera nace el concreto geopolimérico que es un aglutinante cementoso inorgánico que tiene propiedades ingenieriles únicas y buena durabilidad ante distintos agentes agresivos químicos y físicos, que para su fabricación no requiere elevado consumo de energía industrial y emite bajos niveles de emisiones de CO₂ ya que se produce a través de la mezcla de materiales de silicato y activadores alcalinos, que

actualmente es conocido como cemento activado por álcali, que está unido por dos muestras de materiales tales como: 1) aluminosilicato, humo de sílice, cenizas volantes (FA), metacaolín (MK), lodo rojo, arcillas calcinadas, residuos de vidrio, relaves de minas de cobre, zeolita, CCA , “escoria de alto horno granulada molida”, cenizas de ichu (CI), y sus colaboradores y 2) soluciones de activación alcalinas tales como el NaOH y Na₂SiO₃ (Kathirvel & Sreekumaran, 2021; Bellum y otros, 2021). Cuando los aluminosilicatos se mezclan con las soluciones alcalinas líquidas concentradas estas reaccionan (Zeynab y otros, 2017; Bazan et al., 2020).

Como dicen Singh y Middendorf, (2020), Ahmad y sus colaboradores., (2020) la tecnología del geopolímero presenta una buena perspectiva para usar residuos industriales, la fabricación y las propiedades de los geopolímeros dependen de la caracterización física y química de los aluminosilicatos, de las soluciones de activación alcalina y de la naturaleza del curado dando lugar a una estructura densa que proporciona una alta resistencia mecánica temprana y buena resistencia a los agentes atmosféricos y también sirve como material de reparación ambientalmente sostenible en concretos con cemento portland que se encuentra deteriorados. Con base en Fahim Hussein y sus colaboradores (2017, p.1) se prefieren los aglutinantes de geopolímeros porque generan entre un 70% y un 80% menos de CO₂ para producir el cemento Portland ordinario.

De acuerdo con Mrityunjay y Bindhu (2016) los aluminosilicatos utilizados en la fabricación de geopolímeros presentan una diversidad de impurezas, esto, por la naturaleza de su origen; por ello, que es complicado pronosticar el mecanismo de polimerización, uno de los materiales utilizados como aluminosilicatos es la CCA que es un producto derivado de los molinos de arroz, donde la cáscara de arroz es utilizada como combustible en la caldera generando una gran cantidad de CCA.

Para que la CCA sea un material extremadamente puzolánico es necesario tener bajo control la temperatura de la quema, para esto es necesario realizar pruebas previas de resistencia para poder determinar la óptima actividad puzolánica y de esta manera ser usada como sustituto del cemento en el concreto (Pham & Tran, 2020), lo mencionado también es sustentado por Rithuparna y sus colaboradores (2021) afirmando que el tratamiento térmico mejora el rendimiento

puzolánico al disminuir la pérdida por ignición, y que la temperatura óptima de combustión de las CCA oscila entre 500 y 700 °C, también afirma que la molienda de las cenizas ayuda a aumentar su índice de actividad puzolánica que sería por encima del 75%, registrando una mejora de la prueba a la compresión entre 10-50%, lo mencionado también lo podemos verificar con Newaz et al., manifestando que para obtener las propiedades deseadas de la propiedades deseadas de la CCA, es esencial una combustión controlada y una buena molienda son esenciales, es difícil obtener toda la ceniza en forma reactiva de sílice amorfa ya que parte de la ceniza se convierte en forma cristalina donde la incorporación de la ceniza de cáscara de arroz incinerada tiene un efecto significativo en las propiedades del hormigón geopolimérico (Newaz Khan et al., 2015).

La óptima temperatura de quemado ayuda a desarrollar la mayor cantidad de sílice tal como se afirma desde la posición de Anjani y sus colaboradores, (2017) mencionando que la CCA está compuesta en porcentaje respecto a su masa total de los siguientes compuestos químicos, 95.60% de Sílice (SiO_2), 0.20% de Magnesio (MgO), 0.30% de Óxido de Calcio (CaO) y 1.20% de Óxido de Hierro (Fe_2O_3), sobresaliendo la sílice como el compuesto con mayor porcentaje, sin embargo para temperaturas de quemado entre 500 – 600 °C de la CCA la cantidad de Sílice disminuye a 86.76% y para los otros compuestos los porcentajes serían: 0.0038% de Al_2O_3 , 2.468% de CaO y 0.887% de MgO (Abd-Ali & Kadhim, 2020).

Por otro lado, desde el criterio de Skariah y sus colaboradores., (2021) las CCA tienen una gran viabilidad a ser utilizados como materiales puzolánicos en concretos de geopolímeros con las especificaciones estructurales requeridas para construcción tal punto de vista se relaciona con lo manifestado por Rajan y Kathirvel, (2021), ellos indican que este innovador material sostenible ha surgido con la finalidad de reemplazar el cemento con la posibilidad de reducir el impacto ambiental hasta un 80% en la producción del concreto.

Por tal motivo se necesita realizar estudios de nuevos materiales que permitan elaborar un nuevo concreto a base de soluciones alcalinas de NaOH y Na_2SiO_3 con materias primas como CCA para de esta manera poder reducir el uso

del cemento y mitigar el impacto negativo que causa al medio ambiente debido a la contaminación con CO₂ producto de su fabricación.

Según Siriwan, (2017) plantea que los poliméricos inorgánicos o geopolímeros, surgen como un material potencial innovador en el campo de la construcción como un producto ecológico y que el término “geo” da referencia a las fuentes geológicas de aluminosilicatos y que desde la posición de Mabroum y sus colaboradores., (2020) van a reaccionar con la solución alcalina para llegar a formar un gel amorfo por la reacción de policondensación explicando la derivación de “polímero”. Los geopolimeros fueron desarrollados por primera vez por Joseph Davidovits en la década de 1970 (Wattimena y sus colaboradores., 2017; Leite y Vasconcelos, 2019). La fuente de aluminosilicatos puede ser de origen natural como arcillas caoliníticas, humo de sílice (SF), cenizas volcánicas (FA), metacaolín (MK), lodo rojo (RM),etc., u origen remante como cenizas volantes, escorias de siderúrgicas o de alto horno, y sus colaboradores (Cárdenas Pulido y otros, 2019; Burduhos Nergis et al., 2018; Khater, 2019), teniendo en cuenta lo mencionado por Amran y sus colaboradores (2021a), estos materiales son muy versátiles ya que no solo sirve en el ámbito de la construcción, sino también como material ignifugo, radioactivo, para artefactos decorativos, conductores eléctricos, y sus colaboradores.

De igual manera hay que tener en cuenta la opinión de Mehta y Siddique, (2016) que, a pesar de los diversos resultados positivos existentes, se tiene que considerar también el hecho que cada componente de desecho tendrá sus características físicas, químicas y mircológicas. Según lo manifestado por Shehata y sus colaboradores., (2021); Kumer, (2018) las cenizas volantes están compuestas principalmente por silicio, aluminio, calcio y hierro, de estos se debe tener en cuenta el porcentaje de calcio, pues un aumento de este elemento se manifiesta en la mejora de la prueba a la compresión.

Según Garces y sus colaboradores (2021) plantea como una alternativa de solución sustentable es el empleo de las cenizas volantes (FA), como elementos en la fabricación de geopolímeros; así como también lo manifiestan Toniolo & Boccaccini, (2017) que los principales residuos sólidos que se producen al quemar

hulla en las industrias eléctricas pueden formar parte de la producción de geopolímeros, lo descrito se puede verificar en el estudio realizado por Haozhe y sus colaboradores., (202) donde manifiesta que el uso de cenizas volantes como insumo para la preparación de geopolímeros activados aumenta la resistencia, lo que muestra el potencial correcto de las cenizas volantes, evitando que estas sean eliminadas en los rellenos sanitarios perjudicando las fuentes de agua y generando la contaminación del suelo y la salud humana tal como lo mencionan Alyousef y sus colaboradores., (2020); Majhi, y sus colaboradores., (2021), Por lo tanto, es fundamental desarrollar nuevas tecnologías para convertir los desechos en productos de valor agregado (Gökhan y Gökhan , 2019), que con base en Singh y Middendorf, (2020); Giergiczny, (2019) se puede adoptar dos formas: (i) El cemento Portland puede ser reemplazado en parte por cementos suplementarios, o (ii) producción de cemento sin clínker. Además, las cenizas tipo F como las de tipo C contienen trazas de metales pesados, como As, Cd, Co, Cr, Pb, Sb y Zn, haciendo que los costos de tratamiento para su eliminación lleguen a ser hoy en día muy elevados (Shehata y otros, 2021).

Por este motivo la principal preocupación sobre los geopoliméricos es el contenido en contaminantes que tienen, que podría darle un potencial de peligrosidad. Por ello, muchas investigaciones se han realizado sobre el comportamiento de lixiviación de sus contaminantes y estos mecanismos no se comprenden del todo en la actualidad, lo que si se llega a demostrar es que pueden ser inmovilizados eficazmente en las matrices geopoliméricas (Bobirică et al., 2017; Arruda Pereiraa et al., 2019).

Como lo hacen notar Amran y sus colaboradores., (2021b), en la producción de geopolímeros tiene un efecto significativo la concentración de álcalis y el curado, ya que estos pueden afectar las propiedades de los materiales y la microestructura de estos, y que desde el punto de vista de Singh y Middendorf, (2020), una mayor concentración del NaOH disminuye la resistencia mecánica del geopolímero. Otro factor que llega a influir según Cong & Cheng, (2021) es la eflorescencia, que consiste en la formación de sales en la superficie del concreto cuyos componentes principales son Na_2CO_3 , NaHCO_3 y varios componentes de silicato de sodio.

A juicio de Hassan, Arif, y Shariq, (2019) es importante considerar los activadores alcalinos de los geopolímeros tales como los carbonatos, hidróxido potasio o hidróxido, silicatos, o una amalgamación de ellos y se debe tener en cuenta el acoplamiento tanto del precursor como del activador alcalino, requerido por la desemejanza química. Por ejemplo, la solución de silicato de sodio ofrece mayor reacción al desecho granulado de alto horno (GGBFS) que otros activadores alcalinos, pudiéndose obtener una alta resistencia temprana con una relación de masa $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O} = 0.75$ de la solución de Na_2SiO_3 (SS). Villaquirán Caicedo y sus colaboradores., (2015) refiere que opta por el NaOH; SH en la producción del impulsor alcalino de las cenizas volantes, ya que este cuenta con mayor disponibilidad comercial y es uno de los más económicos.

De acuerdo con Carter y sus colaboradores., (2020), una solución activadora muy usada es aquella constituida por hidróxido de sodio y humo de sílice con cemento al 25% como suplencia parcial, para lo cual el Hidróxido de sodio se produce en solución saturada al 50% (en masa); sin embargo, para este activador se tendrá en cuenta sus limitaciones a nivel mundial para reducir su uso y por ende mejorar la disponibilidad y reducción de costos del concreto geopolímero (Chen y otros, 2016; Shehata y otros, 2021).

Como lo hacen notar Apolonio y sus colaboradores., (2020), el Na_2SiO_3 es un reactivo que se produce a alta temperatura o en un esterilizador a alta presión, es el insumo más impactante desde el criterio energético, ya que demanda el 63,4% de la energía y es responsable del 67,2% de la emisión de CO_2 , además de ser el más costoso, y que según Nuaklong y sus colaboradores., (2021) su elaboración involucra la quema de arena de cuarzo y carbonato de sodio a casi $1500\text{ }^\circ\text{C}$, por lo que es necesario contar con fuentes alternativas de activadores que tengan ventajas en términos precio y/o huella ambiental, por ello, Torres-Carrasco y Puertas, (2017); Villaquirán-Caicedo y Mejía-de Gutiérrez, (2015) proponen a la CCA y nano sílice, sean evaluadas como fuentes de sílice de sustitución en estos activadores alternativos.

Sin embargo también se puede considerar los desechos que provienen de las actividades industriales y agroindustriales como son las cenizas volantes de

carbón, la CCA, la ceniza de bagazo de caña de azúcar, la escoria de alto horno tal como lo sustentan Laxman y sus colaboradores., (2020) mencionando que dichos materiales aluminosilicatos amorfos, que pueden no ser cementosos de forma natural, pero que al reaccionar con el hidróxido de calcio Ca(OH)_2 y agua forman compuestos cementosos, y que se usan como materia prima en el geopolímero, y que a juicio de Liang y sus colaboradores., (2019) tienen un gran potencial para apoyar las propiedades integrales de estos concretos, especialmente en criterios de durabilidad, buena prueba a la compresión desde temprana edad, y que según Ionescu y Lăzărescu, (2020); Hosan y sus colaboradores., (2016); Apolonio y sus colaboradores., (2020) mencionan que tienen buena resistencia al fuego.

Tal como lo hacen notar Mohajerani y sus colaboradores., (2019) los materiales ya mencionados se les puede añadir áridos que constituyen el 75 a 80% (Mohajerani y otros, 2019) para formar hormigón geopolimérico, que con base Singh, (2020); Chithambar y sus colaboradores., (2020) el geopolimero es un inédito modelo de hormigón que tendrá una elevada demanda en la manufactura de la construcción. Es necesario resaltar que los geopolimeros son significativamente más ligeros que el concreto convencional elaborados con Cemento Portland, según el estudio realizado por Öztürk manifiesta que los geopolimeros de 12M, tienen un peso unitario promedio de 1535 kg/m^3 y 1692 kg/m^3 con una relación de SS/SH de 2 y 2.5 respectivamente (Öztürk, 2021), pero lo investigado por Alsaif et al, indican que el peso unitario promedio del geopolimero es de 2134 kg/m^3 (Alsaif y otros, 2022), similares resultados obtuvieron los investigadores Topçu y Sofuoğlu cuyos pesos unitarios promedios de los geopolimeros son de 1950 kg/m^3 (Topçu & Sofuoğlu). Otra propiedad física como el contenido de aire también es importante medir, para el caso del estudio realizado por Kotop et al. el contenido de aire de los geopolimeros elaborados variaron entre 2.4 – 3.4% (Kotop y otros, 2021), en otra investigación el contenido de aire varía entre 1.5 – 1.70% tal como lo mencionan los investigadores Saloni et al. (Saloni y otros, 2021).

El geopolímero ha surgido como una potencial alternativa ecológica para sustituir el hormigón de cemento Portland utilizado convencionalmente ya que la producción de cemento no solo consume una gran cantidad de energía y materias

primas sino también libera una cantidad significativamente alta de gases de efecto invernadero a la atmósfera, especialmente CO₂. Por otro lado, los materiales de partida para la preparación de geopolímeros son materiales de desecho, reciclados y subproductos. requiriendo menos energía y que los gases que se libera producto de la producción es menor, de esta manera el uso de subproductos como las cenizas de paja de trigo, metacaolín, ceniza de cáscara de arroz, ceniza volante, residuos de vidrio, escoria de fósforo y escoria de alto horno son materiales favorables debido a su alta reactividad química para la geopolimerización y para formar la estructura tridimensional de alúmina y sílice proporcionando excelentes propiedades mecánicas y térmicas, alta durabilidad y baja contracción (Payakaniti et al., 2018; El-Sayed & Shaheen, 2020). También otra propiedad a rescatar es la densidad ya que esta varía 1.876 hasta 2.555 gr/cm³, que van desde 8 a 16M de NaOH según lo indicado por los investigadores (Pan y otros, 2015; Diaz-Loya, y otros)

Finalmente los compuestos convencionales a base de cemento Portland son intrínsecamente débiles bajo esfuerzos de tracción, debido a su alto cociente de fragilidad, y el problema se agrava aún más en los compuestos de geopolímeros, es importante fortalecer esa debilidad que tiene dichos compuestos con el refuerzo de algún tipo de fibra en el hormigón convencional de cemento Portland para de esta manera modificar su carácter de frágil a dúctil o casi dúctil junto con un aumento significativo de las características mecánicas y de durabilidad (Farhan et al., 2021; Dassekpo et al., 2021; Noushini et al., 2018).

1.2 Antecedentes de la investigación:

(Lianasari y otros, 2015) en su investigación titulada: Sifat mekanik beton geopolimer berbasis solid material abu terbang (fly ash) dan abu sekam padi (rice husk ash) dengan alkaline activator sodium silikat dan sodium hidroksida, cuyo *objetivo* fue determinar la prueba a la compresión de geopolímero de cenizas volantes y las CCA que tiene contenido de SiO₂, provenientes de la central eléctrica de Paiton y de la quema de geopolimeros respectivamente. Su *metodología* reemplazar las cenizas volantes por las CCA de la siguiente manera 100:0; 80:20; 60:40; 40:60 ; 20:80; 0: 100 en un geopolímero de 12 M. Los *resultados* de la prueba a la compresión a los 28 días de acuerdo con la composición sólida fueron de 21.20 MPa, 10.32 MPa, 7.09 MPa, 4.08 MPa, 3.05 MPa, 2.96 MPa respectivamente.

Concluyó que el geopolímero con una composición de 100 % de cenizas volantes se puede utilizar como hormigón estructural, pero al reemplazar una parte de las cenizas volantes con CCA en el precursor puede reducir significativamente la prueba a la compresión del geopolímero.

(Somna et al., 2022) en su investigación titulada: Rice husk ash and fly ash geopolymer hollow block based on NaOH activated, tuvo como objetivo utilizar la ceniza de cáscara de arroz (CCA) para producir bloques de geopolímero de cáscara de arroz y cenizas volantes (FA) basados en el NaOH activado. Su *metodología* fue utilizar proporciones de CCA a FA de 10:90, 20:80, 30:70, 40:60 y 50:50 en peso y 14 molares de hidróxido de sodio para luego ser sometidas a pruebas a la compresión de la pasta geopolimérica se ensayadas a los 7, 28 y 60 días, también se caracterizó la microestructura del bloque mediante técnicas de SEM y de barrido. Los resultados mostraron que el aumento del contenido y la finura de CCA aumentó la prueba a la compresión del geopolímero mezcla con un contenido del 50% de CCA, es decir, la mezcla 50FA50RH-15 M con una prueba a la compresión a los 28 días de 8,5 MPa y microestructura del bloque de geopolímero de CCA y FA mostró la presencia de los productos de la reacción de geopolimerización con una pequeña cantidad de partículas de CCA y FA sin reaccionar. Concluyen que el geopolímero de ceniza de cáscara de arroz y cenizas volantes pueden utilizarse con una resistencia a la compresión conformes a la norma.

(Dimas & Arie , 2019) en su investigación titulada: Penggunaan abu sekam padi sebagai bahan substitusi fly ash pada mortar geopolimer dengan naoh 8 molar ditinjau dari kuat tekan dan porositas, tuvo como *objetivo* determinar la relación óptima y la influencia de la sustitución de CCA por cenizas volantes en la prueba a la compresión, la porosidad y el tiempo de fraguado. Su *metodología* fue elaborar especímenes de mortero de geopolímero de cubos de 5x5x5 cm con NaOH (SH) 8 Molar y Na₂SiO₃ (SS) como activadores, la relación SS / SH fue de 1,5 con el contenido sólido de la mezcla activadora (w / s) de 0,45 y la sustitución de la CCA como sustituto parcial de las cenizas volantes fueron 2.5, 5, 7.5, 10 y 12%. Los resultados determinaron que cuando se sustituyó la ceniza volante por CCA al 2.5, 5, 7.5, 10 y 12%, la prueba a la compresión a los 28 días fue de 33.91, 37.21, 39.41, 31.77 MPa y 27.30 MPa respectivamente mostrando que la proporción óptima de

sustitución de CCA a ceniza volante fue de 7,5% con los resultados de 28 días de prueba a la compresión a 39,41 MPa. *Concluyó* que al aumentar la sustitución de CCA a ceniza volante la prueba a la compresión a los 28 días disminuye.

(Januar et al., 2016) en su investigación titulada: Perancangan Mortar Geopolimer Abu Sekam, cuyo *objetivo* fue determinar la prueba a la compresión del mortero geopolímero en base a la variación del módulo activador, la dosis del activador, el tiempo y la temperatura de curado. Su *metodología* fue elaborar especímenes de mortero de geopolímero de cubos de 5x5x5 cm con NaOH 18 Molar (SH) y Na₂SiO₃ (SS) como activadores, y como aglutinante la CCA. Los *resultados* mostraron que los geopolimeros elaborados a 12, 14, 16 y 18M obtuvieron pruebas a la compresión de 9.87, 10.93, 12 y 14 MPa respectivamente. *Concluyó* que al aumentar la molaridad del NaOH mejora la prueba a la compresión del geopolímero.

(Rosyadi, , 2021) en su investigación titulada: Prototipe Semen Geopolimer Berbasis Fly Ash Tipe C dengan Pengaruh Substitusi Abu Limbah Sekam Padi, cuyo *objetivo* fue determinar la prueba a la compresión del mortero de geopolímero en base a la variación del módulo activador, la dosis del activador, el tiempo y la temperatura de curado. Su *metodología* fue realizar la mezcla en seco, en el que el activador alcalino en forma sólida se mezcla con las cenizas volantes y la CCA para producir un geopolímero al que luego se le añade agua en el proceso de colada, utilizando la proporción de activadores de 1:1 y NaOH al 14M, hay varias composiciones que comparan la proporción de cenizas volantes y cenizas de cascarilla de arroz que son 100:0, 95:5, 90:10 y 85:15. Los *resultados* mostraron que las pruebas referidas a la norma SNI 2049:2015 sobre el cemento portland muestran que el geopolímero sin utilizar CCA tiene una prueba a la compresión que cumple con las normas, pero el tiempo de fraguado es demasiado rápido, mientras que en los utilizando la sustitución del 5% y el 10% de CCA tiene una mayor prueba a la compresión y puede aumentar el tiempo de fraguado, pero la adición de un 15% de CCA hace que el tiempo de fraguado sea demasiado largo y reduce la prueba a la compresión. *Concluyó* que el elevado contenido de calcio en las cenizas volantes de tipo C puede producir significativamente una elevada prueba a la compresión, pero tiene un tiempo de fraguado rápido, la CCA absorbe una enorme

cantidad de agua y contiene un elevado contenido de óxido de sílice para retrasar el tiempo de fraguado y aumentar la prueba a la compresión.

(Ilmiah, 2017) en su investigación titulada: Pengaruh Penambahan Abu Sekam Padi Sebagai Pozzolan Pada Binder Geopolimer Menggunakan Alkali Aktifator Sodium Silikat (Na_2SiO_3) Serta Sodium Hidroksida (NaOH), cuyo *objetivo* fue determinar la prueba a la compresión del mortero geopolímero en base a la variación del módulo activador, la dosis del activador, el tiempo y la temperatura de curado. Su *metodología* fue utilizar la CCA y cenizas volantes para estudiar el efecto de la adición de CCA como puzolana en el geopolímero y cenizas volantes utilizando el álcali activador del Na_2SiO_3 y el NaOH como comparación en el tiempo de fraguado y la prueba a la compresión, con la composición de 100 % de CCA, 100 % de ceniza volante, mezcla de 50 % de CCA y 50 % de ceniza volante. Los *resultados* mostraron que los geopolimeros elaborados con la relación de cenizas volantes y CCA a 100:0, 50:50 y 0:100% obtuvieron pruebas a compresión de 43.32 MPa, 7.65 MPa y 2.58 MPa respectivamente. *Concluyó* que la CCA puede aumentar potencialmente el tiempo de fraguado debido a que almacena agua en su cavidad y requiere de mucha agua para mezclar, pero hace disminuir la prueba a la compresión del geopolímero.

(Indrayani y otros, 2020) en su investigación titulada: Comparison of the use of fly ash dan rice husk ash in the making of geopolymer concrete, cuyo *objetivo* fue determinar la prueba a la compresión del mortero geopolímero en función a la variación del reemplazo de la ceniza volante por la CCA. Su *metodología* fue utilizar pruebas a los agregados, la prueba a la compresión del hormigón normal y al geopolímero con una mezcla de solución alcalina en forma de NaOH y Na_2SiO_3 llevado a cabo a los 28 días, para el caso de los áridos en el hormigón alcanza el 70% - 75% del volumen total de la masa sólida del hormigón y las soluciones alcalinas, de NaOH y Na_2SiO_3 , en una proporción de 1:1, 1:3 y 1:5, la solución de NaOH se realizó a 8M. Los *resultados* mostraron para el concreto normal se obtuvo una prueba a la compresión de 23.26 MPa, y para los geopolimeros con NaOH y Na_2SiO_3 , en una proporción de 1: 3 y 1; 5 se obtuvieron pruebas a la compresión de 23.78 MPa y 39.56 MPa respectivamente. *Concluyó* que el geopolímero con la CCA no puede utilizarse como concreto estructural, mientras que la ceniza volante

puede utilizarse como concreto estructural en la proporción de NaOH y Na₂SiO₃ a 1: 3 y 1: 5, donde en la proporción de 1: 3 aumentó un 2,18% y en la proporción de 1:5 aumentó un 41,20%.

(Shaik Numan y otros, 2022) en su investigación titulada Strength and durability properties of geopolymer paver blocks made with fly ash and brick kiln rice husk ash cuyo *objetivo* fue el desarrollo de bloques de pavimento geopolimérico utilizando cenizas de cáscara de arroz de hornos de ladrillos. Su metodología fue en elaborar adoquines de geopolimero con las siguientes combinaciones, 12 molar de NaOH + 100% de cenizas volantes pulverizadas silíceas + 0% de bloques mezclados con cenizas volantes (12GFA100), 12 molar de NaOH + 95% de cenizas volantes pulverizadas silíceas + 5% de bloques mezclados con cenizas volantes (12GFR9505), 10 molar de NaOH + 100% de cenizas volantes pulverizadas silíceas + 0% de bloques mezclados con cenizas volantes (10GFA100), 10 molar de NaOH + 95% de cenizas volantes pulverizadas silíceas + 5% de bloques mezclados con cenizas volantes (10GFR9505), los cuales fueron sometidos a pruebas de prueba a la tracción y a la compresión. Los resultados arrojaron que la prueba a la compresión a los 28 días aumentó en 30%, 31%, 26% y 29% para las mezclas 12GFA100, 12GFR9505, 10GFA100 y 10GFR9505 respectivamente con respecto a la mezcla patrón, que la prueba a la tracción las mezclas 12GFA100 y 12GFR9505 aumentó en un 29% y un 33% respectivamente mayor que la mezcla de control, y que para las mezclas 12GFA100 y 12GFR9505 demostraron un aumento de 42% y un 43% respectivamente mayor que la mezcla de control y que las mezclas 10GFA100 y 10GFR9505 aumentó en un 36% y un 41% respectivamente mayor que la mezcla de control. Concluyendo que la sustitución de cenizas volantes y bloques mezclados con cenizas volantes hubo una mejora significativa en la prueba a la tracción, la flexión y una mejora insignificante en la prueba a la compresión.

(Billong y otros, 2018) en su investigación titulada Performance of sodium silicate free geopolymers from metakaolin (MK) and Rice Husk Ash (CCA): Effect on tensile strength and microstructure, tiene como *objetivo* estudiar el efecto de la CCA en el rendimiento de las pastas geopolímeras de metacaolín fresco y endurecido, centrándose en la prueba a la tracción y la microestructura. Su

metodología fue sustituir parcialmente al metacaolín por un 12,5-50% de CCA en las mezclas sólidas y se hizo reaccionar con una solución de hidróxido de sodio 10 M en condiciones ambientales de 20 ± 3 °C y $70 \pm 5\%$ de humedad relativa utilizando una relación líquido/sólido de 0,95. Los *resultados* arrojaron que Las pastas de geopolímeros en las que se sustituyó el metacaolín con hasta un 25% de CCA mostraron una mejora en la trabajabilidad y la prueba a la tracción en comparación con la mezcla de metacaolín sin CCA como sustitución. Concluyendo que la mejora de la prueba a la tracción se debió a la densificación de la matriz y a la reducción del efecto negativo de la contracción por secado y de las microfisuras.

(Sudhakarreddy y otros, 2018) en su investigación titulada Flexural behaviour of cement added geopolymer concrete, tuvo como *objetivo* mejorar el comportamiento a flexión del Hormigón Geopolímero (GPC). Su *metodología* fue sustituir entre el 2 y el 6% de las cenizas volantes fueron sustituidas por cemento o en el GPC. Los resultados indicaron que la combinación anterior, la sustitución parcial de las cenizas volantes por cemento en el GPC muestra un mejor rendimiento en las propiedades mecánicas del GPC. Los resultados de las pruebas revelaron que las vigas GPC con sustitución del 6% de cemento en las cenizas volantes muestran mejores resultados en la prueba a la compresión, así como en la flexión y el tiempo de fraguado también se reduce considerablemente en comparación con la sustitución de 6% de cenizas volantes. La viga con sustitución de 6% de cemento muestra una menor deflexión y un mayor momento de resistencia que la viga que se sustituye con 6% de cenizas volantes.

(Teewara & Mitzi, 2017) en su investigación titulada Effect of manufacturing process on the mechanisms and mechanical properties of fly ash-based geopolymer in ambient curing temperature, tiene como *objetivo* es definir el efecto de los procedimientos de fabricación sobre los mecanismos y las propiedades mecánicas de los geopolímeros a base de cenizas volantes a temperatura de curado ambiental, junto con el desarrollo de un nuevo proceso de fabricación de la mezcla preseca. Su *metodología* fue realizar 3 tipos de procesos de mezclado, proceso A que consistió en mezclar primero las cenizas volantes con el NaOH para luego mezclar el Na_2SiO_3 , proceso B que consistió primero el NaOH con el Na_2SiO_3 para luego mezclar las cenizas volantes y el proceso C que consistió en mezclar en seco

las cenizas volantes el NaOH con el Na₂SiO₃ al mismo tiempo para luego colocar el agua, esta cantidad de agua es la misma que se añadió en los procesos A y B. El *resultado* arrojado fue que el mejor proceso de combinación para la fabricación del geopolímero fue el proceso A obteniendo una prueba a la compresión a los 28 días de 135.9 kg/cm², con los procesos B y C se obtuvieron resistencias a la compresión a los 28 días de 132.40 kg/cm² y 112.9 kg/cm² respectivamente. Concluyendo que el proceso de fabricación A proporcionó una mayor resistencia que los procesos de mezcla B y C.

(An y otros, 2022) en su investigación titulada Strength development and microstructure of recycled gypsum-soda residue-GGBS based geopolymer, tuvo como objetivo fabricar geopolímeros que tenían concentraciones de 0%, 5%, 10% de yeso reciclado (RG) y 60%, 70%, 80% de residuo de sosa (SR) en peso seco como sustituto parcial de la escoria granulada de alto horno (GGBS), los resultados revelaron que la resistencia del geopolímero elaborado en RG-SR-GGBS disminuye al aumentar la dosis de SR y mejora con el aumento de la edad de curado y una dosis por encima del 10% de yeso reciclado como sustituto parcial del GGBS disminuyó la resistencia del geopolímero, mientras que una concentración del 5% fue beneficiosa para aumentar el valor de la prueba a la compresión a 93.1 kg/cm².

(Ramakrishna & Sundararajan, 2019) en su investigación titulada Long-term strength and durability evaluation of sisal fiber composites, tuvo como objetivo en fabricar geopolímeros con cenizas volantes reforzados con fibras de sisal a 0.25, 0.50, 1.0, 1.50 y 2.00%, cuyos resultados fueron que la prueba a la compresión obtenido a los 28 días de curado fue de 90 kg/cm². Concluye que la prueba a la compresión del geopolímero aumenta con la incorporación de las fibras de sisal.

(Gholampour y otros, 2022) en su investigación titulada, Mechanical and durability properties of natural fiber-reinforced geopolymers containing lead smelter slag and waste glass sand, tuvo como objetivo determinar las características de los geopolímeros reforzados con fibras naturales que albergan arenas de desecho y subproductos industriales reforzados con fibras de origen vegetal de 1 y 2% de fibras de coco, yute, sisal ramio, cáñamo y bambú, por fracción de volumen de agregados finos, presentando una mayor prueba a la compresión.

(Ruiz, 2017) en su investigación titulada Preparación y caracterización de geopolímeros empleando como materia prima CCA tuvo por *objetivo* la valorización y aprovechamiento de dos residuos para la obtención de materiales de construcción sostenibles, mediante el método de geopolimerización. Su metodología fue combinar las CCA y polvo de filtro de de la producción de aluminio secundario (PFA) las cuales fueron activadas alcalinamente con la solución de NaOH y Na₂SiO₃ con 6, 8, 10, 12, 14 y 16 de relación molar de SiO₂/Al₂O₃. Cuyos resultados fueron. Los *resultados* fueron que las menores cantidades de resistencia a compresión de aproximadamente de 0.5 MPa con las relaciones molares de Si/Al de 4 y 5, y para los geopolímeros con relaciones molares Si/Al=6 y 7 pruebas a compresión de 1,7 MPa. y las densidades variaron entre 0.717 gr/cm³ hasta 0.835 gr/cm³ desde 8 a 14 Molar. *Concluyó* que La resistencia a compresión del geopolimero mejoro a través del tiempo y con la relación Si/Al.

1.3 Formulación del problema de investigación

¿Cómo influirá la CCA con yeso y fibras de ichu en la elaboración de geopolimeros, afectará a su resistencia mecánica?

1.4 Delimitación del estudio

La presente investigación tiene limitaciones de espacio o territorio, limitaciones de tiempo y de recurso.

Limitaciones de espacio o territorio

La investigación se realizará en la Región Lambayeque, en la provincia de Ferreñafe ya que la cáscara de arroz se adquirirá en los molinos situados en dicha provincia y de la misma manera los agregados se obtendrán de las canteras de Ferreñafe.

Limitaciones de recursos

Se cuenta delimitada información de la elaboración de geopolimeros con CCA, con yeso y fibras de ichu, sólo se encontró información de geopolimeros con CCA y cenizas volantes, y geopolimeros con cenizas de alto horno, fibras de acero y y sus colaboradores. Se usará cáscara de arroz de la ciudad de Ferreñafe, de la cual

se realizará primero pruebas para determinar la óptima temperatura de quemado y de esta manera obtener la CCA con la mejor actividad puzolánica. Se usará el NaOH en escamas y el Na₂SiO₃ con una razón de óxido de sodio / óxido de silicio de 2, con una densidad promedio de 1.526 gr/cm³, con pH de 13 de solución acuosa al 1%. Las pruebas que se realizarán son: pruebas a tracción indirecta, flexión, compresión y determinación de los módulos elásticos. Se utilizaron los procesos A, B y C recomendado por (Teewara & Mitzi, 2017) para poder producir el geopolimero, una vez que se realizará las pruebas se determinará el mejor resultado, y al cual se le incorporará las fibras de ichu en determinados porcentajes detallados en la metodología del presente trabajo de investigación.

Limitaciones de tiempo

Se cuenta delimitada capacidad de tiempo ya que los tiempos para poder realizar las pruebas de compresión simple del geopolimero, ya que debe ser las roturas en los tiempos exactos establecidos y no se debe pasar ya que el factor tiempo es un indicador fundamental para evaluar la prueba a la compresión del geopolimero.

1.5 Justificación e importancia de la investigación

La presente investigación tiene una justificación teórica, metodológica, práctica, social, tecnológica y ambiental.

Justificación teórica:

Se generarán nuevos conocimientos en las características mecánicas de los geopolimeros con CCA, yeso y fibras de ichu, con la finalidad de generar consideración y discusión académica sobre el conocimiento y contrastando resultados para producir epistemología del conocimiento, que podrá ser usado como referencia para posteriores investigaciones básicas y aplicadas, esta justificación esta alineada con lo manifestado por Bernal, 2010.

Justificación metodológica

Se propone una nueva estrategia y técnica en la metodología la presente investigación, para de esta manera poder explicar la nueva generación de conocimientos, buscando una nueva forma de hacer investigación, la justificación metodológica se realizará de manera comparativa a través de pruebas de rotura de testigos de geopolimeros, dando origen a una investigación experimental, donde los diseños de las mezclas de geopolimero se realizará en el laboratorio para poder determinar la molaridad del NaOH y los porcentajes óptimos de CCA, yeso y fibras naturales de ichu, para así evaluar la resistencia del geopolimero. Esta justificación metodológica está alineada con lo manifestado por Bernal, 2010

Justificación practica

Sigue una secuencia o un desarrollo que ayuda a encontrar una solución fáctica a través de la secuencia de pruebas sistematizadas de la presente investigación que dará origen a la interpretación de los resultados y a la creación del geopolimero que es un nuevo producto amigable con el medio ambiente, ayudando en el decrecimiento de las generaciones de CO₂ provenientes de la producción del cemento Portland. Esta justificación práctica está alineada con lo manifestado por Bernal, 2010.

Justificación social.

La tasa de crecimiento poblacional sigue en aumento por tanto la demanda de construcciones de edificaciones ha crecido de manera exponencial, por eso es que el empleo del geopolímero es una alternativa para poder realizar construcciones de edificaciones sostenibles y resistentes que ayudará a mitigar el impacto negativo al medio ambiente. Los beneficiarios directos sería todas las personas ya que con el empleo de geopolimero ayudaría a reducir el consumo del cemento y por tanto disminuiría la contaminación del medio ambiente por la generación del CO₂.

Justificación tecnológica

Es la producción de un nuevo material sostenible que va permitir elaborar un nuevo concreto a base de residuos industriales con una solución de

activación alcalina generando un material con propiedades mecánicas únicas en pruebas a la tracción, compresión y flexión.

Justificación ambiental

Con la producción de geopolímeros ayuda reducir la producción mundial del cemento que para su fabricación necesita elevado consumo de energía industrial emitiendo importantes emisiones de CO₂ y también se disminuiría la explotación de la caliza que es un material importante para la producción del Clinker, generando un negativo impacto ambiental.

Importancia

La importancia de la presente investigación es el estudio de nuevo material considerado amigable con el medio ambiente, durable que cumple con las características mecánicas iguales o mayores a la de un concreto a base del cemento Portland convencional, y de esta manera reducir las generaciones de CO₂ que se presentan al fabricar el cemento. Por otro lado, también ayudaría a disminuir la explotación de la caliza que sirve para la producción del Clinker

1.6 Objetivos de la investigación

Objetivo General

Determinar la influencia de la ceniza de cáscara de arroz con yeso y fibras de ichu en la elaboración de geopolímeros para determinar la resistencia mecánica.

Objetivos Específicos

1. Evaluar la actividad puzolánica de las CCA con respecto a la prueba a la compresión con un $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$, y caracterización de las propiedades químicas de la óptima temperatura de quemado.
2. Caracterizar la resistencia a la compresión de los geopolímeros usando combinaciones de hidróxido de sodio al 8, 10, 12 y 14M con el silicato de sodio y las CCA.

3. Caracterizar la resistencia a la compresión de los geopolímeros usando combinaciones de hidróxido de sodio al 8, 10, 12 y 14M con el silicato de sodio y las CCA, con porcentajes de yeso en 10, 20, 30, 40 y 50% de yeso en peso de la CCA.
4. Caracterizar las propiedades mecánicas de los geopolímeros usando el óptimo porcentaje de yeso con las combinaciones de mezcla: $((\text{CCA}+\text{NaOH})+\text{Na}_2\text{O}_3)+\text{Yeso}$), $((\text{CCA}+(\text{NaOH}+\text{Na}_2\text{O}_3))+\text{Yeso})$ y $((\text{CCA}+\text{NaOH}+\text{Na}_2\text{O}_3)+\text{Yeso})$ de los geopolímeros.
5. Caracterizar las propiedades mecánicas de los geopolímeros usando combinaciones de fibras naturales de Ichu a 0.5, 1, 1.5 y 2% en peso de la CCA con la combinación óptima de geopolímero de las CCA con los álcalis de NaOH, Na_2SiO_3 y el óptimo porcentaje de yeso.
6. Características microestructurales del mejor geopolímero resultante de la combinación de las CCA con los álcalis de NaOH, Na_2SiO_3 y óptimo porcentaje de yeso a 10, 20, 30, 40 y 50% y el porcentaje óptimo de fibra de ichu a 0.5, 1, 1.5, 2%.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Fundamentos teóricos de la investigación

Geopolímero

Según Davidovits, (2013); Singh y Middendorf, (2020) manifiestan que el geopolímero es un compuesto innovador y una opción real al concreto convencional. Se basa en insumos naturales subproductos mínimamente tratados para minimizar significativamente su huella de carbono, además de ser muy resistente a muchas de las dificultades de durabilidad que pueden simular a los concretos convencionales. El Geopolímero en estado fresco es un fluido alcalino compuesto por aluminio (Al) y silicio (Si) formando un aglutinante de aluminosilicatos tridimensionales que se originan prontamente y a baja temperatura por aluminosilicatos naturales con una configuración semejante a las zeolitas, en una red polimérica, la tecnología de geopolimerización presenta un gran potencial de impacto ambiental positivo ya que muchos materiales de desecho industrial ricos en alúmina y sílice, como cenizas de carbón, “escorias de altos hornos”, relaves de minas, y sus colaboradores y pueden utilizarse como materiales precursores en un proceso que requiere menos energía y menos emisiones frente a la tecnología convencional actual, como la del cemento portland. Sin embargo, la gran desigualdad entre estos dos reside en que durante la geopolimerización, una vez el polvo de aluminosilicato se agrega con la solución alcalina se origina una pasta que endurece prontamente, no habiendo mucho tiempo y espacio para que el gel o pasta pueda desarrollarse en una estructura bien cristalizada. La tecnología de geopolímeros propuesta por primera vez por Joseph Davidovits en 1972 que muestra una disminución de la generación de CO₂ a la atmósfera de hasta el 80%.

Para el presente estudio del hormigón geopolímero se realizó bajo los siguientes parámetros:

- Slump, según la normativa ASTM C143
- Prueba a la compresión, según la normativa ASTM C39
- Prueba a la flexión, según la normativa ASTM C78

- Prueba a la tracción por rotura, según normativa ASTM C496
- Módulos elásticos

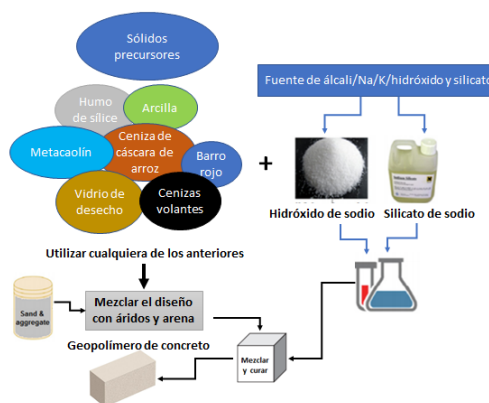
Principales componentes de los geopolímeros

- Materiales de origen: materiales de desecho industrial ricos en alúmina y sílice, como CCA, cenizas de carbón, escorias de altos hornos, relaves de minas, y sus colaboradores.
- Líquidos alcalinos: NaOH o KOH y Na_2SiO_3 .

La geopolimerización tiene etapas de lixiviación, difusión, condensación y endurecimiento, mientras que la síntesis de zeolitas está relacionada con la pre-nucleación, nucleación y crecimiento de cristales, además los geopolímeros se curan a temperaturas inferiores a las requeridas para la fabricación de zeolitas. Los causantes que afectan la síntesis de zeolitas son la temperatura, el pH y los cationes, y se cree que estos tres causantes también perjudican la geopolimerización, por tanto, se requiere de una disolución medida de los materiales de origen en una solución alcalina adecuada para la geopolimerización (Dassekpo et al., 2021). El procedimiento de geopolimerización se visualiza en la Figura 3.

Figura 3

Proceso de geopolimerización



Nota. Se visualiza el procedimiento de preparación que se tiene para poder elaborar el geopolímero, se observa los materiales precursores y los alcalis como el NaOH y Na_2SiO_3 . Tomado de Singh y Middendorf, (2020)

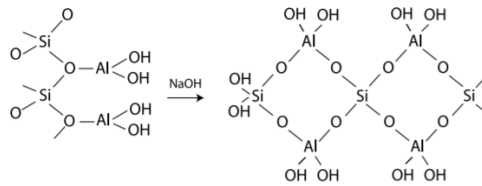
2.2 Marco Conceptual

Según Davidovits, (2020) el geopolimero es un material aglutinante a base de alúmina y sílice proveniente de desechos industriales y agroindustriales que al ser mezclados con el hidróxido de sodio o de potasio y el silicato de sodio o de potasio generan la reacción de geopolimerización. El uso de los geopolímeros se está investigando en muchas áreas científicas e industriales: química física, química coloidal, química inorgánica moderna, geología, mineralogía y en todo tipo de tecnologías de procesos de ingeniería. La amplia variedad de aplicaciones potenciales incluye: materiales resistentes al fuego, monumentos de piedra decorativa, aislamiento térmico, material de construcción de baja tecnología, baldosas cerámicas de baja energía, artículos refractarios, refractarios de choque térmico, aplicaciones de fundición, cementos y hormigones, compuestos para reparación y refuerzo de infraestructuras, compuestos de alta tecnología para interiores de aeronaves y automóviles, sistemas tecnológicos, contención de residuos radioactivos y tóxicos, artes y decoración, patrimonio cultural. Esto es debido porque la caolinita aluminosilicato reacciona con NaOH entre 100 – 150 ° C y se policondensa en sodalita hidratada que es un tectoalumino-silicato o hidroxisodalita tal como se muestra en la Figura 4. Todo inició a partir de patentes que cubre la síntesis de zeolitas y tamices moleculares, esencialmente en la forma de polvos - quedó claro que esta geoquímica hasta el 2008 no ha sido investigada para la producción de aglutinantes minerales y polímeros minerales, del cual se inició el desarrollo de materiales de silico-aluminato tridimensionales amorfos a semicristalinos, llamados geopolímeros (polímeros minerales resultantes de la geoquímica o geosíntesis) (Davidovits J. , 2020).

Las primeras aplicaciones fueron productos de construcción desarrollados en 1973 –1976, como los paneles de aglomerado resistentes al fuego, compuestos por un núcleo revestido con dos recubrimientos de nanocompuestos geopolímeros

Figura 4

Policondensación de caolinita $\text{Si}_2\text{O}_5, \text{Al}_2(\text{OH})_4$ en medio alcalino.



Nota. La caolinita aluminosilicato reacciona con NaOH entre 100 –150 ° C y se policondensa en sodalita hidratada que es un tectoalumino-silicato o hidroxisodalit, Fuente: (Davidovits, 2020)

Materiales que intervienen en un geopolímero

Cenizas volantes. Las cenizas volantes están formadas por los restos de materia orgánica, arcilla y arena presentes en carbón, que salen por la chimenea del horno durante la combustión. Las cenizas volantes son el fruto de las fuerzas de tensión superficial que actúan en la masa fundida para minimizar energía libre superficial. Algunas de las partículas también se hinchan por los gases liberados por el gas de combustión, o por el propio material de la sílice. Estas mezclas se funden en el horno, que luego se apagan prontamente en el aire para originar pequeñas partículas de vidrio, que por lo general son esféricas. Por lo tanto, las cenizas volantes son elementos muy variables que depende no de las impurezas presentes en el carbón antes de la quema, sino también de las peculiaridades del proceso de quema y enfriamiento. Las cenizas volantes que más son utilizadas en la síntesis de geopolímeros son bajas en Ca, es decir, de clase F según la norma ASTM C618 (Duxson, 2009).

Las reactividades de las cenizas volantes, y la naturaleza de los productos geopoliméricos producidos a partir de ellas, varían drásticamente. Sin embargo, hay tendencias adicionales que pueden identificarse comparando los datos de composición de las cenizas y de resistencia de los geopolímeros ya que cada muestra de cenizas volantes contiene una multitud de fases vítreas diferentes, es posible que cada una de estas fases comenzarán a cristalizar a diferentes temperaturas. Además, como cada uno de las propias partículas de cenizas volantes pueden ser completamente diferentes a otras, es posible que algunas

partículas se derritan a una temperatura que otras no, y puede dar resultados engañosos, por eso es importante la distinción entre un material cristalino y un material amorfo al considerar el comportamiento de disolución con los materiales alcalinos dando mayor resistencia mecánica a los geopolímeros, ya que las fases cristalinas tales como la mullita y el cuarzo se consideran no reactivas (Duxson, 2009), pero también se demostró que el mayor contenido amorfo no se traducía necesariamente en una mayor resistencia mecánica debido a la formación de especies intermedias que no pueden transferirse a la etapa de policondensación (Amari et al., 2021), sin embargo, la molienda de alta energía del tipo requerido para una reducción significativa de la proporción de las partículas provoca la fractura de la mayoría de las partículas presentes, lo que lleva al aumento observado en la demanda de agua (Rissanen et al., 2018).

Los geopolímeros son materiales compuestos que se forman a partir de insumos ricos en alúmina y sílice mediante disolución alcalina y posterior policondensación en una red polimérica. La geopolimerización es un proceso complicado responsable de la formación del geopolímero que consta de una disolución, reorganización, condensación y polimerización. La disolución y la reorganización del aluminosilicato forman varios tipos de oligómeros; los oligómeros se conectan y forman grandes polímeros (Yao et al., 2009; Martínez López, 2015). La tecnología de geopolimerización presenta un gran potencial de impacto ambiental positivo ya que los materiales precursores que conforman en la elaboración del geopolímero tales como los desechos industriales ricos en alúmina y sílice, como por ejemplo las cenizas de carbón, escorias de altos hornos, CCA entre otros generan menos energía y menos emisiones frente a la actual tecnología convencional con el cemento Portland ordinario (Martin Ernesto L. et al., 2021; Kalaw et al., 2021).

Según Hossain y sus colaboradores., (2021), la tecnología de los geopolímeros ofrece numerosas ventajas sobre el cemento portland ordinario (OPC), como la reducción de las emisiones de CO₂, las excelentes características físicas - mecánicas y la posibilidad de utilizar ingredientes de desecho. Los efectos de la inclusión de las CCA son notables en las propiedades como la trabajabilidad, el tiempo de fraguado, la prueba a la compresión y la durabilidad. Al evaluar el efecto de la CCA en el geopolímero, se atribuye a la incorporación de un 10-20 %

en peso de CCA la mejora de las propiedades a corto y largo plazo del geopolímero. Así, el uso de CCA es una vía sostenible y respetuosa con el medio ambiente, este resultado está un poco alejado de lo obtenido por Chao-Lung y Trong-Phuoc indicando que los especímenes preparados con una concentración de NaOH a 10 M y 35% de la CCA presentaban la mayor prueba a la compresión y que al aumentar la molaridad del NaOH y la cantidad de la CCA por encima de estos valores del esfuerzo a la compresión disminuía y el análisis químico evidenció que las principales fases cristalinas presentes en el geopolímero resultante eran el cuarzo, la mullita y la cristobalita, además, se detectaron fases menores de zeolita en todas las muestras de geopolímero (Chao-Lung & Trong-Phuoc, 2015)

Ceniza de cáscara de arroz: La CCA es un tipo de residuo de producto de arroz que tiene una característica particular que contiene sustancias químicas con características puzolánicas que contienen sílice y si se mezcla con cemento y agua podría aumentar la resistencia mientras que la sílice sea la sustancia dominante de la cáscara de arroz. La CCA es una biocarga agrícola proveniente de la quema de la cascara de arroz que es utilizada como combustible, la CCA sirve como insumo cementante suplementario debido a su actividad puzolánica porque posee compuestos principales tales como la sílice y la alúmina, por tal motivo la temperatura de calcinación debe de ser analizada previamente para poder determinar la mayor cantidad de sílice y alúmina que puede contener (Hossain et al., 2021).

Yeso. Es el resultado de la calcinación y trituración de la piedra de aljez, cuya hidratación del producto ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$), permite elaborar una pasta de mortero para diferentes fines constructivos

El activador suplementario yeso semihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$) es un reactivo de grado industrial. Por comodidad, en la presente investigación el yeso se refiere al yeso semihidratado. La Figura 9 muestra las composiciones minerales de los activadores sólidos del yeso a usar. El yeso usado se obtuvo de la deshidratación del $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ de las canteras ubicadas en la ciudad de Morrope en la Región Lambayeque (García et al., 2015).

Fibra de Ichu. La *Stipa Obtusa* es una planta de pasto comúnmente llamada ichu que se extiende a lo largo de la región andina, es una hierba, una especie

perenne, densa, con gran ahijamiento que puede desarrollarse de 20 – 50 cm de largo, numerosas hojas erectas y resistentes tan largas como el culmo, y panículas muy estrechas de 5.0 - 13.0 cm y de 1 a 2 mm de diámetro (Gire Quispe & Caceres Lupaca, 2019, pág. 32).

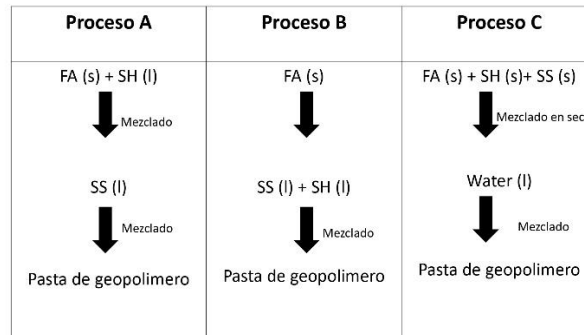
Se utilizó ampliamente hasta hace 50 años a lo largo de la región andina como material de construcción local en cubiertas y como material de cuerdas. Sin embargo, con el desarrollo de los nuevos materiales de construcción, su uso fue reduciendo paulatinamente. En los últimos años se estudió al ichu tratados con una solución alcalina de hidróxido de sodio para caracterizar sus propiedades como morfología, índice de cristalinidad, degradación térmica, ángulo de contacto y la energía superficial, mostrando buenos resultados (Mori y otros, 2019; Tenazoa y otros, 2019). Según Candiotti y sus colaboradores., (2020) concluye que las fibras obtenidas de la *Stipa Obtusa* muestran potencial y pueden competir con las fibras naturales comerciales como refuerzo en mezclas de matriz polimérica.

Un Geopolimero con CCA es aquel material compuesto por CCA rica en sílice con una solución alcalina que para este estudio dicha disolución está formada por hidróxido de sodio con el silicato de calcio, para su posterior policondesación en una red polimérica.

Líquidos alcalinos: son los materiales comunes utilizados como solución alcalina que combinados con los aluminosilicatos como las cenizas volantes producen geopolímeros, los líquidos alcalinos más usados son el NaOH y Na₂SiO₃, estos se mezclan con las cenizas volantes para producir la solución alcalina cuya molaridad de la solución alcalina puede variar de 8 a 14 Molar (M). La solución alcalina se puede preparar bajo 3 procesos A, B y C tal como se describe en la Figura 5. Pero primero se verifica que la CCA cumplan con la norma ASTM C618 y tanto el hidróxido de sodio (NaOH; SH) y el silicato de sodio (Na₂SiO₃; SS) se utilizarán como activadores alcalinos. La proporción en masa de la solución SS/SH fue de 1,50, mientras que la proporción en masa del líquido alcalino con respecto a las CCA y DC (A/CCA y A/DC) fue de 0,40 en todos los procesos de fabricación.

Figura 5

Diagrama de prueba de procesos de geopolímero.

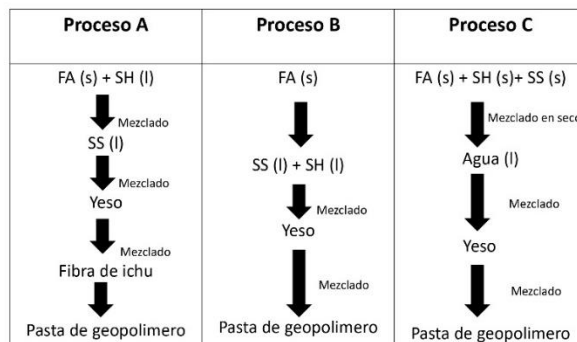


Nota. Se describe los procesos A, B y C para la mezcla de los materiales precursores y álcalis del geopolímero. Tomado de Teewara y Mitzi, (2017).

Para el presente estudio, los procesos de mezclado A, B y C fueron adaptados de acuerdo con la Figura 6, el yeso fue adicionado con el objetivo de acelerar el fraguado y mejorar las propiedades mecánicas del geopolímero hecho solamente con CCA y la adición de fibra de ichu es con el objetivo de mejorar las propiedades de resistencia del geopolímero.

Figura 6

Procesos de mezcla A, B y C adoptados en el presente estudio.



Definición operacional

CCA y Fibra de Ichu. La variable CCA y fibra de ichu será evaluada en el geopolímero a base de manera que ambas sea triturada y pasantes la malla 325 (45 μ m) y la fibra de ichu será incorporada en porcentajes de 0.5%, 1%, 1.5% y 2% en peso para el caso de la fibra y para el caso de la CCA será agregada según los 3 procesos detallados en la metodología, se cuantificará la prueba a la compresión, flexión y tracción del espécimen fabricado.

Geopolimeros. La variable geopolimeros a base de CCA se evaluó al mezclar componentes de la pasta del geopolimero que son CCA+NaOH+Na₂SiO₃, se utilizaron los procesos A, B y C recomendado por el cual se detalla a continuación:

Primero se verificó que la CCA cumplan con la normativa de American Society for Testing and Materials (ASTM), ASTM C618 y tanto el hidróxido de sodio (NaOH; SH) y el silicato de sodio (Na₂SiO₃; SS) se utilizaron como activadores alcalinos. La proporción en masa de la solución SS/SH fue de 1,50, mientras que la proporción en masa del líquido alcalino con respecto a las CCA y DC (A/CCA y A/DC) fue de 0,40 en todos los procesos de fabricación

Proceso de mezclado A. Tanto la CCA se mezclará inicialmente con la solución de NaOH, durante un periodo de 90 segundos para formar una pasta, durante un tiempo de parada de 30 s, se añadió a la mezcladora la solución de Na₂SiO₃. totalmente disuelta y se mezcló durante otros 90 s.

Proceso de mezclado B. Primero se mezclará bien las soluciones de NaOH y Na₂SiO₃. A continuación la solución combinada se añadirá al recipiente la CCA. La mezcladora se pondrá en marcha durante 90 s antes de detenerse para eliminar la pasta adherida al equipo de mezclado durante 30 s. A continuación, se volvió a poner en marcha la mezcladora y se hizo funcionar durante otros 90 s.

Proceso de mezclado C. La CCA, la perla de NaOH y el líquido de Na₂SiO₃ se mezclarán inicialmente en seco durante 90 s en la mezcladora. A continuación, se añadió a la solución la cantidad especialmente calculada de agua (la misma proporción de agua/sólido que se utilizó en los procesos A y B) y se mezcló durante 90 s. Después de 30 s de tiempo de parada para eliminar la pasta adherida del equipo de mezclado, se volvió a poner en marcha la mezcladora y se hizo funcionar durante otros 90 s.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1 Hipótesis central de la investigación

Influencia de las CCA con yeso e fibras de ichu en la elaboración de geopolimeros para determinar la resistencia mecánica.

H₀: Ningún tratamiento de las CCA, con yeso y fibras de ichu influirá positiva y significativamente en la elaboración de los geopolimeros para determinar la resistencia mecánica.

H_a: Al menos un tratamiento de las CCA con yeso y fibras de ichu influirá positiva y significativamente en la elaboración de los geopolimeros para determinar la resistencia mecánica.

3.2 Variables e indicadores de la investigación

Variable Independiente

- Temperatura de calcinación de la CCA,
- Porcentaje yeso deshidratado.
- Porcentaje de fibra de ichu.
- Molaridad del hidróxido de sodio

Variable Dependiente

- Comportamiento mecánico del Geopolimero con silicato de sodio para un concreto simple no estructural.

Tabla 1

Operacionalización de variables

Variables	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensión operacional	Indicadores	Unidad Medida	Instrumento
V.I: CCA, yeso y Fibra de Ichu	<p>La CCA es una biocarga agrícola producto de la quema de la cascara de arroz que es utilizada como combustible, la CCA sirve como insumo suplementario cementante debido a su actividad puzolánica porque posee compuestos principales tales como la sílice y la alúmina, por tal motivo la temperatura de calcinación debe de ser analizada previamente para poder determinar la cantidad la mayor cantidad de sílice y alúmina que puede contener (Hossain et al., 2021).</p> <p>El yeso Es el resultado de la calcinación y trituración de la piedra de aljez, cuya hidratación del producto ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$), permite elaborar una pasta de mortero para diferentes fines constructivos</p> <p>El activador suplementario yeso semihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$) es un reactivo de grado industrial. Por comodidad, en la presente</p>	<p>La variable CCA y fibra de ichu será evaluada en el geopolimero a base de manera que ambas serán trituradas y pasantes la malla 325 ($45 \mu\text{m}$) con porcentajes de 0.5%, 1%, 1.5% y 2% en peso para el caso de la fibra y para el caso de la CCA será agregada según los 3 procesos detallados en la metodología, se cuantificará la prueba a la compresión, flexión y tracción del espécimen fabricado</p>	Propiedades mecánicas	Prueba a la compresión	Kg/cm^2	Observación, revisión documentaria ficha de recolección de datos, equipo de laboratorio
				Prueba a la flexión	Kg/cm^2	
				Prueba a la tracción	Kg/cm^2	

	<p>investigación el yeso se refiere al yeso semihidratado. La Figura 9 muestra las composiciones minerales de los activadores sólidos del yeso a usar. El yeso usado se obtuvo de la deshidratación del $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ de las canteras ubicadas en la ciudad de Mórrope en la Región Lambayeque (García et al., 2015)</p> <p>La Stipa Obtusa es una planta de pasto comúnmente llamada ichu que se extiende a lo largo de la región andina, es una hierba, una especie perenne, densa, con gran ahijamiento que puede alcanzar hasta 60 cm de largo, numerosas hojas erectas y resistentes tan largas como el culmo, y panículas muy estrechas de 5-15 cm</p>					
V.D: Geopolimeros	<p>Los geopolímeros son materiales compuestos que se forman a partir de materiales ricos en alúmina y sílice mediante disolución alcalina y posterior policondensación en una red polimérica. La tecnología de geopolimerización presenta un gran potencial de impacto ambiental positivo ya que muchos materiales</p>	<p>La variable geopolimeros a base de CCA se evaluará al mezclar componentes de la pasta del geopolimero se realizará especímenes que</p>	<p>Propiedades mecánicas</p>	<p>Prueba a la compresión</p>	<p>Kg/cm^2</p>	

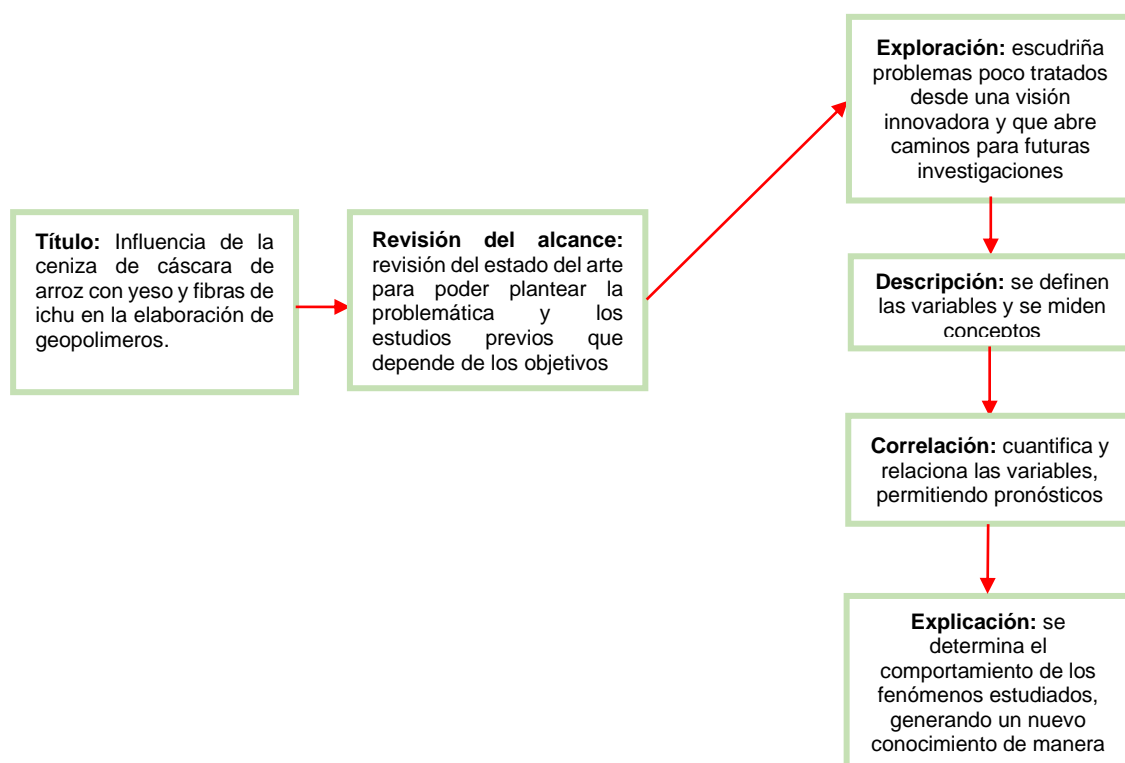
	de desecho industrial ricos en alúmina y sílice, como cenizas de carbón, escorias de altos hornos, relaves de minas, etc. menos energía y menos emisiones frente a la actual tecnología convencional con el cemento Portland ordinario (Martin Ernesto L. et al., 2021)	se someterán a pruebas de compresión, flexión y tracción indirecta		Prueba a la flexión	Kg/cm ²	
				Prueba a la tracción	Kg/cm ²	

Nota. Fuente: Elaboración propia

3.3 Métodos de la investigación

El presente estudio es una investigación de tipo aplicada experimental ya que resulta de la investigación exploratoria de las propiedades mecánicas de los materiales a usar, el cual va tener el siguiente proceso: a) revisión de los alcances b) exploratorio, c) descriptivo, d) correlacionar y e) explicativo, a Figura 7 se detalla el método de investigación usado en el presente estudio.

Figura 7
Esquema del proceso del método de investigación.



3.4 Diseño o esquema de la investigación

El diseño es experimental debido a que se va a manipular a voluntad del investigador una o varias variables del fenómeno estudiado las cuales se efectúan en circunstancias controladas, donde la influencia de las fuentes de invalidación interna es eliminada, así como el de otras como lo permite en el momento.

La presente propuesta de investigación será cuantitativa, ya que se medirán y analizarán valores numéricos, asimismo, será experimental debido a que la variable en estudio será manipulada bajo condiciones controladas.

El diseño estadístico que se utilizará en el presente estudio será un diseño completamente al azar (DCA) con arreglo factorial 4x4x5, lo que nos da 80 combinaciones, cada combinación tendrá 3 repeticiones, en la Tabla 2 y Ecuación 1 se detallan los factores y sus niveles considerados en el presente estudio.

Tabla 2
Factores de estudio de la quema de la CCA

Factor	Nivel (tratamiento)
T° de calcinación	600 °C
	650 °C
	700 °C
	750 °C
Molaridad del Hidróxido de sodio (NaOH)	8M
	10M
	12M
	14M
Concentración de yeso	10%
	20%
	30%
	40%
	50%

Nota. Fuente: Elaboración propia

El modelo matemático será:

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + (\alpha\beta)_{ij} + (\alpha\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\alpha\beta\gamma)_{ijk} + \varepsilon_{ijk} \quad (1)$$

Donde:

Y_{ijk} = Valor del i-ésimo nivel del factor A, j-ésimo nivel del factor B, k-ésimo nivel del factor C a la resistencia por compresión.

μ = media general

α_i = efecto del i-ésimo nivel del factor A.

β_j = efecto de j-ésimo nivel del factor B.

γ_k = efecto del k-ésimo nivel del factor C.

$(\alpha\beta)_{ij}$ = efecto de la interacción entre ambos factores.

$(\alpha\gamma)_{ik}$ = efecto de la interacción entre ambos factores.

$(\beta\gamma)_{jk}$ = efecto de la interacción entre ambos factores.

$(\alpha\beta\mu)_{ijk}$ = efecto de la interacción entre los factores.

ϵ_{ijk} = Error aleatorio.

En la Tabla 3 se muestra el ANOVA para el diseño factorial 4x4x5, esta tabla fue elaborada por el tesista tomando en cuenta las teorías realizadas por (Mohr y otros, 2021)

Tabla 3
ANOVA para el diseño factorial 4x4x5

Fuente de variabilidad	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F ₀	Valor-p
Efecto A	SC _A	a - 1	CM _A	CM _A / CM _E	P(F>F ₀ ^A)
Efecto B	SC _B	b - 1	CM _B	CM _B / CM _E	P(F>F ₀ ^B)
Efecto C	SC _C	c - 1	CM _C	CM _C / CM _E	P(F>F ₀ ^C)
Efecto AB	SC _{AB}	(a - 1)(b - 1)	CM _{AB}	CM _{AB} / CM _E	P(F>F ₀ ^{AB})
Efecto AC	SC _{AC}	(a - 1)(c - 1)	CM _{AC}	CM _{AC} / CM _E	P(F>F ₀ ^{AC})
Efecto BC	SC _{BC}	(b - 1)(c - 1)	CM _{BC}	CM _{BC} / CM _E	P(F>F ₀ ^{BC})
Efecto ABC	SC _{ABC}	(a - 1)(b - 1)(c - 1)	CM _{ABC}	CM _{ABC} / CM _E	P(F>F ₀ ^{ABC})
Error	SC _E	abc(n - 1)	CM _E		
Total	SC _T	abcn - 1			

Nota. Fuente: Elaboración propia

Para determinar el óptimo mezclado del geopolimero junto con la óptima molaridad del hidróxido de sodios y el óptimo porcentaje de yeso se realizará un ANOVA para diseño completamente al azar - DCA con diseño por bloques aleatorizados de dos factores, considerando 3 bloques con 3 tratamientos para cada factor, siendo estos independientes tal como se muestra en la Tabla 4. Pudiendo representarse bajo el modelo estadístico:

$$X_{ij} = \mu + \alpha_i + \beta_j + e_{ij} \quad (2)$$

$$i = 1,2,3; k \quad j = 1,2,3; r$$

Donde: α_i : es el efecto X del nivel i del factor procedimiento de mezclado (A, B, C), $i = 1,2,3; k$

β_j : es el efecto X del nivel j del factor tiempo de curado j (7, 14, 28 días),

$$j = 1,2,3;r$$

e_{ij} : es error aleatorio, siendo independientes y normales $N(0, \sigma^2)$.

Para determinar el óptimo porcentaje de fibra de íchu junto al óptimo mezclado del geopolimero, con la óptima molaridad del hidróxido de sodios y el óptimo porcentaje de yeso se realizará un ANOVA para diseño completamente al azar - DCA con diseño por bloques aleatorizados de dos factores, considerando 3 bloques con 4 y 3 tratamientos para cada factor, siendo estos independientes tal como se muestra en la Tabla 4.

En la Tabla 4 se muestra el ANOVA para los dos diseños completamente al azar – DCA, esta tabla fue elaborada por el tesista tomando en cuenta las teorías realizadas por (Mohr y otros, 2021).

Tabla 4
ANOVA para el diseño de DCA

Fuente de variabilidad	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	F_0	Valor- p
Tratamientos	$SC_{TRAT} = \sum_{i=1}^k \frac{Y_i^2}{n_i} - \frac{Y_{..}^2}{N}$	$k - 1$	$CM_{TRAT} = \frac{SC_{TRAT}}{k - 1}$	$CM_{TRAT} = CM_E$	$P(F > F_0)$
Error	$SC_E = SC_T - SC_{TRAT}$	$n - k$	$CM_E = \frac{SC_E}{N - k}$		
Total	$SC_T = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{n_i} Y_{ij}^2 - \frac{Y_{..}^2}{N}$	$n - 1$			

Nota. Fuente: Elaboración propia

Procedimiento para análisis de datos

Los datos obtenidos serán analizados a través del Análisis de Varianza (ANOVA) el cual nos ayudará a determinar según el Valor ($p < 0.05$), el efecto que tuvo cada una de las combinaciones en los parámetros establecidos a evaluar (prueba a la compresión, etc), asimismo, se estimarán los Coeficientes de Variabilidad (CV) y Coeficiente de Determinación (R^2), los cuales, según los rangos que arrojen, nos dirán el nivel de confiabilidad de los datos obtenidos.

Según el valor obtenido ($p < 0.05$), se procederá a utilizar la prueba de comparación de medias “DUNCAN”, con la cual podremos determinar que

combinación fue la que mejor resultados mostró para cada parámetro evaluado, asimismo, se podrá determinar la similitud estadística que existió entre las combinaciones.

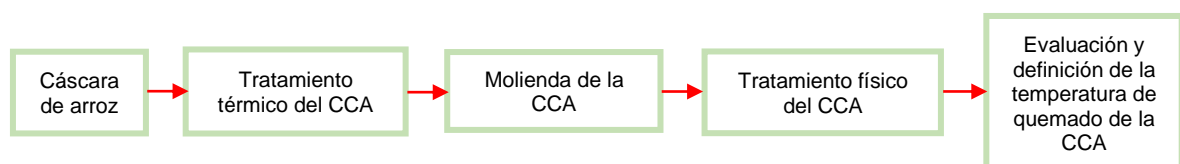
Procedimiento operacional.

Para identificar las variables de estudio es necesario definir el proceso considerando que las materias primas de estudio ya están identificadas. En la Figura 10 describe la sucesión del proceso inicial que implica la actividad puzolánica de la CCA. Donde el tratamiento térmico, la molienda, el tratamiento físico de la CCA fueron las variables de los estudios, mientras que la concentración de la CCA en el mortero se mantuvo constante.

De la Figura 8 el tratamiento térmico implica que a la cáscara de arroz se le quemó a 04 temperaturas diferentes que son a 600, 650, 700 y 750 °C. El tratamiento de molienda es un proceso en el que se somete a las CCA quemadas a la acción mecánica con el fin de tener partículas pequeñas. El tratamiento físico es el proceso de tamizado mecánico de la CCA por la malla de 45 μm , cuyo material pasante es el que se va a usar. La evaluación definición de la temperatura de quemado es un proceso que consiste en elaborar cubos de mortero de 5.00 x 5.00 x 5.00 cm de lado, el cual la CCA va a reemplazar al cemento en un 20% al cemento, según la norma ASTM C618 este proceso se aplicará a todas las temperaturas de quemado, para luego evaluar y definir la temperatura de quemado óptima, la cual será la que registre la mayor prueba a la compresión. Para poder evaluar los resultados de la prueba a la compresión se determinará la desviación estándar de cada temperatura de los especímenes ensayados a los 7, 14 y 28 días donde se determinará qué puntos estarían alejados que dará lugar a una desviación estándar mayor a la esperada comprobándose dichos resultados con un análisis empleando el R Studio.

Figura 8

Diagrama del proceso para definir la temperatura de quemado de la CCA.



Para el quemado de las cenizas se construyó un horno con paredes de ladrillo y techo metálico tal como se muestra en la Figura 9 quemando la cáscara de arroz a 600, 650, 700 y 750 °C, el quemado de la temperatura se controló con un termómetro que puede medir hasta 1200 °C, luego estas cenizas eran puestas en unas bandejas metálicas hasta que enfrían tal como se muestra en la Figura 10.

Figura 9

Calcinación de la cáscara de arroz y control de la temperatura con un termómetro.



Figura 10

Enfriamiento de las CCA.



Una vez obtenida la CCA tal como se muestra en la Figura 11, se procedió a realizar la trituración de la ceniza en un molino de bolas de 711 mm de diámetro y 508 mm de largo tal como se muestra en la Figura 12, para la molienda se usó esferas de acero con un promedio aproximadamente 46.8 mm de diámetro y cada una teniendo una masa de entre 390 y 445 gr., para luego tamizar la ceniza triturada por la malla N° 325 (45µm), tal como se visualiza en la Figura 13.

Figura 11

CCA a 600, 650, 700 y 750 °C triturada

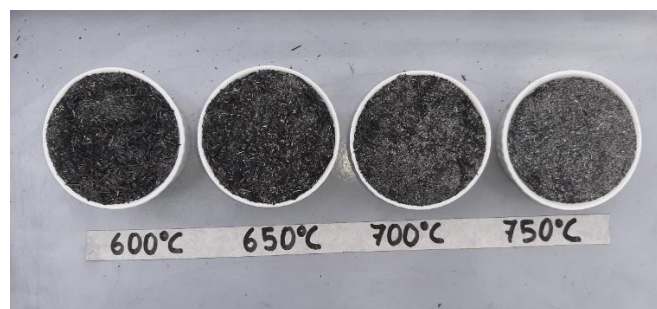


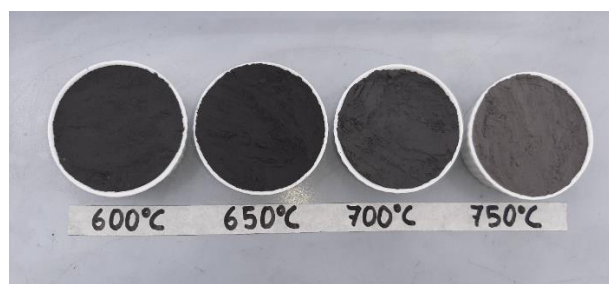
Figura 12

Molino de bolas usado para la molienda de la CCA.



Figura 13

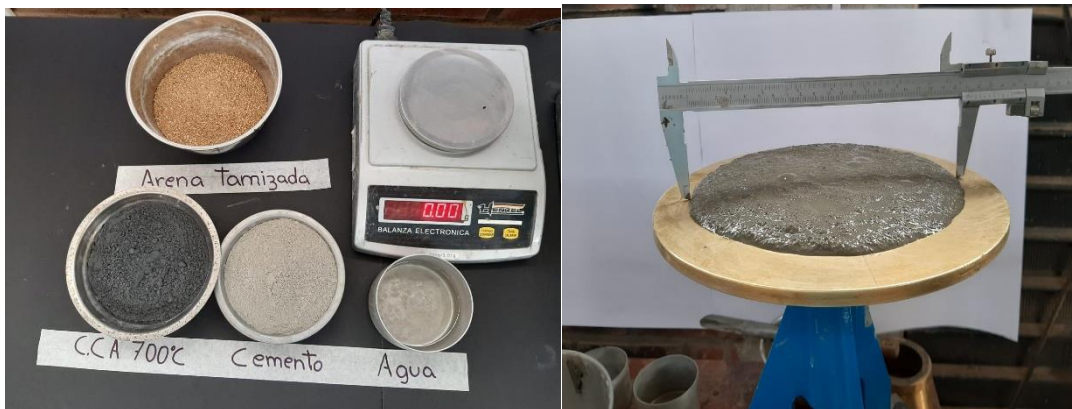
CCA a 600, 650, 700 y 750 °C triturada y pasante la malla N° 325 (45µm).



Luego se procedió a realizar la producción de los cubitos de mortero con CCA según la norma ASTM C618, midiendo primero la fluidez del mortero con ceniza para poder determinar la cantidad de arena y agua a usar, tal como se visualiza en la Figura 14.

Figura 14

Medición de la fluidez del mortero con CCA.



Una vez obtenida la fluidez, mejor dicho, las proporciones de CCA, arena gruesa, cemento y agua a las 4 temperaturas de quemado se procedió a la producción de los morteros, para luego proceder con el curado de los cubitos y a las roturas a 7, 14 y 28 días, estas roturas se compararon con la muestra patrón (MP) donde sólo se usó arena gruesa, cemento y agua tal como se visualizan en las Figuras 16, 17 y 18.

Figura 15

Producción de las muestras patrón, y morteros con CCA a 600, 650, 700 y 750 °C.



Figura 16

Curado de las muestras patrón, y morteros con CCAS a 600, 650, 700 y 750 °C.



Figura 17

Rotura de las muestras patrón, y morteros con CCA a 600, 650, 700 y 750 °C.



Propiedades químicas de la CCA proveniente de la óptima temperatura de quemado:

Debido a la complejidad de la muestra de la CCA y que las pruebas iniciales de análisis de algunos componentes mediante análisis clásicos pueden salir negativos, y que el contenido de óxidos en la muestra puede ser muy baja a excepción de la sílice, que se puede determinar gravimétricamente, es por esta razón se realizará un análisis por Espectroscopia de Emisión ICP OES, que reportaron valores bastante bajos para los óxidos. Con esos resultados se determinó que los análisis a la CCA deberían realizarse mediante Espectrofotometría de Absorción atómica.

Una vez pesadas las muestras de 1.00g en una balanza analítica, para luego proceder a realizar un pretratamiento a través de una calcinación de la muestra original a 900 °C por un periodo de 60 minutos, mediante el cual se eliminó la mayor parte del carbón, posteriormente se procedió a disolver los componente metálicos como óxidos de la muestra con 15 ml HCl y 5 ml de HNO₃ (agua regia) en un beaker de 400 ml con luna de reloj y se calentará en la plancha hasta apariencia pastosa, luego se deshidrato la sílice y se solubilizo los óxidos metálicos con 20 ml de HCl (1

+1) mediante calentamiento. Posteriormente se procedió a filtrar para separar el precipitado de la solución y se realizó los lavados con solución de HCl (1+9). El precipitado se empleará para la determinación de Sílice y las soluciones se enrazará en una fiola de 100 ml para realizar el análisis de los metales requeridos mediante Espectrofotometría de Absorción Atómica modo Flama, realizando las diluciones correspondientes tomando las alícuotas requeridas para cada caso, tal como se visualizan en las Figuras 18, 19 y 20.

Figura 18

Calcinación de la muestra para análisis de Sílice.



Figura 19

Muestras después de calcinación a 900°C.



Figura 20

Muestra disuelta y filtrada para análisis por absorción atómica.

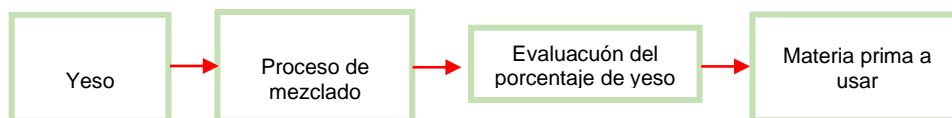


Porcentaje de yeso semhidratado:

La Figura 21 muestra la secuencia del proceso que se va a realizar al yeso, para determinar el porcentaje de yeso a usar en función al peso del material precursor que es la CCA. El proceso de mezclado consiste en realizar pruebas previas de resistencia mecánica en muestras de cubitos de 5 cm de lado cuya proporción de yeso varía desde el 10 hasta 50% de yeso en función al peso del material precursor que es la CCA. Para poder evaluar los resultados obtenidos de la prueba a la compresión se determinó la desviación estándar de cada porcentaje de los especímenes ensayados a los 7, 14 y 28 días.

Figura 21

Diagrama del proceso del tratamiento previo del yeso.



Porcentaje de fibra de ichu:

La Figura 22 muestra la secuencia del proceso que se le va a realizar a la fibra de Ichu para poder ser usada en la fabricación de los geopolímeros. El proceso de cortado consiste en cortar la fibra a través entre 4 cm de longitud, y el proceso químico alcalino consiste en hacer reposar la fibra de Ichu por un periodo de 24 horas en una concentración de 2.5% de NaOH tal como lo recomiendan (Gire Quispe & Caceres Lupaca, 2019) para luego ser secado al aire libre.

El procedimiento de selección de los insumos se realiza de acuerdo con lo descrito en la Figura 23, para la selección del hidróxido de sodio será en líquido variando su molaridad en 8, 10, 12 y 14M, para la selección del silicato de sodio será teniendo en cuenta que la relación óxido de sodio / óxido de silicio sea igual a 2. El proceso de mezclado de las materias primas será teniendo en cuenta los procesos de mezclado A, B y C explicados en el ítem 2.2. El procedimiento de curado será a temperatura ambiente. El proceso de evaluación de la óptima mezcla de las materias primas será ensayado al geopolímero endurecido a través de las pruebas de prueba a la tracción, compresión, flexión y módulos elásticos según las normativas ASTM C496, ASTM C39, ASTM C78, y ASTM C 469 respectivamente, tal como se muestran en las Figuras 24, 25 y 26, para luego hacer un análisis estadístico empleando el SPSS.

Figura 22

Diagrama del proceso del tratamiento previo de la fibra de Ichu.

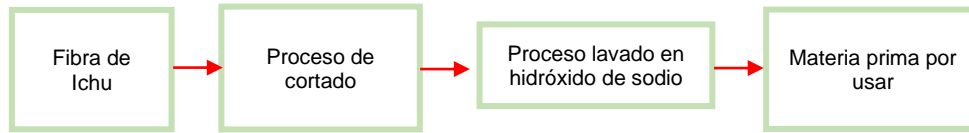


Figura 23

Diagrama del proceso del tratamiento de elaboración del geopolimero con CCA y fibra de Ichu.

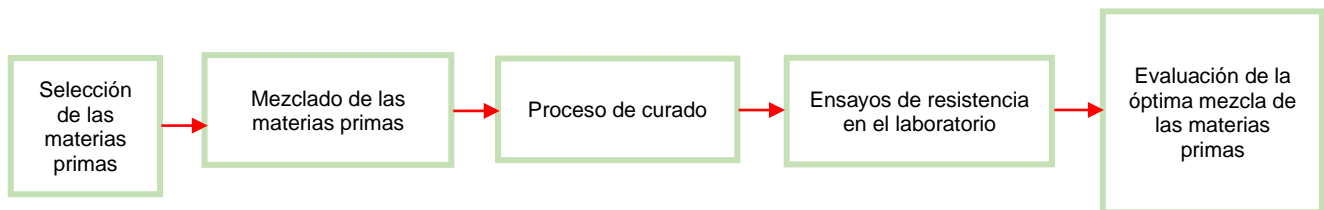


Figura 24

Prueba de prueba a la tracción de las muestras de geopolimeros según ASTM C496.



Figura 25

Prueba de prueba a la compresión y módulos elásticos de las muestras de geopolimeros según ASTM C496 y ASTM C 469.



Figura 26

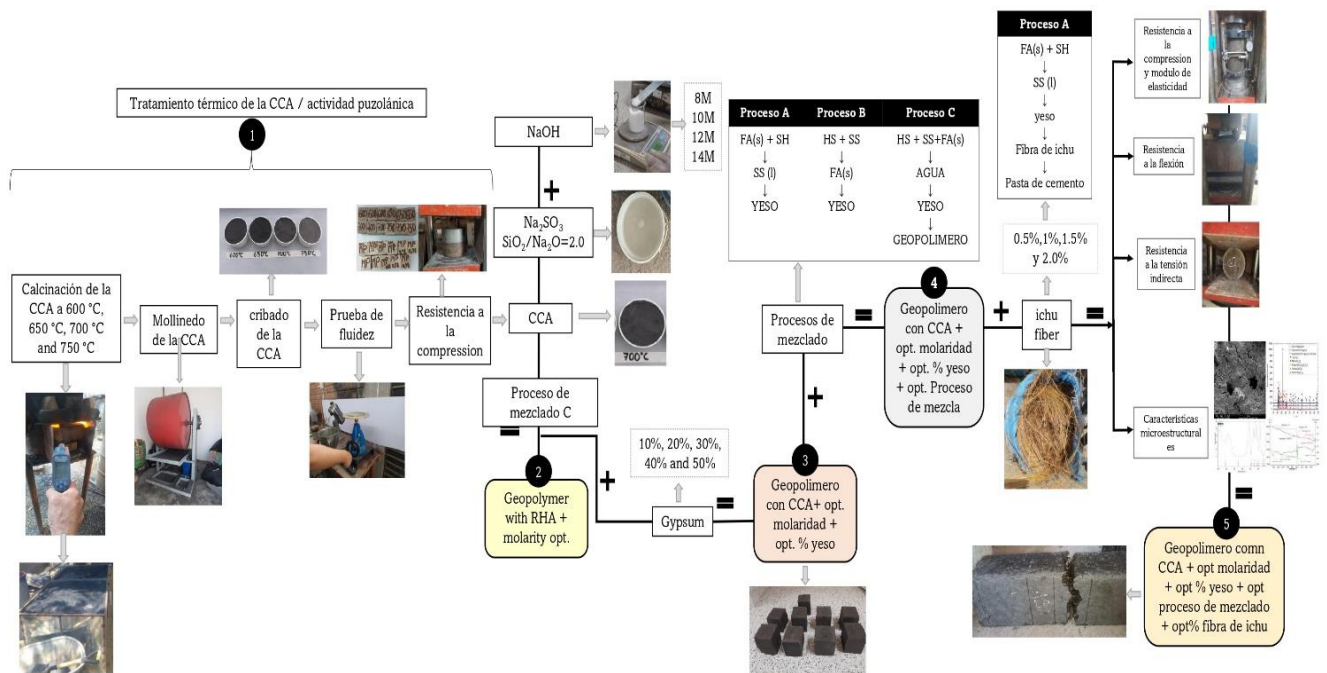
Prueba de prueba a la compresión y módulos elásticos de las muestras de geopolimeros según ASTM C496 y ASTM C 469.



En la Figura 27 se muestra el diagrama de flujo de la presente investigación, mostrando las actividades realizadas para poder determinar los resultados.

Figura 27

Diagrama de flujo de la presente investigación.



3.5 Población y muestra

Población

La población serán probetas cilíndricas y prismáticas de geopolímeros de concreto elaborados con CCA, fibra de lchu, álcalis de NaOH y Na_2SiO_3 , agregado grueso y fino.

Los especímenes cilíndricos fueron de 150 mm de diámetro y 300 mm de altura y se ensayaron según la normativa ASTM C39 para determinar la prueba a la compresión y la normativa ASTM C496 para determinar la prueba a la tracción indirecta, y los especímenes prismáticos fueron de 150 mm x 150 mm x 450 mm se sometieron a la prueba a la flexión según la normativa ASTM C78.

Muestra

Los geopolímeros de concreto se realizará bajo los procesos de mezclados A, B y C ya explicados. En cada proceso de mezclado se variará la molaridad del hidróxido de sodio de 8, 10, 12 y 14M, donde la relación entre el Na_2SiO_3 / NaOH es igual a 1.5, y la relación entre los pesos de los álcalis / CCA es igual a 0.40 y la cantidad de agregados grueso y fino se mantendrá en 75% del volumen de la mezcla de geopolímero donde las proporciones de agregado grueso y fino que ocupará el 75% de volumen se determinará según ACI 318. El curado será a medio ambiente, cuyas roturas de probetas será a 7, 14 y 28 días. La realización del curado se realizó en la ciudad de Chiclayo entre los meses de diciembre 2021 hasta abril del 2022 cuyas temperaturas máximas fueron de 29 °C, 31 °C y 29 °C en las fechas de 16 de enero, 28 de febrero y 8 de abril respectivamente las temperaturas mínimas fueron de 21 °C en los días 16 de enero y 8 de abril, la humedad máxima fue de 90% el día 22 de febrero, las radiaciones solares fueron de 6.6, 6.4, 6.3 y 6.1 kWh en los meses de enero, febrero, marzo y abril respectivamente (Weather Spark, 2022). Primero se evaluó el geopolímero elaborado sólo con la ceniza cáscara de arroz tal como se muestra en las Tablas 6, 7, 8 y 9 para determinar la resistencia de compresión óptima sólo con la CCA, segundo se evaluó el geopolímero elaborado con la ceniza cáscara de arroz, con las molaridades 8, 10, 12 y 14M, con los porcentajes de 10, 20, 30, 40 y 50% de yeso para poder determinar la óptima molaridad y el óptimo porcentaje de yeso tal como se muestra en las Tablas 10, 11, 12 y 13, tercero con lo determinado en

el paso 2 se evaluó el geopolímero con los procesos de mezclado A, B y C ya explicados anteriormente y de esta manera determinar el óptimo proceso de mezclado del geopolímero tal como se muestra en la Tabla 14, y cuarto con todo lo obtenido en el paso 3 se evaluó el geopolímero con los porcentajes de 0.5, 1.0, 1.5 y 2% de ichu para de esta manera determinar el porcentaje óptimo de ichu tal como se muestra en la Tabla 14.

Tabla 5

Muestras cúbicas de 5cm x 5cm x 5cm para evaluar la óptima temperatura de quemado de las CCA, según normativa ASTM C618

Temperatura (°C)	Días de curado	Porcentaje de ceniza a reemplazar (%)	Cantidad de especímenes
600	7	20	3
	14	20	3
	28	20	3
650	7	20	3
	14	20	3
	28	20	3
700	7	20	3
	14	20	3
	28	20	3
750	7	20	3
	14	20	3
	28	20	3
Total			36

Nota. Fuente: Elaboración propia

Tabla 6

Muestras cúbicas de 5cm x 5cm x 5cm para la elaboración de Geopolímeros con CCA a 8 molar para determinar la óptima prueba a la compresión con la CCA.

Molaridad	Procedimiento de Mezclado	Días de curado	Prueba por realizar	Cant.
8 Molar	Procedimiento C	7	Prueba a la compresión	3
		14		3
		28		3
TOTAL				9

Nota. Fuente: Elaboración propia

Tabla 7

Muestras cúbicas de 5cm x 5cm x 5cm para la elaboración de Geopolímeros con CCA a 10 Molar para determinar la óptima prueba a la compresión con la CCA.

Molaridad	Procedimiento de Mezclado	Días de curado	Prueba por realizar	Cant.
10 Molar	Procedimiento C	7	Prueba a la compresión	3
		14		3
		28		3
TOTAL				9

Nota. Fuente: Elaboración propia

Tabla 8

Muestras cúbicas de 5cm x 5cm x 5cm para la elaboración de Geopolímeros con CCA a 12 Molar para determinar la óptima prueba a la compresión con la CCA

Molaridad	Procedimiento de Mezclado	Días de curado	Prueba por realizar	Cant.
12 Molar	Procedimiento C	7	Prueba a la compresión	3
		14		3
		28		3
TOTAL				9

Nota. Fuente: Elaboración propia

Tabla 9

Muestras cúbicas de 5cm x 5cm x 5cm para la elaboración de Geopolímeros con CCA a 14 Molar para determinar la óptima prueba a la compresión con la CCA

Molaridad	Procedimiento de Mezclado	Días de curado	Prueba por realizar	Cant.
14 Molar	Procedimiento C	7	Prueba a la compresión	3
		14		3
		28		3
TOTAL				9

Nota. Fuente: Elaboración propia

Tabla 10

Muestras cúbicas de 5cm x 5cm x 5cm para la elaboración de Geopolímeros con CCA y yeso a 8 Molar

Molaridad	Porcentaje de yeso	Días de curado	Cant.
8 Molar	10%	7	3
		14	3
		28	3
	20%	7	3
		14	3
		28	3
	30%	7	3
		14	3
		28	3
	40%	7	3
		14	3

	28	3
	7	3
50%	14	3
	28	3

Nota. Para todos los casos se aplicará el procedimiento C y se realizará la prueba de prueba a la compresión. Fuente: Elaboración propia

Tabla 11

Muestras cúbicas de 5cm x 5cm x 5cm para la elaboración de Geopolímeros con CCA y yeso a 10 Molar

Molaridad	Porcentaje de yeso	Días de curado	Cant.
10 Molar	10%	7	3
		14	3
		28	3
	20%	7	3
		14	3
		28	3
	30%	7	3
		14	3
		28	3
	40%	7	3
		14	3
		28	3
	50%	7	3
		14	3
		28	3

Nota. Para todos los casos se aplicará el procedimiento C y se realizará la prueba de prueba a la compresión. Fuente: Elaboración propia

Tabla 12

Muestras cúbicas de 5cm x 5cm x 5cm para la elaboración de Geopolímeros con CCA y yeso a 12 Molar

Molaridad	Porcentaje de yeso	Días de curado	Cant.
12 Molar	10%	7	3
		14	3
		28	3
	20%	7	3
		14	3
		28	3
	30%	7	3
		14	3
		28	3
	40%	7	3
		14	3
		28	3
	50%	7	3
		14	3

Nota. Para todos los casos se aplicará el procedimiento C y se realizará la prueba de prueba a la compresión. Fuente: Elaboración propia

Tabla 13

Muestras cúbicas de 5cm x 5cm x 5cm para la elaboración de Geopolímeros con CCA y yeso a 14 Molar.

Molaridad	Porcentaje de yeso	Días de curado	Cant.
14 Molar	10%	7	3
		14	3
		28	3
	20%	7	3
		14	3
		28	3
	30%	7	3
		14	3
		28	3
	40%	7	3
		14	3
		28	3
50%	7	3	
	14	3	
	28	3	

Nota. Para todos los casos se aplicará el procedimiento C y se realizará la prueba de prueba a la compresión. Fuente: Elaboración propia

Tabla 14

Muestras de los especímenes para la elaboración de Geopolímeros con CCA, con la óptima molaridad y el óptimo porcentaje de yeso.

Molaridad	Procedimiento de Mezclado	Porcentaje de yeso	Días de curado	Prueba a realizar	Cant.
Óptima Molaridad	A	óptimo porcentaje de yeso	7	Prueba a la compresión / Módulos elásticos	3
			14		3
			28		3
			7	Prueba a la tracción	3
			14		3
			28		3
	B	óptimo porcentaje de yeso	7	Prueba a la flexión	3
			14		3
			28		3
			7	Prueba a la compresión / Módulos elásticos	3
			14		3
			28		3
B	óptimo porcentaje de yeso	7	Prueba a la tracción	3	
		14		3	
		28		3	
B	óptimo porcentaje de yeso	7	Prueba a la flexión	3	
		14		3	
		28		3	

		7	Prueba a la compresión / Módulos elásticos	3		
		14		3		
		28		3		
C	óptimo porcentaje de yeso	7	Prueba a la tracción	3		
		14		3		
		28		3		
		7	Prueba a la flexión	3		
		14		3		
		28		3		
		Total, de especímenes cilíndrico D=6"				27
		Total, de especímenes cilíndrico D=4				27
		Total, de especímenes prismáticos				27

Nota. El ensayo de resistencia a compresión se realizará con cilindros de 6", el ensayo de resistencia a tracción con cilindros de 4" y el ensayo de prueba a la flexión con prismas de 150 mm x 150 mm x 530 mm. Fuente: Elaboración propia

Tabla 15

Muestras de los especímenes para la elaboración de Geopolímeros con CCA, con la óptima molaridad, con el óptimo procedimiento de mezclado, con el óptimo porcentaje de yeso y la fibra de ichu.

Molaridad	Procedimiento de Mezclado	Porcentaje de yeso	Porcentaje de Fibra de Ichu	Días de curado	Prueba a realizar	Cant.		
Óptima Molaridad	Óptimo Mezclado	El óptimo porcentaje de yeso		7	Prueba a la compresión / Módulos elásticos	3		
				14		3		
				28		3		
				0,5%	7	Prueba a la tracción	3	
					14		3	
					28		3	
					7	Prueba a la flexión	3	
					14		3	
					28		3	
				1,0%	7	Prueba a la compresión / Módulos elásticos	3	
					14		3	
					28		3	
					7	Prueba a la tracción	3	
					14		3	
					28		3	
				1,5%	7	Prueba a la flexión	3	
					14		3	
					28		3	
					2,0%	7	Prueba a la compresión / Módulos elásticos	3
						14		3
						28		3
				7		Prueba a la tracción	3	

	14	3
	28	3
	7	3
	14	3
	28	3
	Prueba a la flexión	3
		3
Total, de especímenes cilíndrico D=6"		36
Total, de especímenes cilíndrico D=4"		36
Total, de especímenes prismáticos		36

Nota. La prueba de resistencia a compresión se realizará con cilindros de 6", la prueba de resistencia a tracción con cilindros de 4" y la prueba de prueba a la flexión con prismas de 150 mm x 150 mm x 530 mm. Fuente: Elaboración propia

3.6 Actividades del proceso investigativo

Primero se identificó el problema que es la contaminación ambiental debido a la fabricación del cemento, siendo esta contaminación aproximada de 1 tonelada de CO₂ por cada tonelada de cemento producido, planteándose como alternativa de solución la producción de un material llamado geopolímero, luego se plantearon los objetivos general y específicos, se realizó la búsqueda de la información a través de base de datos indexadas en Scopus, ScienceDirect, Web of Science, Scielo, repositorios de tesis de universidades nacionales e internacionales, para luego definir la metodología a emplear en la fabricación del geopolímero, se realizaron pruebas para poder determinar la óptima temperatura de calcinación de la ceniza de cáscara de arroz según la norma ASTM C618, se realizó las pruebas de laboratorio en estado fresco y endurecido del geopolímero empleando las normas ASTM C143, ASTM C1064, ASTM C138, ASTM C39, ASTM C496, ASTM C78, ASTM C469, para luego ordenar los resultados en Tablas y gráficos y discutir los resultados con investigaciones ya realizadas publicadas en revistas de alto impacto, por último realizar las conclusiones de la investigación, todo lo mencionado se ilustra en la Figura 28.

3.7 Técnicas e instrumentos de la investigación

Técnicas de recolección de datos

Observación. Mediante esta técnica se estudiará el proceso de mezclado de los álcalis con la CCA y la fibra de Ichu para generar el geopolímero mediante los 3 procesos descritos a diferentes molaridades de 8, 10, 12 y 14M del hidróxido de sodio para luego ser curados y ensayados a pruebas de prueba a la compresión, tracción y flexión.

Análisis de documentos. Mediante esta técnica se usó artículos científicos en base de datos indexadas, normas internacionales de la ASTM y American Concrete Institute (ACI), informes técnicos y libros relacionados con la fabricación de geopolímeros de concreto.

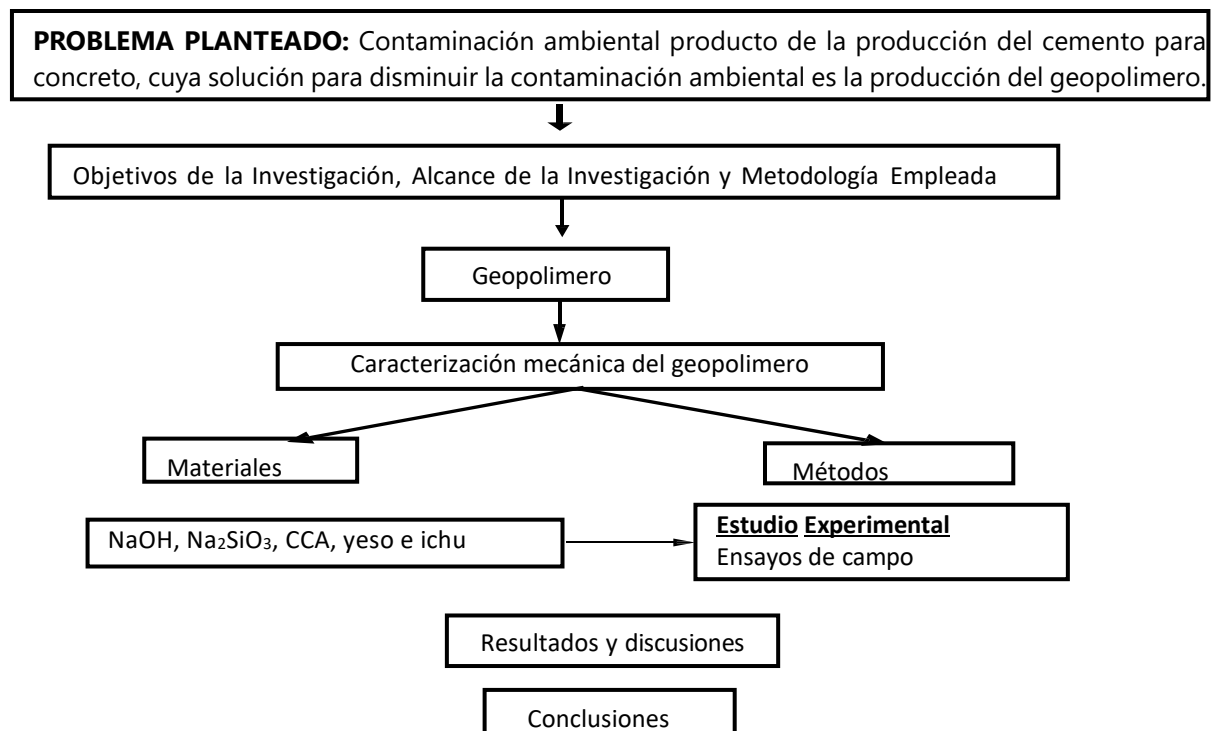
Instrumentos de recolección de datos

Guía de observación. La presente investigación tuvo como guías de observación a los diferentes formatos que el autor usó para poder anotar los resultados de las pruebas de resistencia que se realizó para determinar la actividad puzolánica de la CCA y para determinar el óptimo procedimiento de mezclado, la cantidad óptima molar del NaOH y el porcentaje óptimo de la fibra de Ichu.

Guía de análisis de documentos. La presente investigación usará las siguientes normativas internacionales vigentes: ASTM C143, ASTM C39, ASTM C78, ASTM C496 y ASTM C 469 y del ACI 318, en dichas normas están explicados de manera detallada los procesos de las pruebas y los cálculos previos que se deben de realizar para obtener los resultados finales.

Figura 28

Diagrama conceptual sobre la estructura de tesis.



3.8 Procedimiento de la recolección de datos

El procedimiento o secuencia que permitió entender el flujo del proceso de la presente investigación para de esta manera poder obtener los resultados y la contrastación de la hipótesis planteada inicialmente se muestra en la Figura 29.

3.9 Técnicas de procesamiento y análisis de los resultados

Ensayos realizados a los materiales pétreos

Granulometría. Se realizará de acuerdo a la normativa ASTM C136 usada tanto para el agregado grueso y fino, obteniendo el módulo de fineza y el tamaño máximo nominal

Peso unitario. Se realizará de acuerdo con la normativa ASTM C29 usada tanto para el agregado grueso y fino, que sirve para determinar el Peso unitario suelto y el peso unitario compactado.

Contenido de humedad. Se realizará de acuerdo con la normativa ASTM C566 usada tanto para el agregado grueso y fino utilizada para corregir el diseño por humedad de los componentes pétreos que van a formar el geopolímero de concreto.

Peso específico y absorción para agregado grueso. Se realizará de acuerdo con la normativa ASTM C127 usada tanto para el agregado grueso y fino, que sirve para obtener el peso específico saturado con superficie seca y aparente, peso específico seco y la absorción del agregado grueso.

Porcentaje de finos que pasan malla N°200. Se realizará de acuerdo a la normativa ASTM C177, utilizada para obtener determinar el grado de aceptación del agregado fino en lo que respecta al pasante la malla N°200 (75 μm).

Ensayos realizados al geopolímero en estado fresco y endurecido

Estado fresco:

Slump. Se ejecutará de acuerdo a la normativa ASTM C143 usada para obtener el asentamiento de la mezcla a través del cono de Abrahams.

Medición de la temperatura. Se ejecutará de acuerdo a la normativa ASTM C1064 utilizada para obtener la temperatura de la mezcla fresca.

Medición del contenido de aire. Se ejecutará de acuerdo a la normativa ASTM C138 utilizada para obtener el porcentaje de aire atrapado en la mezcla fresca.

Estado endurecido:

Prueba a la compresión. Se ejecutará de acuerdo con la normativa ASTM C39, utilizada para obtener la prueba a la compresión de la mezcla endurecida, esta prueba se realizará a los 7, 14 y 28 días.

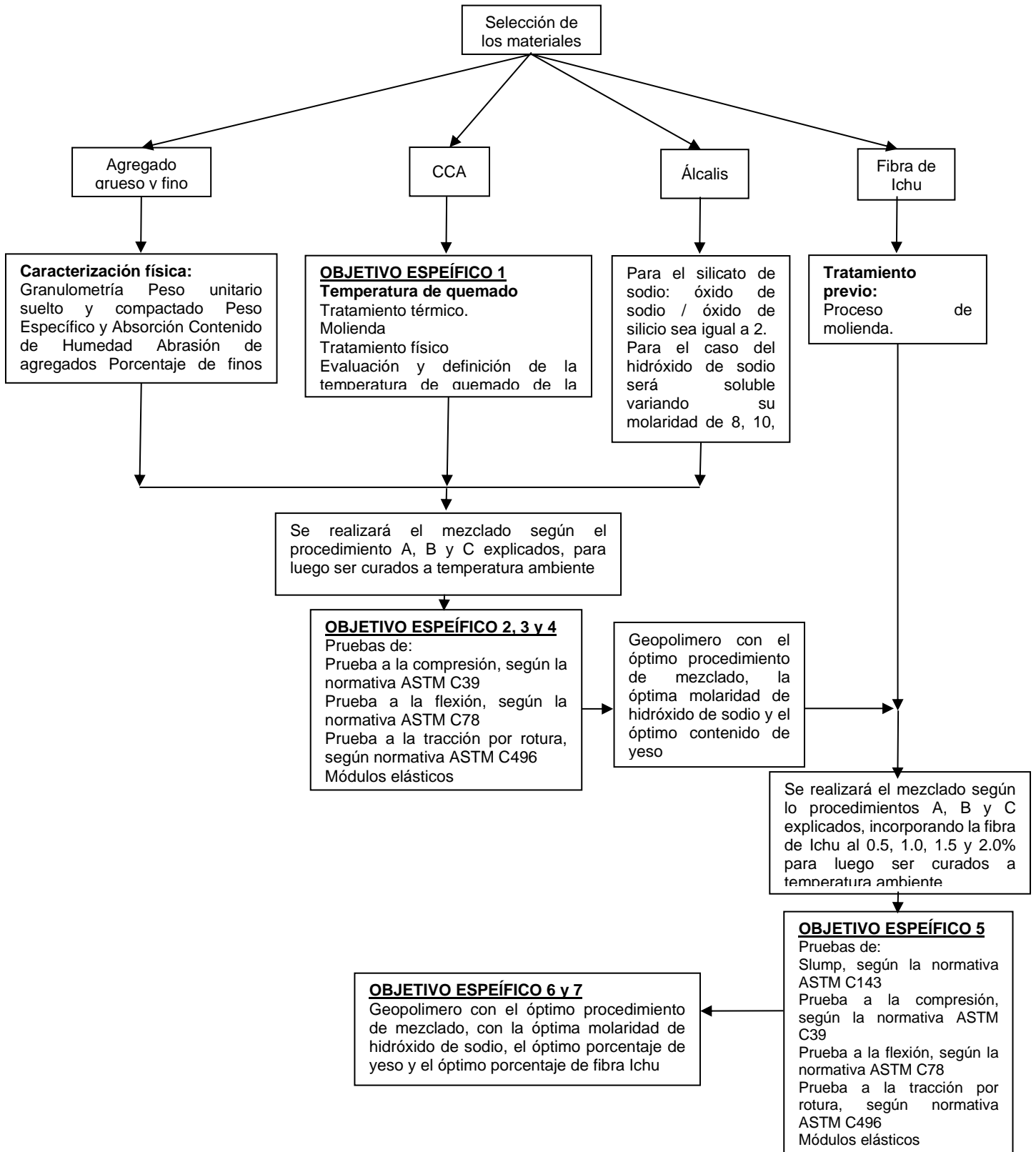
Prueba a la tracción indirecta. Se ejecutará de acuerdo con la normativa ASTM C496, utilizada para obtener la prueba a la tracción indirecta de la mezcla endurecida, esta prueba se realizará a los 7, 14 y 28 días.

Prueba a la flexión. Se ejecutará de acuerdo a la normativa ASTM C78, utilizada para obtener la prueba a la flexión de la mezcla endurecida, esta prueba se realizará a los 7, 14 y 28 días.

Módulos de elasticidad. Se ejecutará de acuerdo con la normativa ASTM C469, utilizada para obtener la prueba a la compresión de la mezcla endurecida, esta prueba se realizará a los 7, 14 y 28 días.

Figura 29

Diagrama del proceso de flujo del procedimiento de análisis de recolección de datos.



CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Análisis del resultado térmico de la ceniza de la cáscara de arroz

En la Tabla 16 y Figura 30 se muestran los resultados de las pruebas previas de prueba a la compresión realizada para poder establecer la temperatura óptima de quemado y en la Tabla 17, donde se visualiza el análisis de varianza (ANOVA) para evaluar la interacción entre las variables temperatura y número de días de curado, y su efecto sobre la rotura de los geopolímeros, podemos observar que el valor de significancia (**0.000**) es menor al P valor 0.05, por lo que se concluye que entre los tratamientos en estudio, si hubo un efecto entre las interacciones con la capacidad de rotura de los geopolímeros, asimismo, en la Tabla 18, donde se muestra la prueba de comparación de medias (TUKEY) se puede observar que el mejor tratamiento fue (700°C x 28 días de curado), con un valor de 259.99 Kg/cm², seguido de los tratamientos (650°C x 7 días de curado) y (700°C x 14 días de curado), con valores de 242.33 Kg/cm², 249.68 Kg/cm² respectivamente, en la prueba de rotura con un incremento promedio en la prueba a la compresión a los 28 días de 23.80%, siendo además estos tratamientos similares estadísticamente. Las pruebas además nos arrojaron que, entre los tratamientos en estudio, existió una **diferencia estadística**, siendo el tratamiento que arrojó el valor más bajo de rotura el tratamiento (750°C x 7 días) con 137.52 Kg/cm². Los valores arrojados por el Coeficiente de Variabilidad (CV) y Coeficiente de Determinación (R²), nos demuestran que hubo una buena toma de datos por lo que los resultados son confiables. Este resultado coincide con lo mencionado por Rithuparna y sus colaboradores, (2021) donde indica que el rango de la temperatura óptima oscila entre 500 – 700 °C, y que el incremento de prueba a la compresión resultó de 10 – 50% de la muestra patrón.

Tabla 16

Resultados de prueba a la compresión a los 7, 14 y 28 a 600, 650, 700 y 750 °C de temperatura de quemado de las cenizas

Temperatura (°C)	Días de curado	Porcentaje de ceniza a reemplazar (%)	Cantidad de especímenes	1era rotura (kg/cm ²)	2da rotura (kg/cm ²)	3era rotura (kg/cm ²)
------------------	----------------	---------------------------------------	-------------------------	-----------------------------------	----------------------------------	-----------------------------------

600	7	20	3	156,30	157,77	166,01
	14	20	3	207,48	194,89	205,40
	28	20	3	214,80	210,00	207,69
650	7	20	3	179,89	182,58	195,84
	14	20	3	227,32	223,74	217,06
	28	20	3	231,55	260,52	256,97
700	7	20	3	180,51	196,52	198,28
	14	20	3	215,17	236,05	275,76
	28	20	3	296,19	236,88	246,91
750	7	20	3	134,70	138,34	139,53
	14	20	3	182,01	167,89	166,67
	28	20	3	154,71	157,70	165,44
Total			36			

Nota. Fuente: Elaboración propia

Figura 30

Prueba a la compresión a los 7, 14 y 28 días a 600, 650, 700 y 750 °C de temperatura de quemado de las cenizas.

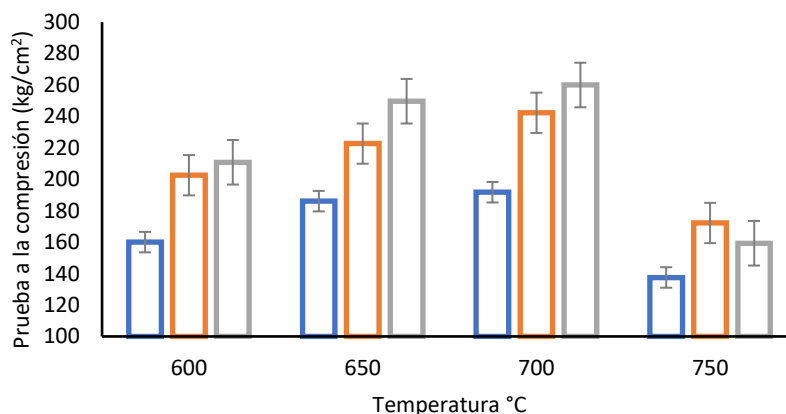


Tabla 17

Análisis de varianza de la interacción "temperatura vs. días de curado"

F DE V.	Grado de	Suma de	Cuadrado	F	Sig.
TRATAMIENTOS	11	50069.01	4551.73	21.04	0.000
Temperatura	3	30134.77	10044.92	46.42	0.000
Días de curado	2	17596.58	8798.29	40.66	0.000
Interacción	2	2337.66	1168.83	5.40	0.000
Error	24	5192.974667	216.37		
Total	35	55261.9831			

CV = 6.53

R² = 90.60

X = 199.59

Nota. Fuente: Elaboración propia

Tabla 18

Prueba de comparación de Medias "TUKEY"

Tratamientos en estudio	N	Subconjunto						
		1	2	3	4	5	6	7

600°C	7 días	3	160.03		
	14 días	3			202.59
	28 días	3			210.83
650°C	7 días	3	186.10		
	14 días	3			222.71
	28 días	3			249.68
700°C	7 días	3	191.77		
	14 días	3			242.33
	28 días	3			259.99
750°C	7 días	3	137.52		
	14 días	3	172.19		
	28 días	3	159.28		

Nota. Fuente: Elaboración propia

4.2 Análisis químico de la ceniza de la cáscara de arroz

La Tabla 19 muestra las cantidades de los compuestos químicos contenidos en la CCA y el método de análisis utilizado para su obtención, mostrando que la cantidad de sílice es de 71,50% y la de alúmina es de 0,38%, variando significativamente el contenido de sílice en un 15,26% respecto a los resultados obtenidos por (Abd-Ali & Kadhim, 2020), esta explicación podría darse porque las temperaturas óptimas de calcinación se encuentran entre 500 - 600 °C mientras que en la presente investigación la temperatura óptima de calcinación es de 700 °C. De acuerdo con los requisitos químicos de la norma ASTM C618, la CCA utilizada fue de clase F.

Tabla 19

Análisis químico de la Ceniza de cáscara de arroz (%)

Composición química	Método de análisis	Resultados (%)
SiO ₂	Gravimetría	71.50
Al ₂ O ₃	Absorción atómica	0.38
Fe ₂ O ₃	Absorción atómica	0.45
CaO	Absorción atómica	0.88
Na ₂ O	Absorción atómica	0.38
TiO ₂	Absorción atómica	<0.01
MgO	Absorción atómica	0.36
K ₂ O	Absorción atómica	2.43
SO ₃	ICP OES	0.25

Nota. Fuente: *Elaboración propia*

4.3 Análisis de los resultados de prueba a la compresión del geopolimero a 8, 10, 12 y 14 molar con CCA.

En la Tabla 20 y Figura 31 se muestran los resultados de las pruebas de prueba a la compresión realizada al geopolimero a 8, 10, 12 y 14 molar con CCA y en la Tabla 21, donde se muestra el análisis de varianza (ANOVA) para evaluar la interacción entre las variables molaridad y número de días de curado, y su efecto sobre la rotura de los geopolimeros, podemos observar que el valor de significancia (**0.000**) es menor al P valor 0.05, por lo que se concluye que entre los tratamientos en estudio, si hubo un efecto entre las interacciones con la capacidad de rotura de los geopolimeros, asimismo, en la Tabla 22, donde se muestra la prueba de comparación de medias TUKEY se puede observar que el mejor tratamiento fue (14 Molar x 28 días de curado), que arrojó 23.40 kg/cm², seguido del tratamiento (12 Molar x 28 días de curado) con 21.80 kg/cm² respectivamente, en la prueba de rotura, la prueba además nos arrojó que, entre los tratamientos en estudio, existió una **diferencia estadística**, siendo los tratamientos que arrojaron los valores más bajos de rotura fueron los tratamientos (8 Molar x 7 días) y (10 Molar x 7 días) con 5.40 y 7.70 kg/cm² respectivamente. Por otro lado, los valores arrojados por el Coeficiente de Variabilidad (CV) y Coeficiente de Determinación (R²), nos demuestran que hubo una buena toma de datos por lo que los resultados son confiables. Este resultado coincide con lo mencionado por Ruiz, (2017) donde indica que la prueba a la compresión de un geopolimero elaborado con hidróxido de sodio a 14 Molar, silicato de sodio y CCA arrojó una prueba a la compresión de 17 kg/cm² cuya prueba a la compresión va aumentando a través del tiempo y va disminuyendo conforme disminuya la molaridad del hidróxido de sodio. Los resultados obtenidos son similares a los obtenidos por Ilmiah cuya prueba a la compresión fue de 25.8 kg/cm² y muy cercano a los resultados realizado por los investigadores Somna et al., donde el la CCA fue usada para sustituir a la FA hasta el 50%, obteniendo una prueba a la compresión de 41 kg/cm², lo cual se contrasta con lo investigado por Lianasari et al., quienes elaboraron geopolimeros a base de FA:CCA en proporciones de 40:60 cuyo resultado fue de 40.8 kg/cm² respectivamente.

Tabla 20

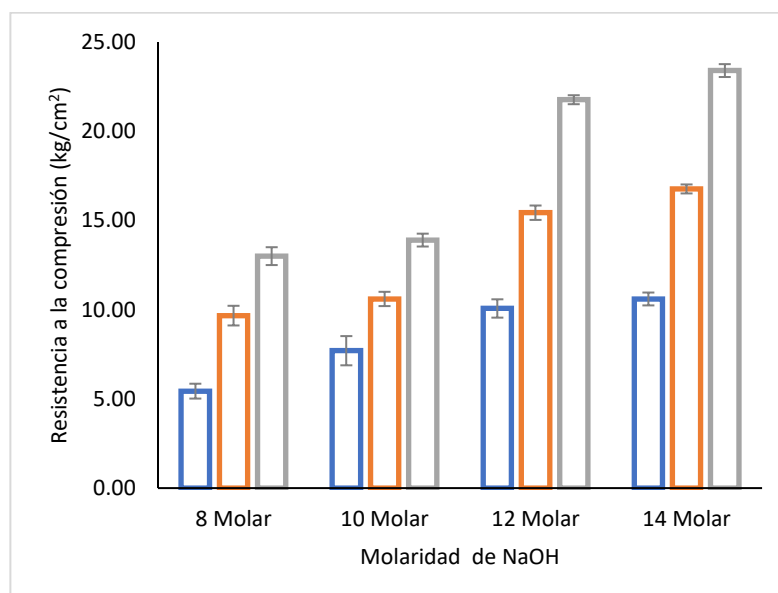
Prueba a la compresión de los geopolimeros con CCA, a 8, 10, 12 y 14 molar

Molaridad	Días de curado	Cant.	1era rotura (kg/cm ²)	2da rotura (kg/cm ²)	3era rotura (kg/cm ²)
8 Molar	7	3	5.1	5.3	5.9
	14	3	9.1	10.2	9.7
	28	3	12.5	13.00	13.5
10 Molar	7	3	7.00	7.5	8.6
	14	3	10.20	11.00	10.60
	28	3	13.50	14.00	14.20
12 Molar	7	3	9.50	10.20	10.50
	14	3	15.00	15.50	15.80
	28	3	21.50	22.00	21.80
14 Molar	7	3	10.20	10.70	10.90
	14	3	16.50	17.00	16.80
	28	3	23.00	23.50	23.70
Total		36			

Nota. Para todos los casos se aplica el procedimiento C y la prueba de prueba a la compresión. Fuente: Elaboración propia

Figura 31

Prueba a la compresión de los geopolimeros con CCA, a 8, 10 12 y 14 molar.

**Tabla 21**

Análisis de Varianza de la interacción "Molaridad vs. Días de curado"

F DE V.	Grado de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F	Sig.
TRATAMIENTOS	11	9.66	0.88	421.61	0.000
Molaridad	3	3.70	1.23	592.77	0.000
Días de curado	2	5.49	2.75	1318.17	0.000
Interacción	2	0.46	0.23	111.51	0.000

Error	24	0.05	0.00
Total	35	9.71	
CV = 3.46		R2 = 99.48	X = 1.32

Nota. Fuente: Elaboración propia

Tabla 22

Prueba de Comparación de Medias "TUKEY"

Tratamientos en estudio		N	Subconjunto				
			1	2	3	4	5
8 Molar	7 días	3	0.54				
	14 días	3		0.97			
	28 días	3			1.30		
10 Molar	7 días	3	0.77				
	14 días	3		1.06			
	28 días	3			1.39		
12 Molar	7 días	3		1.01			
	14 días	3			1.54		
	28 días	3				2.18	
14 Molar	7 días	3		1.06			
	14 días	3			1.68		
	28 días	3					2.34

Nota. Fuente: Elaboración propia

4.4 Análisis de los resultados de prueba a la compresión del geopolimero a 8, 10, 12 y 14 molar con CCA y con 10, 20, 30, 40 y 50% de yeso.

En la Tabla 23 y Figura 32 se muestran los resultados de las pruebas de prueba a la compresión realizada al geopolimero a a 8, 10, 12 y 14 molar con CCA con 10, 20, 30, 40 y 50% de yeso y en la Tabla 24, donde se muestra el análisis de varianza (ANOVA) para evaluar la interacción entre las variables molaridad, porcentaje de yeso y número de días de curado, en la prueba de prueba a la compresión, podemos observar que el valor de significancia (**0.000**) es menor al P valor 0.05, por lo que se concluye que entre los tratamientos en estudio, si hubo un efecto entre las interacciones con la capacidad de resistencia de los geopolimeros, asimismo, en la Tabla 25, donde se muestra la prueba de comparación de medias (TUKEY) se puede observar que el mejor tratamiento fue (12 Molar x 20% de Yeso x 28 días de curado), que arrojó 80.06 Kg/cm², seguido del tratamiento (12 Molar x 10% de Yeso x 28 días de curado) con 70.67 Kg/cm² respectivamente, en la prueba de compresión, la prueba además nos arrojó que, entre los tratamientos en estudio, existió una **diferencia estadística**, siendo los tratamientos que arrojaron los valores más bajo de rotura los tratamiento (8 Molar

x 50% de yeso x 7 días) y (10 Molar x 50% de yeso x 7 días) con 14.87 y 15.05 Kg/cm² respectivamente. Por otro lado, los valores arrojados por el Coeficiente de Variabilidad (CV) y Coeficiente de Determinación (R²), nos demuestran que hubo una buena toma de datos por lo que los resultados son confiables. Estos resultados coinciden con las investigaciones realizadas a geopolimeros a base de CCA las cuales fueron reemplazadas parcial y totalmente por cenizas volantes que son ricas en calcio tal como lo tiene el yeso semihidratado y a 12 molar dichas investigaciones fueron realizadas por los autores, Lianasari y sus colaboradores., (2015), Januar y sus colaboradores., (2016) y Ilmiah, (2017) cuyos resultados obtenidos son 70.90 kg/cm², 98.70 kg/cm², 76.50 kg/cm² respectivamente y los resultados de An et al., (2022), revelan que los geopolimeros con una dosis del 5% de yeso fue beneficiosa para aumentar el valor de la prueba a la compresión a 93.1 kg/cm², estos resultados son muy similares a los encontrados en la presente investigación. Los resultados de la presente investigación coinciden también con los encontrados por Handayani et al, indicando que no necesariamente al aumentar la molaridad del hidróxido de sodio aumentan las resistencias mecánicas

Tabla 23

Resultados de prueba a la compresión de geopolimeros a 8, 10, 12 y 14 molar con CCA con 10, 20, 30, 40 y 50% de yeso

Molaridad	Porcentaje de yeso	Días de curado	Cant.	1era rotura (kg/cm ²)	2da rotura (kg/cm ²)	3era rotura (kg/cm ²)
8 Molar	10%	7	3	22.57	20.95	21.06
		14	3	24.56	26.61	26.69
		28	3	26.92	26.42	26.10
	20%	7	3	16.8	16.54	16.95
		14	3	28.78	26.91	26.94
		28	3	47.26	48.41	46.96
	30%	7	3	20.43	19.95	19.36
		14	3	31.11	31.21	31.34
		28	3	41.50	41.60	41.90
	40%	7	3	15.91	17.97	16.95
		14	3	24.00	24.41	24.41
		28	3	37.67	37.77	37.77
	50%	7	3	14.61	14.56	15.43
		14	3	19.94	20.21	20.37
		28	3	30.60	31.20	31.15
10 Molar	10%	7	3	29.57	30.34	29.99
		14	3	38.39	37.50	37.02

		28	3	37.08	41.59	43.10
		7	3	23.68	21.65	20.43
	20%	14	3	31.68	31.73	31.77
		28	3	51.57	50.51	51.51
		7	3	21.30	20.89	20.94
	30%	14	3	35.25	35.36	35.42
		28	3	41.84	42.90	42.41
		7	3	16.22	16.81	16.83
	40%	14	3	26.38	26.52	25.55
		28	3	32.58	32.71	30.86
		7	3	14.99	15.63	14.53
	50%	14	3	22.03	21.14	20.89
		28	3	30.58	31.41	30.8
<hr/>						
		7	3	44.93	48.48	47.93
	10%	14	3	66.24	62.10	61.60
		28	3	70.82	70.20	70.99
		7	3	39.09	39.07	38.66
	20%	14	3	50.64	51.48	51.68
		28	3	80.78	79.67	79.72
		7	3	36.34	34.86	35.03
12 Molar	30%	14	3	42.91	43.29	43.38
		28	3	66.37	57.68	56.27
		7	3	36.01	33.88	34.32
	40%	14	3	40.13	40.24	40.63
		28	3	52.25	52.58	52.53
		7	3	24.95	29.85	28.93
	50%	14	3	30.75	30.8	31.39
		28	3	33.22	32.93	33.42
<hr/>						
		7	3	44.71	45.58	44.66
	10%	14	3	62.00	62.59	61.83
		28	3	62.10	63.60	63.63
		7	3	37.7	37.85	36.78
	20%	14	3	46.95	46.11	45.21
		28	3	48.25	49.43	49.72
		7	3	33.10	32.86	32.03
14 Molar	30%	14	3	39.53	40.62	40.61
		28	3	46.74	47.57	47.85
		7	3	19.45	19.54	20.14
	40%	14	3	22.48	23.06	22.94
		28	3	33.68	33.31	33.50
		7	3	16.33	16.38	16.22
	50%	14	3	18.5	19.24	19.84
		28	3	24.15	24.88	24.55

Nota. Para todos los casos se aplica el procedimiento C y la prueba de prueba a la compresión. Fuente: Elaboración propia

Figura 32

Prueba a la compresión promedio a los 28 días de los geopolimeros con CCA, a 8, 10 12 y 14 molar y con 10, 20, 30, 40 y 50% de yeso.

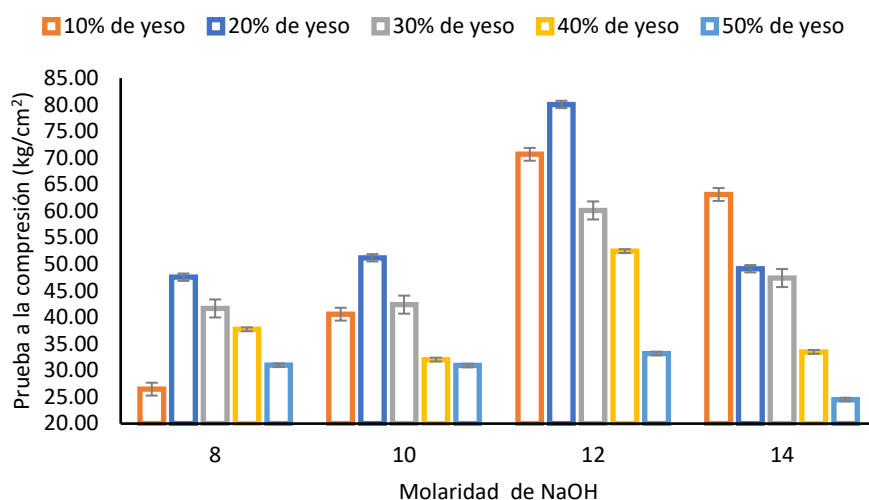


Tabla 24

Análisis de Varianza de la interacción “Molaridad vs. Porcentaje de Yeso vs. Días de curado”

F DE V.	Grado de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F	Sig.
TRATAMIENTOS	59	47886.17	811.63	631.96	0.00
Molaridad	3	20179.62	6726.54	5237.46	0.00
Yeso	4	19711.45	4927.86	3836.97	0.00
Interacción (Molar vs Yeso)	12	4886.23	407.19	317.05	0.00
Días de curado	2	19254.18	9627.09	7495.91	0.00
Interacción (Yeso vs D. curado)	8	22623.53	2827.94	2201.91	0.00
Interacción (Mol vs D. curado)	6	50608.43	8434.74	6567.52	0.00
(Mol vs Yeso vs D. curado)	24	89377.29	3724.05	2899.65	0.00
Error	120	154.12	1.28		
Total	179				

CV = 3.16

R² = 99.67

X = 35.91

Nota. Fuente: Elaboración propia

Tabla 25

Prueba de Comparación de Medias “TUKEY”

Tratamientos en estudio	N	Subconjunto								
		1	2	3	5	6	7	8	9	
10% 7 días	3		21.53							
10% 14 días	3		25.95							
10% 28 días	3		26.48							

	20%	7 días	3	16.76		
	20%	14 días	3		27.54	
	20%	28 días	3			47.54
8 Molar	30%	7 días	3	19.91		
	30%	14 días	3		31.22	
	30%	28 días	3			41.67
	40%	7 días	3	16.94		
	40%	14 días	3		24.27	
	40%	28 días	3			37.74
	50%	7 días	3	14.87		
	50%	14 días	3	20.17		
	50%	28 días	3			30.98
	10%	7 días	3		29.97	
	10%	14 días	3		37.64	
	10%	28 días	3			40.59
	20%	7 días	3	21.92		
	20%	14 días	3		31.73	
	20%	28 días	3			51.20
	30%	7 días	3	21.04		
	30%	14 días	3		35.34	
	30%	28 días	3			42.38
10 Molar	40%	7 días	3	16.62		
	40%	14 días	3		26.15	
	40%	28 días	3			32.05
	50%	7 días	3	15.05		
	50%	14 días	3	21.35		
	50%	28 días	3		30.93	
	10%	7 días	3			47.11

	10%	14 días	3			63.31
	10%	28 días	3			70.67
	20%	7 días	3	38.94		
	20%	14 días	3		51.27	
	20%	28 días	3			80.06
12 Molar	30%	7 días	3	35.41		
	30%	14 días	3		43.19	
	30%	28 días	3			60.11
	40%	7 días	3	34.74		
	40%	14 días	3		40.33	
	40%	28 días	3			52.45
	50%	7 días	3	27.91		
	50%	14 días	3	30.98		
	50%	28 días	3	33.19		
	10%	7 días	3		44.98	
	10%	14 días	3			62.14
	10%	28 días	3			63.11
	20%	7 días	3	37.44		
	20%	14 días	3		46.09	
	20%	28 días	3	32.66		
	30%	7 días	3			49.13
	30%	14 días	3	40.25		
	30%	28 días	3		47.39	
14 Molar	40%	7 días	3	19.71		
	40%	14 días	3	22.53		
	40%	28 días	3	33.50		
	50%	7 días	3	16.31		
	50%	14 días	3	19.19		

Nota. Fuente: Elaboración propia

4.5 Análisis mecánico del geopolimero con la óptima molaridad con CCA con el óptimo porcentaje de yeso con los procesos A, B y C de mezclado.

En la Tabla 26 los resultados de las resistencias mecánicas a los 7, 14 y 28 días de curado con la óptima molaridad, óptimo porcentaje de yeso, con los procesos de mezclado A, B y C. En la Figura 33 se muestran los resultados de la prueba a la compresión a los 28 días de curado con la óptima molaridad, óptimo porcentaje de yeso, con los procesos de mezclado A, B y C y en la Tabla 27, donde se muestra el análisis de varianza (ANOVA) para evaluar la interacción entre las variables Tipo de mezclado y Número de días de curado, en la prueba de prueba a la compresión, podemos observar que el valor de significancia (**0.000**) es menor al P valor 0.05, por lo que se concluye que entre los tratamientos en estudio, si hubo un efecto entre las interacciones con la capacidad de resistencia de los geopolimeros, asimismo, en la Tabla 28, donde se muestra la prueba de comparación de medias (TUKEY) se puede observar que el mejor tratamiento fue (Mezclado A x 28 días de curado), que arrojó 97.28 Kg/cm², seguido del tratamiento (Mezclado C x 28 días de curado) con 82.18 Kg/cm² respectivamente, la prueba además arrojó que, entre los tratamientos en estudio, existió **diferencia estadística**, siendo los tratamientos que arrojaron los valores más bajo de rotura los tratamientos (Mezclado B x 7 días) y (Mezclado C x 7 días) con 19.42 y 20.58 Kg/cm² respectivamente. Por otro lado, los valores arrojados por el Coeficiente de Variabilidad (CV) y Coeficiente de Determinación (R²), nos demuestran que hubo una buena toma de datos por lo que los resultados son confiables. Estos resultados son similares a lo estudiado por (Teewara & Mitzi, 2017) donde indican que el proceso mezcla A proporcionó una mayor prueba a la compresión que los procesos de mezcla B y C

Tabla 26

Resultados de las resistencias mecánicas con la óptima molaridad, óptimo porcentaje de yeso, con los procesos de mezclado A, B y C rotos a 7, 14 y 28 días de curado.

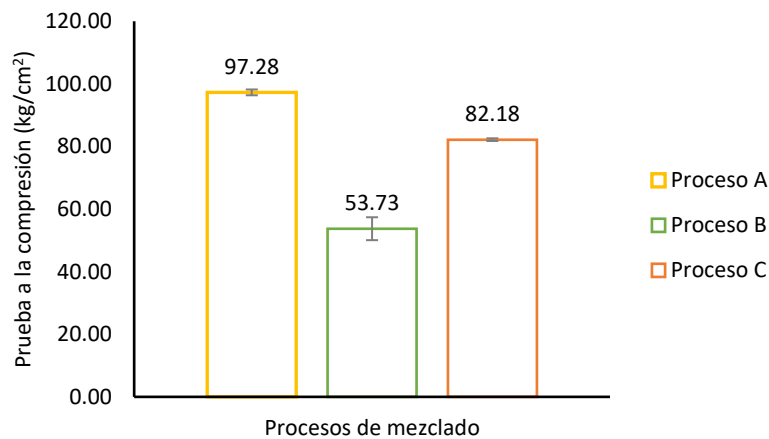
Molaridad	Procedimiento de Mezclado	Porcentaje de yeso	Días de curado	Prueba	Cant.	1era rotura (kg/cm ²)	2da rotura (kg/cm ²)	3era rotura (kg/cm ²)		
12 M	A	10%	7	Prueba a la compresión	3	26.69	26.35	26.13		
			14		3	45.32	45.03	46.67		
			28		3	98.20	96.34	97.30		
			7	Módulos elásticos	3	30997.4 2	30799.3 5	30670.5 1		
			14		3	40392.0 8	40262.6 378	40989.2 669		
			28		3	59457.5 5	58891.7 7	59184.4 6		
			7	Prueba a la tracción	3	5.76	5.84	5.74		
			14		3	6.13	6.14	6.05		
			28		3	6.71	6.80	6.77		
			7	Prueba a la flexión	3	13.34	13.79	13.54		
			14		3	19.01	18.01	18.65		
			28		3	21.50	21.70	21.97		
			B	10%	7	Prueba a la compresión	3	19.20	19.34	19.73
					14		3	32.01	32.82	32.37
					28		3	50.02	53.82	57.34
	7	Módulos elásticos			3	25370.5 1	25462.8 4	25718.2 9		
	14				3	32758.3 0	33170.1 8	32942.0 0		
	28				3	40949.6 7	42476.6 6	43843.7 2		
	7	Prueba a la tracción			3	5.67	5.44	5.58		
	14				3	6.19	6.49	6.95		
	28				3	7.51	7.76	8.08		
	7	Prueba a la flexión			3	11.08	12.37	12.05		
	14				3	18.57	17.41	17.89		
	28				3	21.61	24.26	22.64		
	C	10%			7	Prueba a la compresión	3	20.6	20.89	20.24
					14		3	31.8	30.66	31.34
					28		3	81.85	82.66	82.03
7			Módulos elásticos	3	29501.6 9	29708.6 3	29242.7 8			
14				3	36654.4 7	35991.4 6	36388.3 9			
28				3	58806.1 4	59096.4 0	58870.7 7			
7			Prueba a la tracción	3	6.22	6.22	6.27			
14				3	8.66	8.61	8.63			
28				3	23.59	23.56	23.62			
7			Prueba a la flexión	3	18.8	19.34	19.16			
14				3	27.67	26.95	27.38			
28				3	32.27	32.39	32.52			

Total de especímenes cilíndrico D=6"	27
Total de especímenes cilíndrico D=4	27
Total de especímenes prismáticos	27

Nota. Fuente: Elaboración propia

Figura 33

Resultados de la prueba a la compresión a los 28 días de curado con la óptima molaridad, óptimo porcentaje de yeso, con los procesos de mezclado A, B y C.



Prueba de mezclado y diferentes días de curado:

El tratamiento que arrojó el valor óptimo de molaridad y óptimo porcentaje de yeso, se le realizó la prueba de mezclado y días de curado, arrojando como resultado los siguientes datos:

Tabla 27

Análisis de Varianza a la "Prueba a la compresión"

F DE V.	Grado de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrado medio	F	Sig.
TRATAMIENTOS	8	18404.45	2300.56	1296.58	0.000
Mezclado	2	2042.61	1021.30	575.60	0.000
Días de curado	2	15001.28	7500.64	4227.31	0.000
Interacción	2	1360.56	680.28	383.40	0.000
Error	18	31.94	1.77		
Total	26	18436.38			

CV = 2.93

R² = 99.83

X = 45.44

Nota. Fuente: Elaboración propia

Tabla 28

Prueba de Comparación de Medias "TUKEY"

Tratamientos en estudio	N	Subconjunto						
		1	2	3	4	5	6	7

Mezclado A	7 días	3	26.39	
	14 días	3		45.67
	28 días	3		97.28
Mezclado B	7 días	3	19.42	
	14 días	3		32.40
	28 días	3		53.73
Mezclado C	7 días	3	20.58	
	14 días	3		31.27
	28 días	3		82.18

Nota. Fuente: Elaboración propia

En la Figura 34 se muestran los resultados de los módulos elásticos a los 28 días de curado con los métodos de mezclado A, B y C y en la Tabla 29, donde se muestra el análisis de varianza (ANOVA) para evaluar la interacción entre las variables Tipo de mezclado y Número de días de curado, en la prueba de Módulos elásticos, podemos observar que el valor de significancia (**0.000**) es menor al P valor 0.05, por lo que se concluye que entre los tratamientos en estudio, si hubo un efecto entre las interacciones con la capacidad de los geopolimeros en dicha prueba, asimismo, en la Tabla 30, donde se muestra la prueba de comparación de medias (TUKEY) se puede observar que los mejores tratamientos fueron (Mezclado A x 28 días de curado) y (Mezclado C x 28 días), con valores de 59177.93 y 58924.44 Kg/cm² respectivamente, la prueba además nos arrojó que entre los tratamientos en estudio, existió **diferencia estadística**, siendo los tratamientos que arrojaron los valores más bajo en la prueba de los módulos elásticos (Mezclado A x 7 días), (Mezclado B x 7 días) y (Mezclado C x 7 días) con 30822.43, 25517.21 y 29484.37 Kg/cm² respectivamente. Por otro lado, los valores arrojados por el Coeficiente de Variabilidad (CV) y Coeficiente de Determinación (R²), nos demuestran que hubo una buena toma de datos por lo que los resultados son confiables. Estos resultados son similares a lo estudiado por (Teewara & Mitzi, 2017) donde indican que el proceso mezcla A proporcionó una mayor prueba a la compresión que los procesos de mezcla B y C

Figura 34

Resultados de los módulos elásticos a los 28 días de curado con la óptima molaridad, óptimo porcentaje de yeso, con los procesos de mezclado A, B y C.

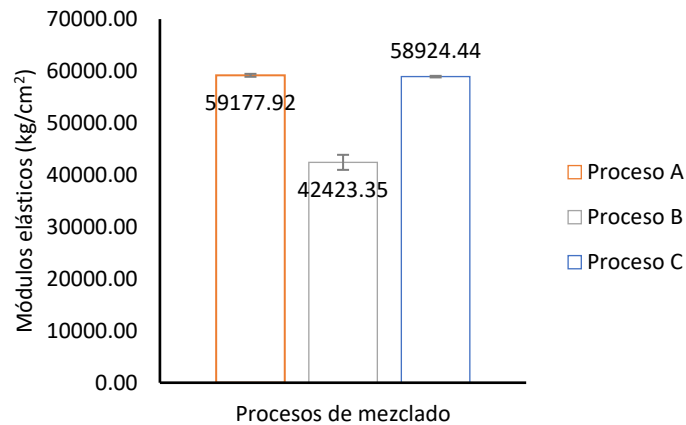


Tabla 29

Análisis de Varianza para la "Módulos Elásticos"

F DE V.	Grado de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F	Sig.
TRATAMIENTOS	8	21296.69	2662.09	1514.77	0.000
Mezclado	2	2966.58	1483.29	844.01	0.000
Días de curado	2	17550.91	8775.45	4993.36	0.000
Interacción	2	779.20	389.60	221.69	0.000
Error	18	31.63	1.76		
Total	26	21328.32			

CV = 0.67 R² = 99.85 X = 197.95

Nota. Fuente: Elaboración propia

Tabla 30

Prueba de Comparación de Medias "TUKEY"

Tratamientos en estudio	N	Subconjunto			
		1	2	3	4
Mezclado A	7 días	3	30822.43		
	14 días	3		40548.00	
	28 días	3			59177.93
Mezclado B	7 días	3	25517.21		
	14 días	3		32956.83	
	28 días	3			42423.35
Mezclado C	7 días	3	29484.37		
	14 días	3		36344.77	
	28 días	3			58924.44

Nota. Fuente: Elaboración propia

En la Figura 35 se muestra la prueba a la tracción a los 28 días de curado con la óptima molaridad, óptimo porcentaje de yeso, con los procesos de mezclado A, B

y C. En la Tabla 31, donde se muestra el análisis de varianza (ANOVA) para evaluar la interacción entre las variables Tipo de mezclado y Número de días de curado, en la prueba Tracción, podemos observar que el valor de significancia (**0.000**) es menor al P valor 0.05, por lo que se concluye que entre los tratamientos en estudio, si hubo un efecto entre las interacciones y la capacidad de tracción de los geopolimeros, asimismo, en la Tabla 32, donde se muestra la prueba de comparación de medias (TUKEY) se puede observar que el mejor tratamiento fue (Mezclado C x 28 días de curado) con 23.59 Kg/cm² respectivamente, la prueba además nos arrojó que entre los tratamientos en estudio, existió **diferencia estadística**, siendo los tratamientos que arrojaron los valores más bajo en la prueba de los módulos elásticos (Mezclado A x 7 días) y (Mezclado B x 7 días) con 5.78 y 5.56 Kg/cm² respectivamente. Por otro lado, los valores arrojados por el Coeficiente de Variabilidad (CV) y Coeficiente de Determinación (R²), nos demuestran que hubo una buena toma de datos por lo que los resultados son confiables.

Figura 35

Resultados de la prueba a la tracción a los 28 días de curado con la óptima molaridad, óptimo porcentaje de yeso, con los procesos de mezclado A, B y C.

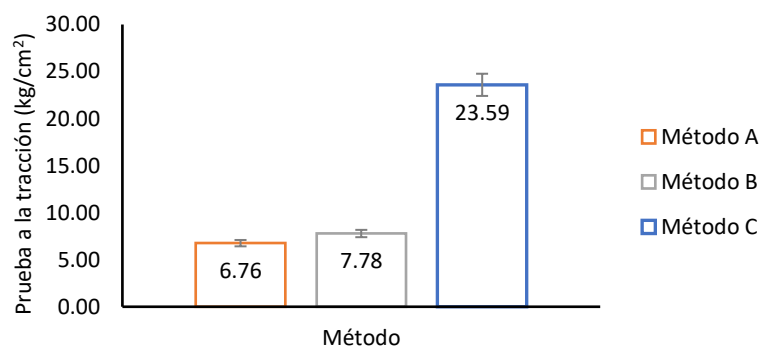


Tabla 31

Análisis de Varianza para la "Prueba a la Tracción"

F DE V.	Grado de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F	Sig.
TRATAMIENTOS	8	785.86	98.23	3510.63	0.000
Mezclado	2	246.37	123.18	4402.31	0.000
Días de curado	2	239.94	119.97	4287.52	0.000
Interacción	2	299.55	149.78	5352.67	0.000
Error	18	0.50	0.03		
Total	26	786.36			

CV = 1.95

R² = 99.93

X = 8.55

Nota. Fuente: Elaboración propia

Tabla 32*Prueba de Comparación de Medias "TUKEY"*

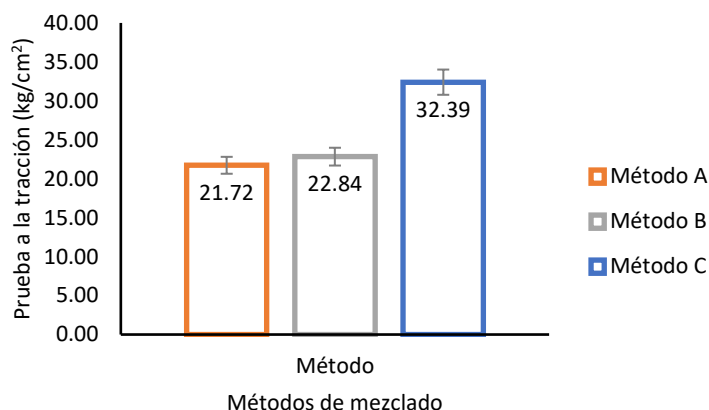
Tratamientos en estudio	N	Subconjunto			
		1	2	3	4
Mezclado A	7 días	3	5.78		
	14 días	3		6.11	
	28 días	3		6.76	
Mezclado B	7 días	3	5.56		
	14 días	3		6.54	
	28 días	3			7.78
Mezclado C	7 días	3		6.24	
	14 días	3			8.63
	28 días	3			23.59

Nota. Fuente: Elaboración propia

En la Figura 36 se muestra la prueba a la flexión a los 28 días de curado con la óptima molaridad, óptimo porcentaje de yeso, con los procesos de mezclado A, B y C. En la Tabla 33, donde se muestra el análisis de varianza (ANOVA) para evaluar la interacción entre las variables Tipo de mezclado y Número de días de curado, en la prueba de Prueba a la Flexión, podemos observar que el valor de significancia (**0.000**) es menor al P valor 0.05, por lo que se concluye que entre los tratamientos en estudio, si hubo un efecto entre las interacciones y la capacidad de prueba a la flexión de los geopolímeros, asimismo, en la Tabla 34, donde se muestra la prueba de comparación de medias (TUKEY) se puede observar que el mejor tratamiento fue (Mezclado C x 28 días de curado) con 32.39 Kg/cm² respectivamente, la prueba además nos arrojó que entre los tratamientos en estudio, existió **diferencia estadística**, siendo los tratamientos que arrojaron los valores más bajo en la prueba de los módulos elásticos (Mezclado A x 7 días) y (Mezclado B x 7 días) con 13.56 y 11.83 Kg/cm² respectivamente. Por otro lado, los valores arrojados por el Coeficiente de Variabilidad (CV) y Coeficiente de Determinación (R²), nos demuestran que hubo una buena toma de datos por lo que los resultados son confiables.

Figura 36

Resultados de la prueba a la flexión a los 28 días de curado con la óptima molaridad, óptimo porcentaje de yeso, con los procesos de mezclado A, B y C.

**Tabla 33**

Análisis de Varianza para la "Prueba a la Flexión"

F DE V.	Grado de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F	Sig.
TRATAMIENTOS	8	991.73	123.97	352.34	0.000
Mezclado	2	437.53	218.76	621.77	0.000
Días de curado	2	533.43	266.72	758.06	0.000
Interacción	2	20.77	10.39	29.52	0.000
Error	18	6.33	0.35		
Total	26	998.06			

CV = 2.88

R² = 99.36

X = 20.59

Nota. Fuente: Elaboración propia

Tabla 34

Prueba de Comparación de Medias "TUKEY"

Tratamientos en estudio	N	Subconjunto				
		1	2	3	4	5
Mezclado A	7 días	3	13.56			
	14 días	3		18.56		
	28 días	3			21.72	
Mezclado B	7 días	3	11.83			
	14 días	3		17.95		
	28 días	3			22.84	
Mezclado C	7 días	3		19.10		
	14 días	3			27.33	
	28 días	3				32.39

Nota. Fuente: Elaboración propia

4.6 Análisis mecánico del geopolimero con la óptima molaridad con CCA con el óptimo porcentaje de yeso con el óptimo mezclado y con 0.5, 1, 1.5 y 2% de fibra natural de ichu.

En la Figura 37 se muestran los resultados de la prueba a la compresión a los 7, 14 y 28 días de curado con la óptima molaridad, óptimo porcentaje de yeso, con el óptimo procedimiento de mezclado con los porcentajes de 0.5, 1, 1.5 y 2% de fibra de ichu y en la Tabla 35 se muestran los resultados de las resistencias y en la Tabla 36, donde se muestra el análisis de varianza (ANOVA) para evaluar la interacción entre las variables Incorporación de Ichu y Días de curado, en la prueba de Prueba a la compresión, podemos observar que el valor de significancia **(0.000)** es menor al P valor 0.05, por lo que se concluye que entre los tratamientos en estudio, si hubo un efecto entre las interacciones y la capacidad de prueba a la compresión de los geopolimeros, asimismo, en la Tabla 37, donde se muestra la prueba de comparación de medias (TUKEY) se puede observar que el mejor tratamiento fue (1.5% de Ichu x 28 días de curado) con 125.21 Kg/cm², seguido del tratamiento (1.0% Ichu x 28 días) con 103.19 Kg/cm², la prueba además nos arrojó que entre los tratamientos en estudio, existió **diferencia estadística**, siendo los tratamientos que arrojaron los valores más bajo en la prueba de los módulos elásticos (0.5% de Ichu x 7 días) y (2.0% de Ichu x 7 días) con 28.30 y 28.36 Kg/cm² respectivamente, ambos tratamientos fueron similares estadísticamente. Por otro lado, los valores arrojados por el Coeficiente de Variabilidad (CV) y Coeficiente de Determinación (R²), nos demuestran que hubo una buena toma de datos por lo que los resultados son confiables. Estos resultados son similares a los encontrados por Ramakrishna and Sundararajan en geopolimeros reforzados con fibras de sisal en 2%, en peso con una prueba a la compresión que 90 kg/cm², del mismo modo en el estudio realizado por Gholampour et al., presenta las características de los geopolímeros reforzados con fibras naturales que albergan arenas de desecho y subproductos industriales reforzados con fibras de origen vegetal de 1 y 2% de fibras de coco, yute, sisal ramio, cáñamo y bambú, por fracción de volumen de agregados finos, presentando una mayor prueba a la compresión.

Tabla 35

Resultados de las resistencias mecánicas con la óptima molaridad, óptimo porcentaje de yeso, con el óptimo mezclado y con porcentaje de 0.5, 1, 1.5 y 2% de ichu rotos a 7, 14 y 28 días de curado

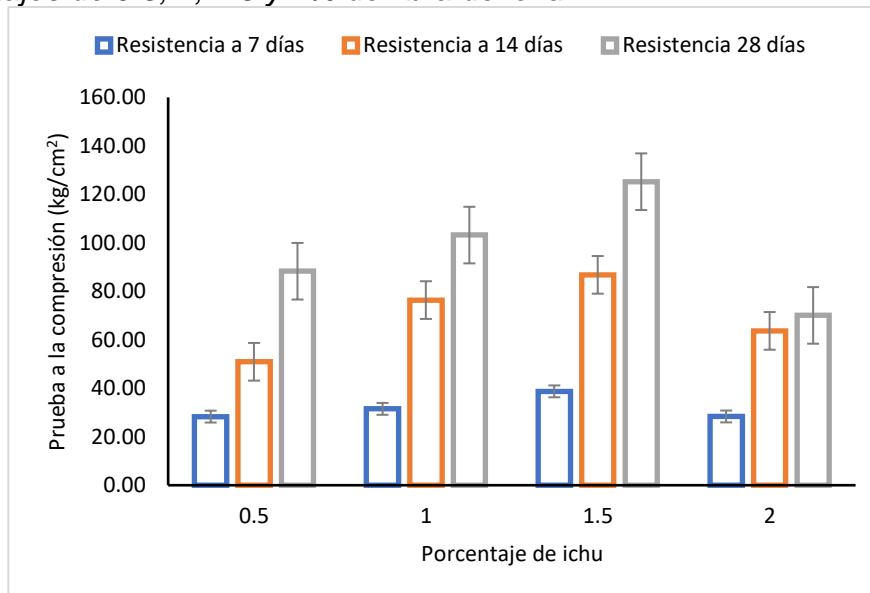
Molaridad	Procedimiento de Mezclado	Porcentaje de yeso	Porcentaje de Fibra de Ichu	Días de curado	Prueba a realizar	Cant.	1era rotura (kg/cm ²)	2da rotura (kg/cm ²)	3era rotura (kg/cm ²)
12 M	A	10%	0,5%	7	Prueba a la compresión	3	28.06	28.14	28.71
				14		3	50.57	51.14	51.05
				28		3	87.52	87.64	89.65
				7	Módulos elásticos	3	33107.3066	33154.468	33488.5708
				14		3	44445.3667	44695.1479	44655.8017
				28		3	58470.0778	58510.1487	59177.3024
				7	Prueba a la tracción	3	8.17	8.16	8.25
				14		3	13.09	13.13	13.15
				28		3	16.28	15.93	16.13
				7	Prueba a la flexión	3	20.85	20.78	26.36
				14		3	32.87	32.63	33.10
				28		3	42.05	42.83	41.99
			7	Prueba a la compresión	3	30.26	33.52	30.72	
			14		3	76.78	75.67	76.64	
			28		3	102.21	103.86	103.51	
			7	Módulos elásticos	3	34930.77	36764.25	35195.27	
			14		3	55641.37	55237.70	55590.61	
			28		3	64197.84	64713.95	64604.81	
			7	Prueba a la tracción	3	9.41	9.39	9.45	
			14		3	16.21	16.39	16.42	
			28		3	20.42	20.57	20.52	
			7	Prueba a la flexión	3	28.15	29.02	27.86	
			14		3	53.32	54.18	53.15	
			28		3	68.56	67.25	67.87	
7	Prueba a la compresión	3	38.76	39.24	38.16				
14		3	87.03	87.02	86.29				
28		3	123.62	125.21	126.79				
7	Módulos elásticos	3	41089.9696	41343.6138	40770.6954				
14		3	61571.3147	61567.7773	61308.9912				
28		3	73381.79	73852.20	74316.70				
7	Prueba a la tracción	3	10.33	10.23	10.28				
14		3	17.96	18.06	17.85				
28		3	22.48	22.43	22.50				
7	Prueba a la flexión	3	32.87	32.8	32.84				
14		3	58.94	61.68	62.47				
28		3	80.52	78.4	80.65				
7	Prueba a la compresión	3	28.72	28.08	28.28				
14		3	63.70	63.86	63.44				
28		3	69.02	70.75	70.40				
			2,0%						

7		3	32690.54	32324.24	32439.16
14	Módulos elásticos	3	48685.49	48746.60	48586.03
28		3	50677.75	51308.94	51181.87
7		3	7.86	7.91	7.89
14	Prueba a la tracción	3	10.89	11.16	10.97
28		3	14.64	14.78	14.84
7		3	38.90	37.91	38.53
14	Prueba a la flexión	3	51.65	52.47	51.89
28		3	74.92	73.47	74.57
Total de especímenes cilíndrico D=6"		36			
Total de especímenes cilíndrico D=4"		36			
Total de especímenes prismáticos		36			

Nota. Fuente: Elaboración propia

Figura 37

Resultados de la prueba a la compresión a los 7, 14 y 28 días de curado con la óptima molaridad, óptimo porcentaje de yeso, con el óptimo procedimiento de mezclado con los porcentajes de 0.5, 1, 1.5 y 2% de fibra de ichu.



Incorporación de Ichu:

El tratamiento que arrojó el valor óptimo de molaridad, óptimo procedimiento de mezclado y óptimo porcentaje de yeso, se le realizó la prueba de incorporación de diferentes porcentajes de sustitución de "Ichu", los resultados obtenidos arrojaron los siguientes datos:

Tabla 36

Análisis de varianza para la "Prueba a la compresión"

F DE V.	Grado de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F	Sig.
---------	-------------------	-------------------	----------------	---	------

TRATAMIENTOS	11	32836.14	2985.10	3640.63	0.000
% de Ichu	3	5169.74	1723.25	2101.67	0.000
Días de curado	2	25536.54	12768.27	15572.17	0.000
Interacción	6	2129.86	354.98	432.93	0.000
Error	24	19.68	0.82		
Total	35	32855.82			

CV = 1.37

R² = 99.94

X = 65.94

Nota. Fuente: Elaboración propia

Tabla 37

Prueba de Comparación de Medias "TUKEY"

Tratamientos en estudio	N	Subconjunto						
		1	2	3	4	5	6	7
0.5% Ichu	7 días	3	28.3					
	14 días	3		50.92				
	28 días	3			88.27			
1.0% Ichu	7 días	3		31.50				
	14 días	3			76.36			
	28 días	3				103.19		
1.5% Ichu	7 días	3		38.72				
	14 días	3				86.78		
	28 días	3					125.21	
2.0% Ichu	7 días	3	28.36					
	14 días	3		63.67				
	28 días	3			70.05			

Nota. Fuente: Elaboración propia

En la Figura 38 se muestran los resultados de los módulos elásticos a los 7, 14 y 28 días de curado con la óptima molaridad, óptimo porcentaje de yeso, con el óptimo procedimiento de mezclado con los porcentajes de 0.5, 1, 1.5 y 2% de fibra de ichu y en la Tabla 38 donde se muestra el análisis de varianza (ANOVA) para evaluar la interacción entre las variables de Incorporación de Ichu y Días de curado, en la prueba de Módulos elásticos, podemos observar que el valor de significancia (**0.000**) es menor al P valor 0.05, por lo que se concluye que entre los tratamientos en estudio, si hubo un efecto entre las interacciones y la

capacidad de resistencia en los módulos elásticos por los geopolímeros, asimismo, en la Tabla 39, donde se muestra la prueba de comparación de medias (TUKEY) se puede observar que el mejor tratamiento fue (1.5% de Ichu x 28 días de curado) con 73850.23 Kg/cm², seguido de los tratamientos (1.0% Ichu x 28 días) y (1.5% de Ichu x 14 días) con 64505.53 y 31482.69 Kg/cm², la prueba además nos arrojó que entre los tratamientos en estudio, existió **diferencia estadística**, siendo los tratamientos que arrojaron los valores más bajo en la prueba de los módulos elásticos (0.5% de Ichu x 7 días), (1.0% de Ichu x 7 días) y (2.0% de Ichu x 7 días) con 33250.11, 35630.09 y 32484.64 Kg/cm² respectivamente, ambos tratamientos fueron similares estadísticamente. Por otro lado, los valores arrojados por el Coeficiente de Variabilidad (CV) y Coeficiente de Determinación (R²), nos demuestran que hubo una buena toma de datos por lo que los resultados son confiables.

Figura 38.

Resultados del módulo de elasticidad a los 7, 14 y 28 días de curado con la óptima molaridad, óptimo porcentaje de yeso, con el óptimo procedimiento de mezclado con los porcentajes de 0.5, 1, 1.5 y 2% de fibra de ichu.

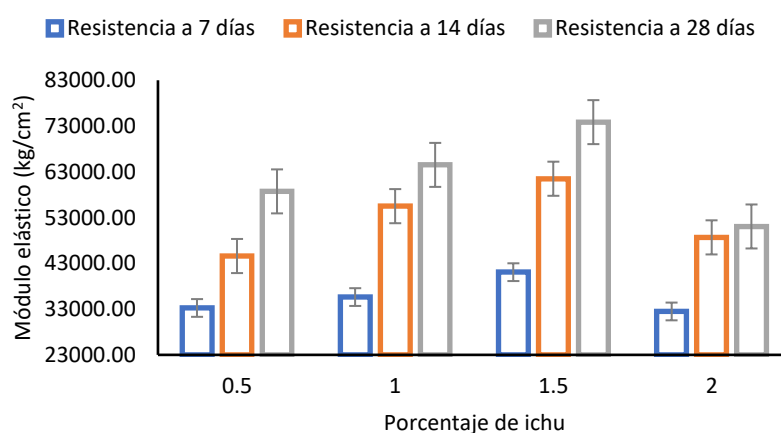


Tabla 38

Análisis de varianza para “Módulos elásticos”

F DE V.	Grado de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F	Sig.
TRATAMIENTOS	11	45561.67	4141.97	0.95	0.000
% de Ichu	3	10927.08	3642.36	0.83	0.000
Días de curado	2	4654.47	2327.23	0.53	0.000
Interacción	6	29980.13	4996.69	1.14	0.000
Error	24	104922.08	4371.75		

Total	35	150483.75	
CV = 2.8		R ² = 87.6	X = 233.90

Nota. Fuente: Elaboración propia

Tabla 39

Prueba de Comparación de Medías "TUKEY"

Tratamientos en estudio	N	Subconjunto				
		1	2	3	4	5
0.5% Ichu	7 días	3	33250.11			
	14 días	3		44598.77		
	28 días	3			58719.18	
1.0% Ichu	7 días	3	35630.09			
	14 días	3		55489.89		
	28 días	3			64505.53	
1.5% Ichu	7 días	3		41068.09		
	14 días	3			61482.69	
	28 días	3				73850.23
2.0% Ichu	7 días	3	32484.64			
	14 días	3		48672.71		
	28 días	3			51056.19	

Nota. Fuente: Elaboración propia

En la Figura 39 se muestran los Resultados de la prueba a la tracción a los 7, 14 y 28 días de curado con la óptima molaridad, óptimo porcentaje de yeso, con el óptimo procedimiento de mezclado con los porcentajes de 0.5, 1, 1.5 y 2% de fibra de ichu y en la Tabla 40, donde se muestra el análisis de varianza (ANOVA) para evaluar la interacción entre las variables Incorporación de Ichu y Días de curado, en la prueba de Prueba a la Tracción, podemos observar que el valor de significancia (**0.000**) es menor al P valor 0.05, por lo que se concluye que entre los tratamientos en estudio, si hubo un efecto entre las interacciones y la capacidad de resistencia en la tracción de los geopolímeros, asimismo, en la Tabla 41, donde se muestra la prueba de comparación de medias (TUKEY) se puede observar que el mejor tratamiento fue (1.5% de Ichu x 28 días de curado) con 22.47 Kg/cm², seguido de tratamiento (1.0% Ichu x 28 días) con 20.50 Kg/cm², la

prueba además nos arrojó que entre los tratamientos en estudio, existió **diferencia estadística**, siendo los tratamientos que arrojaron los valores más bajo en la prueba Prueba a la Tracción (0.5% de Ichu x 7 días) y (2.0% de Ichu x 7 días) con 8.19 y 7.88 Kg/cm² respectivamente. Por otro lado, los valores arrojados por el Coeficiente de Variabilidad (CV) y Coeficiente de Determinación (R²), nos demuestran que hubo una buena toma de datos por lo que los resultados son confiables.

Figura 39

Resultados de la prueba a la tracción a los 7, 14 y 28 días de curado con la óptima molaridad, óptimo porcentaje de yeso, con el óptimo procedimiento de mezclado con los porcentajes de 0.5, 1, 1.5 y 2% de fibra de ichu

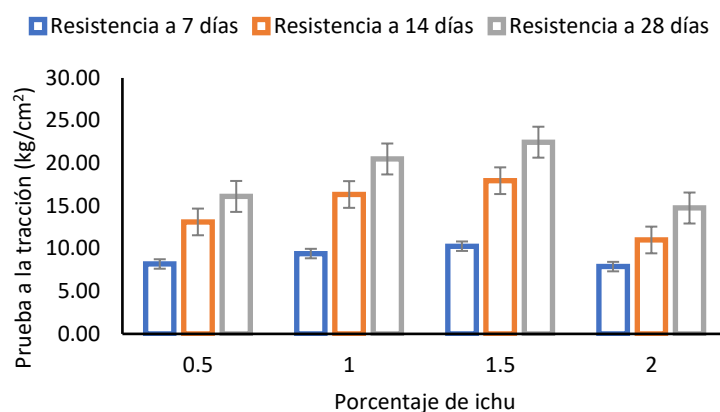


Tabla 40

Análisis de varianza para "Prueba a la tracción"

F DE V.	Grado de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F	Sig.
TRATAMIENTOS	11	767.96	69.81	8436.75	0.000
% de Ichu	3	184.78	61.59	7443.45	0.000
Días de curado	2	550.16	275.08	33242.07	0.000
Interacción	6	33.02	5.50	664.97	0.000
Error	24	0.20	0.01		
Total	35	768.15			

CV = 3.18

R² = 99.97

X = 14.0

Nota. Fuente: Elaboración propia

Tabla 41

Prueba de Comparación de Medias "TUKEY"

Tratamientos en estudio	N	Subconjunto						
		1	2	3	4	5	6	7
7 días	3	8.19						

0.5% Ichu	14 días	3		13.12
	28 días	3		16.11
1.0% Ichu	7 días	3	9.42	
	14 días	3		16.34
	28 días	3		20.50
1.5% Ichu	7 días	3	10.28	
	14 días	3		17.96
	28 días	3		22.47
2.0% Ichu	7 días	3	7.88	
	14 días	3	11.01	
	28 días	3		14.75

Nota. Fuente: Elaboración propia

En la Figura 40 se muestran los resultados de la prueba a la flexión a los 7, 14 y 28 días de curado con la óptima molaridad, óptimo porcentaje de yeso, con el óptimo procedimiento de mezclado con los porcentajes de 0.5, 1, 1.5 y 2% de fibra de ichu y en la Tabla 42, donde se muestra el análisis de varianza (ANOVA) para evaluar la interacción entre las variables Incorporación de Ichu y Días de curado, en la prueba de Prueba a la Flexión, podemos observar que el valor de significancia (**0.000**) es menor al P valor 0.05, por lo que se concluye que entre los tratamientos en estudio, si hubo un efecto entre las interacciones y la capacidad de resistencia en la flexión entre los geopolímeros, asimismo, en la Tabla 43, donde se muestra la prueba de comparación de medias (TUKEY) se puede observar que los mejores tratamientos fueron (1.5% de Ichu x 28 días) y (2.0% de Ichu x 28 días de curado) con 79.86 y 74.32 Kg/cm², respectivamente, siendo ambos tratamientos similares estadísticamente, la prueba además nos arrojó que entre los tratamientos en estudio, existió **diferencia estadística**, siendo los tratamientos que arrojaron los valores más bajo en la prueba de Prueba a la Flexión (0.5% de Ichu x 7 días) y (1.0% de Ichu x 7 días) con 22.66 y 28.34 Kg/cm² respectivamente.

Por otro lado, los valores arrojados por el Coeficiente de Variabilidad (CV) y Coeficiente de Determinación (R^2), nos demuestran que hubo una buena toma de datos por lo que los resultados son confiables.

Tabla 42

Análisis de Varianza para "Prueba a la Flexión"

F DE V.	Grado de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F	Sig.
TRATAMIENTOS	11	11758.66	1068.97	704.17	0.000
% de Ichu	3	3453.35	1151.12	758.29	0.000
Días de curado	2	7585.73	3792.86	2498.51	0.000
Interacción	6	719.58	119.93	79.00	0.000
Error	24	36.43	1.52		
Total	35	11795.09			
CV = 2.52		$R^2 = 99.69$		$X = 48.81$	

Nota. Fuente: Elaboración propia

Figura 40

Resultados de la prueba a la flexión a los 7, 14 y 28 días de curado con la óptima molaridad, óptimo porcentaje de yeso, con el óptimo procedimiento de mezclado con los porcentajes de 0.5, 1, 1.5 y 2% de fibra de ichu

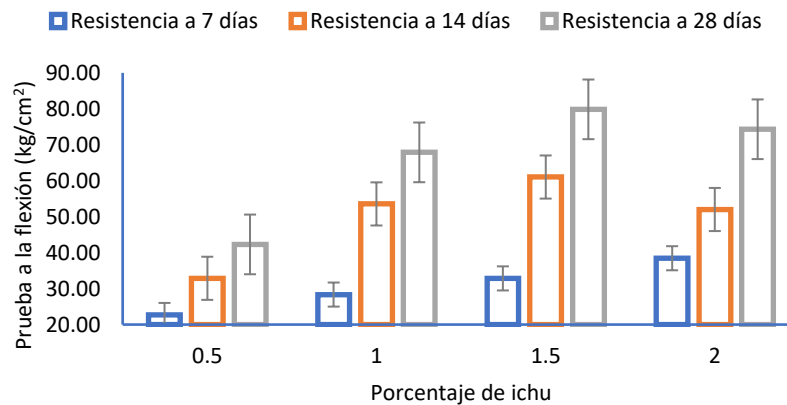


Tabla 43

Prueba de Comparación de Medias "TUKEY"

Tratamientos en estudio	N	1	2	3	4	5	6
0.5% Ichu	7 días	3	22.66				
	14 días	3		32.87			
	28 días	3			42.29		
7 días	3	28.34					

1.0% lchu	14 días	3		53.22
	28 días	3		67.89
<hr/>				
1.5% lchu	7 días	3	32.84	
	14 días	3		61.03
	28 días	3		79.86
<hr/>				
2.0% lchu	7 días	3	38.45	
	14 días	3		52.00
	28 días	3		74.32
<hr/>				

Nota. Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 44, donde se muestra el análisis de varianza (ANOVA) para evaluar la interacción entre las variables Molaridad, porcentaje de yeso y número de días de curado, en la prueba de **densidad del geopolímero**, podemos observar que el valor de significancia (**0.000**) es menor al P valor 0.05, por lo que se concluye que entre los tratamientos en estudio, si hubo un efecto entre las interacciones y la Densidad del Geo polímero, asimismo, en la Tabla 45, donde se muestra la prueba de comparación de medias (TUKEY) se puede observar que los mejores tratamientos fueron (10 molar vs 50% de yeso x 7 días) y (12 molar vs 50% de yeso x 7 días de curado) con 2.32 gr/cm³, respectivamente, siendo ambos tratamientos similares estadísticamente, la prueba además nos arrojó que entre los tratamientos en estudio, existió **diferencia estadística**. Por otro lado, los valores arrojados por el Coeficiente de Variabilidad (CV) y Coeficiente de Determinación (R²), nos demuestran que hubo una buena toma de datos por lo que los resultados son confiables. En la Figura 41 muestra que los geopolimeros con 8, 10 y 12M tienen densidades similares que en promedio es 2.066 gr/cm³ siendo este aproximadamente un 93.91% la densidad de un concreto convencional pero los geopolimeros con 14M son aún más ligeros con 1.890 gr/cm³ siendo este aproximadamente un 85.91% la densidad de un concreto convencional. Estos resultados no coinciden con los obtenidos por Ruiz, (2017), donde indica que para molaridades NaOH de 8 y 14M para densidades de 0.717 gr/cm³ hasta 0.835 gr/cm³ respectivamente, pero si coincide con los estudios realizados por (Pan y otros, 2015; Diaz-Loya, y otros), donde indican que las densidades de los geopolimeros varían de 1.876 hasta 2.555 gr/cm³, que van

desde 8 a 16M de NaOH. estos resultados son similares con la investigación de Öztürk que manifiesta que los geopolimeros de 12M, tienen un peso unitario promedio de 1.535 gr/cm³ y 1.692 gr/cm³ con una relación de SS/SH de 2 y 2.5, y también son cercanos a los obtenidos por los investigadores. Los resultados de los pesos unitarios según la molaridad se pueden observar en la Figura 42. respectivamente

Figura 41

Resultados de la densidad de los geopolimeros a 8, 10, 12 y 14M

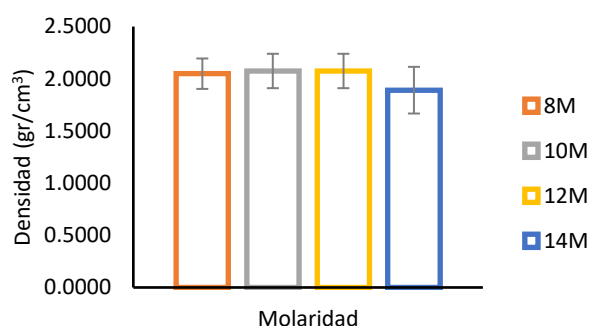


Tabla 44

Análisis de Varianza para "Densidad del Geopolímero"

F DE V.	Grado de Libertad	Suma de Cuadrados	Cuadrado Medio	F	Sig.
TRATAMIENTOS	59	18.38	0.31	52.35	0.000
Molaridad	3	236.15	78.72	13229.98	0.000
Yeso	4	18.16	4.54	763.22	0.000
Interacción (M vs Y)	12	233.44	19.45	3269.64	0.000
Días de curado	2	57.84	28.92	4860.76	0.000
Interacción (Y vs D)	8	66.35	8.29	1393.98	0.000
Interacción (M vs D)	6	293.07	48.85	8209.54	0.000
(M vs Y vs Dc)	24	886.64	36.94	6209.20	0.000
Error	120	0.71	0.01		
Total	179				

CV = 3.79

R² = 96.26

X = 2.05

Nota. Fuente: Elaboración propia

Tabla 45

Prueba de Comparación de Medias "TUKEY"

Tratamientos en estudio		N	Subconjunto		
			1	2	3
10%	3 días	3		2.15	
10%	7 días	3	2.02		

	10%	14 días	3	1.98	
	10%	28 días	3	1.97	
	20%	3 días	3		2.27
	20%	7 días	3		2.19
	20%	14 días	3	1.90	
	20%	28 días	3		2.13
8 Molar	30%	3 días	3		2.26
	30%	7 días	3		2.13
	30%	14 días	3	1.85	
	30%	28 días	3		2.10
	40%	3 días	3		2.19
	40%	7 días	3		2.13
	40%	14 días	3	2.06	
	40%	28 días	3	1.78	
	50%	3 días	3	1.88	
	50%	7 días	3		2.20
	50%	14 días	3	2.04	
	50%	28 días	3	1.84	
	10%	3 días	3	2.03	
	10%	7 días	3	1.96	
	10%	14 días	3	1.93	
	10%	28 días	3	1.90	
	20%	3 días	3	1.79	
	20%	7 días	3		2.26
	20%	14 días	3		2.25
	20%	28 días	3	2.02	
10 Molar	30%	3 días	3		2.14
	30%	7 días	3		2.26

	30%	14 días	3	2.07	
	30%	28 días	3	1.89	
	40%	3 días	3		2.18
	40%	7 días	3		2.26
	40%	14 días	3		2.12
	40%	28 días	3	1.89	
	50%	3 días	3		2.10
	50%	7 días	3		2.32
	50%	14 días	3		2.11
	50%	28 días	3	1.89	
	10%	3 días	3		2.11
	10%	7 días	3	1.96	
	10%	14 días	3	1.93	
	10%	28 días	3	1.90	
	20%	3 días	3	1.85	
	20%	7 días	3		2.26
	20%	14 días	3		2.25
	20%	28 días	3	2.02	
	30%	3 días	3		2.14
	30%	7 días	3		2.26
	30%	14 días	3	2.07	
	30%	28 días	3	1.89	
12 Molar	40%	3 días	3		2.18
	40%	7 días	3		2.26
	40%	14 días	3		2.12
	40%	28 días	3	1.89	
	50%	3 días	3		2.10
	50%	7 días	3		2.32

	50%	14 días	3		2.11
	50%	28 días	3	1.89	
	10%	3 días	3		2.11
	10%	7 días	3		2.10
	10%	14 días	3	2.08	
	10%	28 días	3	2.04	
	20%	3 días	3	2.07	
	20%	7 días	3	2.08	
	20%	14 días	3	2.05	
	20%	28 días	3	1.99	
	30%	3 días	3	2.02	
	30%	7 días	3		2.10
	30%	14 días	3	2.03	
	30%	28 días	3	2.01	
14 Molar	40%	3 días	3	2.04	
	40%	7 días	3	1.94	
	40%	14 días	3	1.81	
	40%	28 días	3	1.74	
	50%	3 días	3	1.76	
	50%	7 días	3	1.62	
	50%	14 días	3	1.56	
	50%	28 días	3	1.45	

Nota. Fuente: Elaboración propia

4.7 Difracción de Rayos X (DRX).

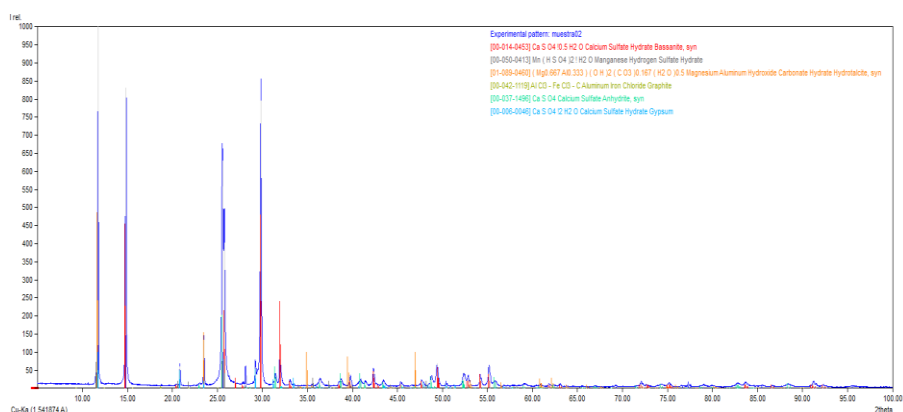
DRX - Ceniza de cáscara de arroz y del yeso

La Figura 42 muestra las composiciones minerales de los activadores sólidos de yeso a utilizar. El yeso utilizado se obtuvo a partir de la deshidratación de $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ de canteras ubicadas en la ciudad de Mórrope en la Región Lambayeque [57]. La Figura 4 muestra los resultados del ensayo de DRX del yeso

semihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$) utilizado en el presente estudio. El análisis de difracción de rayos X se realizó DRX Bruker modelo D8-Focus, se utilizó un tubo de Cu cuya longitud de onda, correspondiente a $\text{K}\alpha_1\text{-Cu}$, es $\lambda=1.5406 \text{ \AA}$. El difractograma se obtuvo en un rango de ángulos (2θ) de 5 a 100 grados en pasos de 0.02° , con tiempo por paso fue de 0.5 segundos, y voltaje de salida del tubo de 40 kV, corriente de salida del tubo de 40 mA, con un detector Lynxeye PSD

Figura 42

Patrón de DRX de los activadores sólidos.

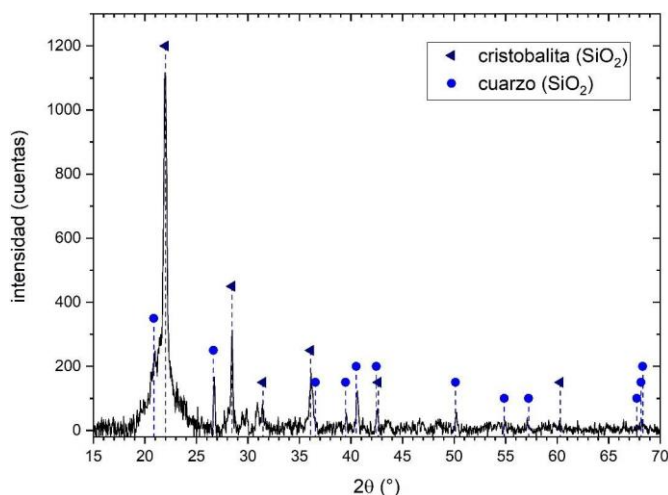


Nota. Prueba de DRX del yeso semihidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$).

En la Figura 43 se evidencia la Difracción de Rayos X de la CCA, evidenciándose la concentración de 20.7% de Cristobalita, 7.7% de Cuarzo y de 71.6% de fase cristalina amorfa

Figura 43

Difractograma de rayos X de la muestra de CCA y las fases cristalinas identificadas.

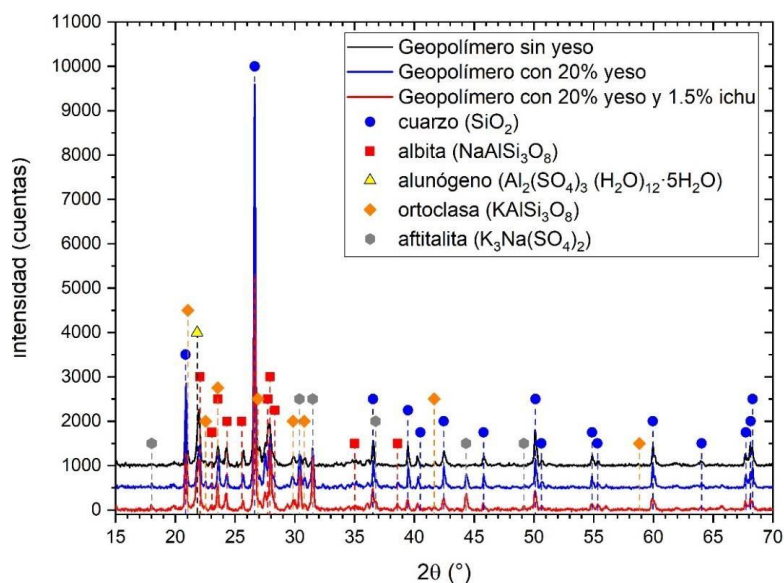


DRX – Geopolímeros.

La Figura 44 muestra el análisis de DRX del geopolímero pulverizado pasando por la malla #100 con la molaridad óptima (12 Molar), el porcentaje óptimo de yeso (20% de yeso), con la mezcla óptima y al 1,5% de fibra de ichu. Los principales ingredientes minerales del geopolímero pueden verse en la Tabla 46 donde el cuarzo varía entre 13,5 y 25,2%, la albita entre 14,5 y 15,9%, el alunógeno entre 10 y 15,1%, la ortoclasa entre 6,1 y 7,7%, la aftalita entre 5,1 y 5,5% y la fase cristalina amorfa entre 35,6 y 46,4%. Estos resultados son similares a los de los investigadores Chao-Lung y Trong-Phuoc y Handayani et al. (Chao-Lung & Trong-Phuoc, 2015; Handayani et al., 2022). El patrón de DRX del geopolímero en la Figura 44 muestra un pico amplio que indica que la mayor parte de la estructura del geopolímero y una serie de ingredientes no solubles en la CCA como el cuarzo persistieron, sin embargo, estos picos redujeron su intensidad, mostrando que los materiales familiares no se disolvieron completamente en los materiales poliméricos inorgánicos. Las diferencias en las intensidades cristalinas tuvieron un claro impacto en las tensiones de compresión de los geopolímeros. La resistencia alcanzada disminuía a medida que disminuía la intensidad de las fases cristalinas. Este fenómeno se corresponde con los resultados de los ensayos de resistencia a la compresión mencionados anteriormente (Davidovits J. , 2005). Por otro lado, la presencia de fases cristalinas menores en las muestras de geopolímeros, como la ortoclasa y la aftalita, es uno de los hallazgos más importantes en los datos recogidos en esta investigación mediante el análisis de DRX (Liew y otros, 2012). El difractograma de DRX del geopolímero muestra un halo difuso con valores de 2θ entre 20 y 57, que es una característica típica de los geles geopoliméricos (Davidovits J. , 2005).

Figura 44

Difractogramas de rayos X de las muestras de "Geopolímeros" y fases cristalinas identificadas

**Tabla 46**

Concentración de fases cristalinas en la muestra "Geopolímero sin yeso", "Geopolímero con 20% de yeso" y "Geopolímero con 20% de yeso z 1,5% de ichu"

Fase cristalina	Geopolímero 12M sin yeso (wt%)	Geopolímero 12M20G (wt%)	Geopolímero 12M20G1.5IF (wt%)
Cuarzo (SiO ₂)	17.7	25.2	13.5
Albita (NaAlSi ₃ O ₈)	15.9	15.9	14.5
Alunógeno (Al ₂ (SO ₄) ₃ (H ₂ O) ₁₂ ·5H ₂ O)	15.1	10.0	14.5
Ortoclasa (KAlSi ₃ O ₈)	7.6	7.7	6.1
Aftitalita (K ₃ Na(SO ₄) ₂)	---	5.5	5.1
Amorfo	43.5	35.6	46.4

Nota. Fuente: Elaboración propia

4.8 Microscopía de Barrido SEM y EDS

Para maximizar la información que se puede apreciar visualmente en las imágenes SEM, se ha optado por mostrar imágenes combinadas. Estas superponen las señales del detector de electrones retrodispersados con la del detector de electrones secundarios en una sola imagen. Con ello se aprecia tanto rasgos morfológicos (secundarios) como composicionales (retrodispersados). A continuación, se presenta cada muestra.

M1 - Geopolymer pieces without gypsum

La Figura 45 muestra una imagen de 200x, en la que pueden observarse varias de las características señaladas. Puede verse la presencia de grietas alrededor de toda la zona medida, así como cierta porosidad en la forma de los dos agujeros marcados con flechas verdes. También hay lo que parecen ser inclusiones de otros materiales, por ejemplo, en las regiones etiquetadas como M1P1 y M1P2. La región etiquetada como M1P3 corresponde al material predominante en toda la imagen. En la Tabla 47 mostramos las composiciones elementales por EDS en las regiones de interés, así como de toda el área de la imagen, mostrando los elementos mayoritarios. Se puede observar que, a pesar del aparente contraste con el entorno, la región M1P1 tiene una composición muy similar a la de la muestra en general, así como a la de la región M1P3. El origen de este contraste puede deberse a efectos de carga en la muestra. La región M1P2, por el contrario, contiene una alta concentración de carbono, así como una presencia medible de cloro. Esto, junto con su aspecto fibroso, puede ser indicativo de un fragmento de ceniza de origen vegetal. La Figura 46 muestra regiones ampliadas a 500x, donde puede apreciarse mejor la morfología de la muestra y la presencia de las inclusiones con alto contenido en carbono.

Figura 45

Micrografía de muestra M1 – “Trozos de geopolímeros sin yeso” a 200x con regiones de interés señaladas

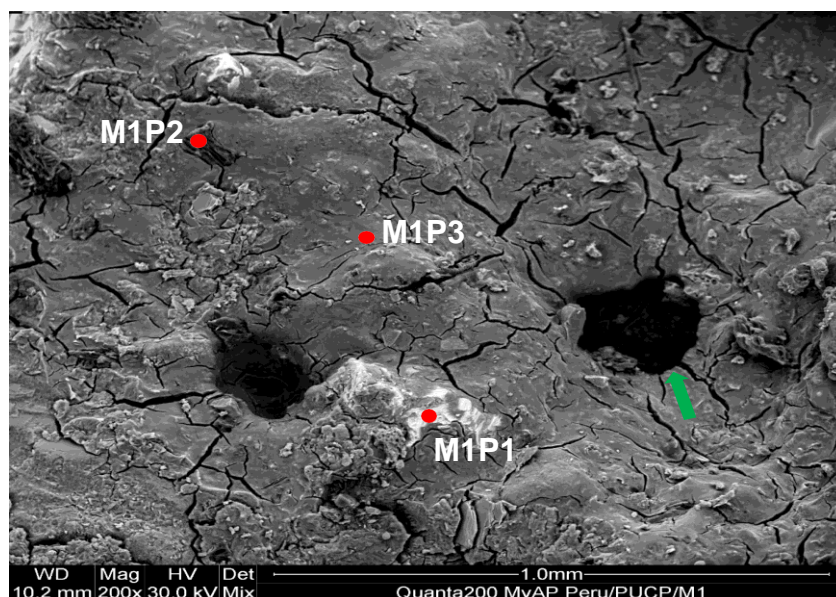


Tabla 47

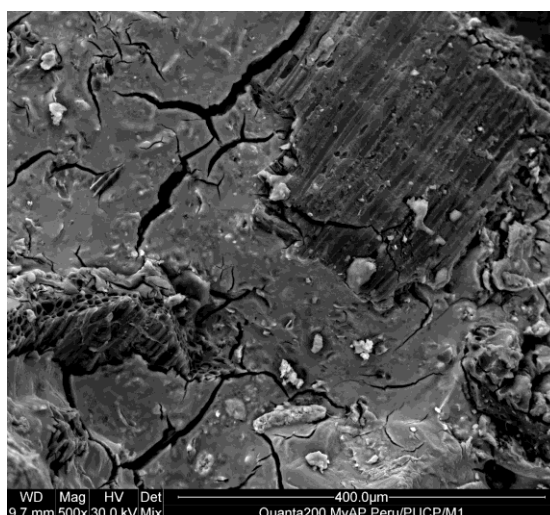
Composición química medida por EDS en diversas regiones de interés de la muestra M1 – “Trozos de geopolímeros sin yeso”

Elemento químico	Área total		M1P1		M1P2		M1P3	
	wt%	at%	wt%	at%	wt%	at%	wt%	at%
C	--	--	--	--	67.04	76.74	--	--
O	45.74	60.21	46.39	60.75	18.24	15.68	44.96	59.49
Na	8.05	7.37	8.20	7.48	6.52	3.90	7.62	7.02
Al	3.04	2.38	2.04	1.58	--	--	4.07	3.19
Si	34.01	25.50	34.41	25.67	5.65	2.77	34.02	25.64
Cl	--	--	--	--	0.43	0.17	--	--
K	6.77	3.64	7.23	3.87	2.11	0.74	6.89	3.73
Fe	2.39	0.90	1.74	0.65	--	--	2.46	0.93

Nota. Fuente: Elaboración propia

Figura 46

Micrografía de muestra M1 – “Trozos de geopolímeros sin yeso” a 500x



M2 - " Trozos de geopolímeros con 20% de yeso "

En la Figura 47 se muestra una imagen de 200x, donde se ha nuevamente señalado regiones de interés. Puede apreciarse tres regiones bien diferenciadas, pudiéndose apreciar que las partes etiquetadas como M2P1 y M2P2 corresponden a inclusiones de diferentes materiales. La región llamada M2P3

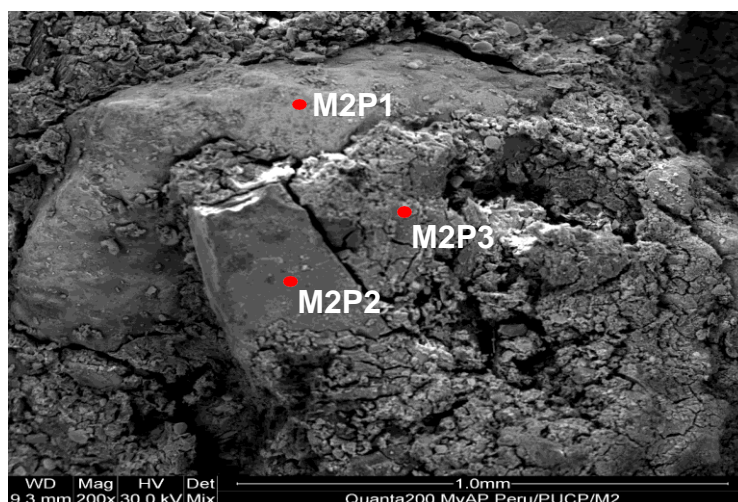
parece ser representativa del grueso de la muestra, observándose un agrietamiento más pronunciado que la muestra anterior. Esto último es consistente con el aspecto visual de la muestra, la cual es considerablemente menos rígida y más granulosa que la anterior.

En la Tabla 48 se muestran las composiciones elementales por EDS en las regiones de interés, así como de toda el área de la imagen, mostrándose los elementos mayoritarios. La composición del área total, así como de la región M2P3, es similar a la muestra anterior. A su vez, se observa la presencia de sodio, potasio y azufre, los cuales son consistentes con la presencia de yeso en la muestra. La región M2P2, en contraste, parece ser una inclusión mineral de óxido de silicio, posiblemente de cuarzo (SiO_2). Sin embargo, las concentraciones atómicas sugieren que su composición parece ser de monóxido de silicio (SiO).

En la Figura 48 se muestra una imagen de 400x de otra región de la misma muestra, donde se ha señalado más regiones de interés. Se puede apreciar las mismas inclusiones ricas en carbono de la muestra anterior en la región M2P4, así como otros materiales en las regiones M2P5 y M2P6. Las composiciones elementales en dichas regiones se aprecian en la Tabla 49. Se verifica que la región M2P4 contiene una concentración elevada de carbono. La región M2P5 parece ser un cristal o fragmento de yeso, dada su alta concentración de azufre, aunque hay una ausencia notoria de calcio. La región M2P6 parece ser una inclusión mineral de otro tipo, dada la presencia de zirconio. Este material no fue observado en las medidas de DRX, lo cual sugiere su presencia en la muestra es de baja concentración.

Figura 47

Micrografía de muestra M2 – “Trozos de geopolímeros con 20% de yeso” a 200x con regiones de interés señaladas.

**Tabla 48**

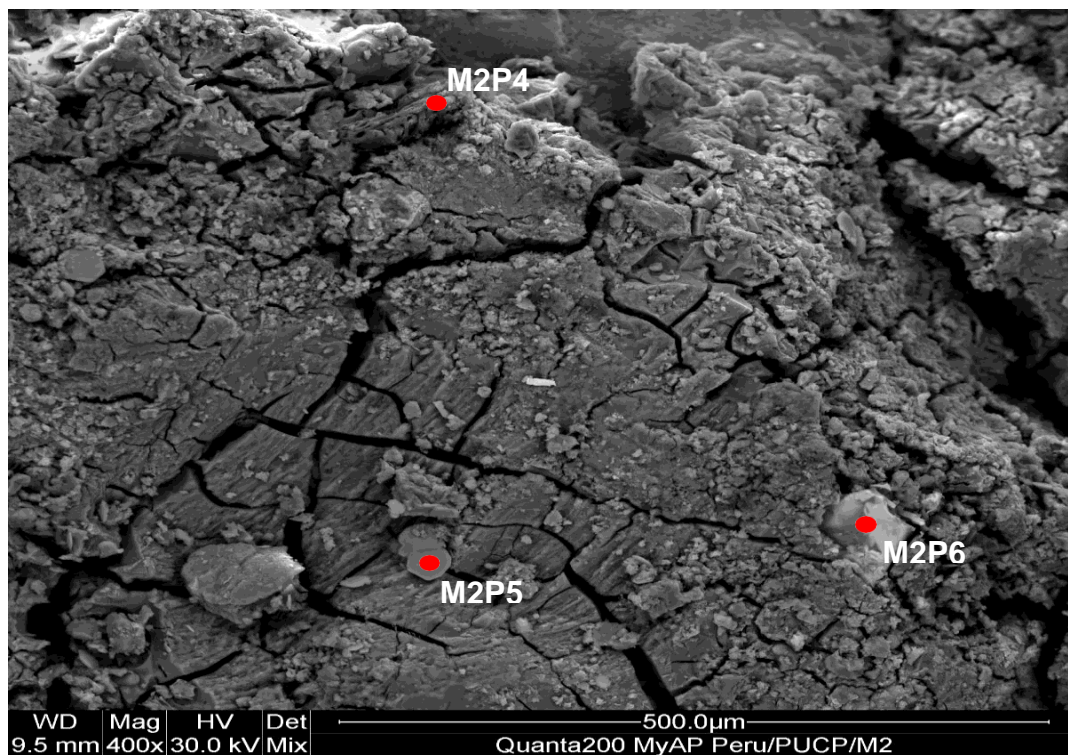
Composición química medida por EDS en diversas regiones de interés de la muestra M2 – “Trozos de geopolímeros con 20% de yeso”.

Elemento químico	Área total		M2P1		M2P2		M2P3	
	wt%	at%	wt%	at%	wt%	at%	wt%	at%
O	45.07	60.20	39.66	58.87	36.26	49.97	45.97	60.17
Na	7.39	6.87	1.65	1.71	--	--	10.22	9.31
Al	2.43	1.93	5.36	4.72	--	--	1.84	1.42
Si	30.33	23.08	20.54	17.37	63.74	50.03	31.07	23.17
S	2.50	1.67	--	--	--	--	2.03	1.33
K	6.14	3.36	0.64	0.39	--	--	6.08	3.26
Ca	3.70	1.97	19.33	11.45	--	--	2.03	1.06
Ti	--	--	0.56	0.28	--	--	--	--
V	--	--	0.04	0.02	--	--	--	--
Mn	--	--	0.23	0.10	--	--	--	--
Fe	2.44	0.93	11.98	5.09	--	--	0.75	0.28

Nota. Fuente: Elaboración propia

Figura 48

Micrografía de muestra M2 – “Trozos de geopolímeros con 20% de yeso” a 400x con regiones de interés señaladas.

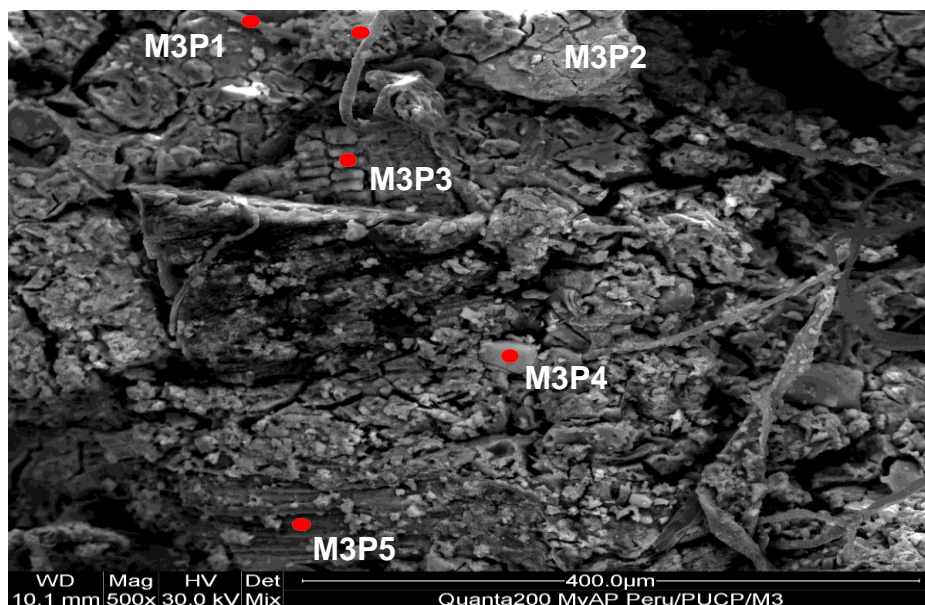


M3 - "Trozos de geopolímeros con 20% de yeso + 1.5% de ichu"

En la Figura 49 se muestra una imagen de 500x con varios puntos de interés señalados. Como se puede apreciar en la imagen, esta muestra es bastante heterogénea y contiene fibras y otros rasgos que son de origen vegetal, como se puede apreciar en las regiones M3P1 y M3P3. Se observa la presencia de las mismas inclusiones de alto contenido de carbono, por ejemplo, en la región M3P5, así como el material base en la región M3P2. En la Tabla 48 se muestra la composición elemental de dichas regiones.

Figura 49

Micrografía de muestra M3 – “Trozos de geopolímeros con 20% de yeso + 1.5% de ichu” a 400x con regiones de interés señaladas.

**Tabla 49**

Composición química medida por EDS en diversas regiones de interés de la muestra M3 – “Trozos de geopolímeros con 20% de yeso + 1.5% de ichu”.

Elemento químico	Área total		M3P1		M3P2		M3P3		M3P4		M3P5	
	wt%	at%	wt%	at%	wt%	at%	wt%	at%	wt%	at%	wt%	at%
C	23.40	35.47	35.61	47.82	--	--	39.34	57.10	--	--	--	--
O	39.09	42.66	35.52	35.81	38.71	55.64	19.34	21.07	33.17	51.07	44.39	60.44
Na	6.64	5.04	5.55	3.89	6.18	6.18	2.82	2.14	5.44	5.83	5.21	4.94
Mg	--	--	--	--	1.66	1.57	--	--	--	--	--	--
Al	1.18	0.77	3.22	1.92	6.41	5.46	--	--	--	--	1.10	0.89
Si	18.09	11.25	13.14	7.55	25.74	21.07	12.98	8.06	7.76	6.81	27.86	21.61
S	2.12	1.15	1.27	0.64	0.92	0.66	3.19	1.73	18.16	13.95	4.64	3.15
Cl	0.31	0.15	0.75	0.34	0.14	0.09	--	--	--	--	0.19	0.12
K	5.99	2.68	4.75	1.96	4.79	2.81	17.03	7.59	35.47	22.34	10.79	6.01
Ca	1.33	0.58	0.18	0.07	0.84	0.48	5.31	2.31	--	--	3.72	2.02
Mn	--	--	--	--	0.99	0.41	--	--	--	--	--	--
Fe	0.84	0.26	--	--	13.64	5.61	--	--	--	--	2.10	0.82

Nota. Fuente: Elaboración propia

4.9 Espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR).

El análisis de FTIR se realizó bajo la norma ASTM E1252–21 (ASTM E1252-21, 2021), en la Figura 50 se muestra el espectro FTIR del geopolimero con la óptima molaridad (12 Molar), óptimo porcentaje de yeso (20% de yeso), con el óptimo mezclado y a 1.5% de fibra de ichu, Se utilizó un Espectrómetro Infrarrojo FTIR Tensor 27, con pastilla de KBr,

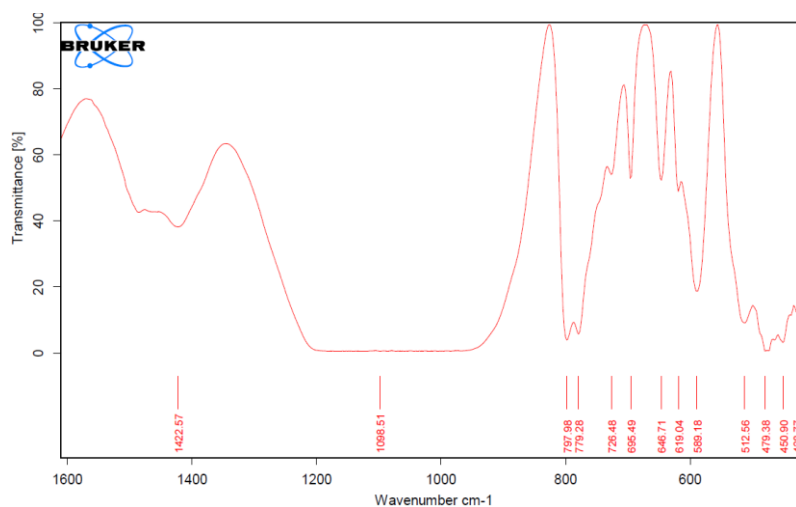
La muestra fue molida y mezclada con KBr en proporción 20:1 (KBr : Geopolimero), tratada según se indica en la norma ASTM E1252–21. se identificaron que los picos analizados son compatibles con geopolímeros. Los espectros FTIR de las muestras de geopolímero de referencia muestran bandas anchas alrededor de 3450 cm^{-1} relacionadas a las vibraciones de estiramiento O–H y H–O–H. Se observan vibraciones de flexión H–O–H en el espectro alrededor de 1640 cm^{-1} del agua unida químicamente en el gel (Guo y otros, 2022).

La banda más característica se encuentra entre 900 y 1100 cm^{-1} , se puede atribuir a la existencia de vibraciones de estiramiento asimétricas de Si–O–Si y Al–O–Si, que son los componentes básicos del geopolímero, y este rango es más bajo que el del gel C–A–S–H (es decir, 940 cm^{-1}) y más alto que el del gel N–A–S–H (es decir, 1030 cm^{-1}), lo que indica la presencia de múltiples productos de gel (Guo y otros, 2022; Zhang y otros, 2017).

El pico alrededor de 793 cm^{-1} se puede relacionar con vibraciones de estiramiento simétricas de Si–O–Si. Las vibraciones de flexión de Si–O–Si y O–Si–O están asociadas con los picos alrededor de 450 y 480 cm^{-1} relacionada con la formación de enlaces de sialato (Si–O–Al–O) relacionados con la policondensación del silicato de sodio, esta banda es característica de las cristobalitas cristalinas (Handayani et al., 2022; Kljajević y otros, 2022). Sin embargo, el pico de absorción era débil, lo que puede ser el resultado de la carbonización durante la preparación de la muestra (Guo y otros, 2022).

Figura 50.

Espectro FTIR de la muestra Geopolímero con 20% de yeso + 1.5% de fibra de ichu pulverizado.



4.10 Analisis Termogravimétrico (TGA)

El análisis de TGA se realizó bajo la norma ASTM E1131-20 (ASTM E1131, 2020), en la Figura 51 se la curva TGA del geopolimero con la óptima molaridad (12 Molar), óptimo porcentaje de yeso (20% de yeso), con el óptimo mezclado y a 1.5% de fibra de ichu. El análisis se realizó en el rango de temperatura de 30 – 990°C a tasa de 10°C/min, con un gas de purga: Nitrógeno 30 a 600°C / Oxígeno 600 a 990°C con flujo de 50 ml/min. De la curva termo-gravimétrica (TG) de la Figura 50 (curva azul y roja), se observan cuatro eventos de cambio de masa, relacionados a la descomposición de agua y de materiales orgánicos que ocurre antes de 600°C y posteriormente la descomposición de compuestos inorgánicos en presencia de oxígeno hasta 990°C. La masa residual al final del ensayo a 990°C es de 90,6%. Así mismo, se identifica las temperaturas de máxima pérdida de masa de agua y materiales orgánicos 85, 160 y 274°C (DTG, curva verde de la Figura 50) y la descomposición de materiales inorgánicos en presencia de oxígeno a 611 y 940 °C. La evaporación del agua y la dihidroxilación son probablemente los efectos responsables de la pérdida de masa durante el tratamiento térmico del geopolímero (Kljajević y otros, 2022). El agua física y química de los geopolímeros endurecidos se evapora alrededor de 100°C, y el agua química entre 100-300°C, respectivamente. A temperaturas superiores a 300°C, los grupos hidroxilo se evaporarían gradualmente. A una temperatura más

alta de 800–850 °C, comenzaría la formación de un compuesto cerámico (Redaoui y otros). La baja pérdida de masa por encima de los 800–850 °C indicaría la detención de la descomposición térmica adicional de las muestras de geopolímeros (Elimbi y otros, 2014). La masa residual de la muestra es de 90,6%, siendo el 9,4% la pérdida de masa total (Yavuz & Kul Gul, 2022). Los valores de los resultados son presentados en la Tabla 50.

Tabla 50

Resultados del análisis termogravimétrico (TGA)

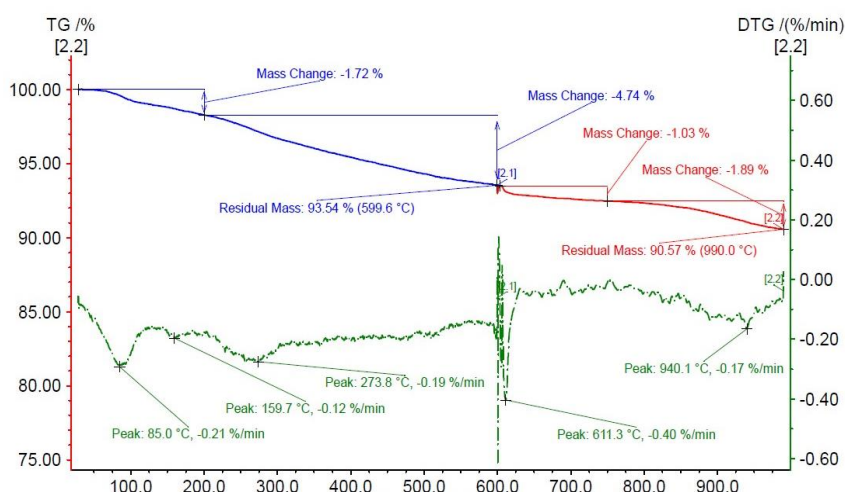
Muestra	Temperaturas de máxima pérdida de masa (*) (°C)	Pérdida de masa (%)				Masa residual a 990 °C (%)
		30 – 200 °C	200 – 600°C	600 – 750°C (**)	750 – 990°C (**)	
Geopolímero	85					
	160					
	274					
	611	1,7	4,7	1,0	1,9	90,6
	940					

Nota: () De la curva DTG, (**) En ambiente de oxígeno.*

Nota. Fuente: Elaboración propia

Figura 51

Termograma de la muestra Geopolímero Pulverizado, Análisis termogravimétrico (TGA – línea azul y roja) Derivada de la pérdida de masa (DTG - línea verde)



CAPÍTULO V

5.1 Conclusiones

Teniendo en cuenta los resultados y las discusiones realizadas se pueden llegar a las conclusiones siguientes:

1. La actividad puzolánica óptima para CCA fue de 700 °C (ASTM C618), la resistencia mejoró un 23.80% con respecto al mortero patrón de 210 kg/cm². Esta mejora está directamente relacionada al contenido de sílice (71.50%).
2. La resistencia a la compresión del geopolímero mejoró conforme la molaridad del NaOH se incrementó. Siendo para 8, 10, 12 y 14 M resistencias a la compresión de 13.00, 13.90, 21.77 y 23.40 kg/cm² respectivamente.
3. Las propiedades mecánicas del geopolímero fueron óptimas al adicionarse 20% de yeso hasta 12 M, sin embargo, proporciones mayores a 12 M de NaOH provoca una reducción en la resistencia. Evidenciando que las resistencias a la compresión a 8, 10, 12 y 14 M + 20% de yeso fueron de 47.54, 51.20, 80.06 y 49.13 kg/cm².
4. Manteniendo las mezclas al 12 M de NaOH con 20% de yeso; la mejor secuencia de mezclado que trabaja a la compresión fue ((CCA+NaOH)+Na₂O₃)+yeso con una resistencia de 97.22 kg/cm². La mejor secuencia de mezclado que trabajan a flexión y tracción fue (CCA+NaOH+Na₂O₃)+yeso con 32.39 y 23.59 kg/cm² respectivamente.
5. Manteniendo la mezcla 12 M de NaOH con 20% de yeso y con secuencia de mezclado ((CCA+NaOH)+Na₂O₃)+yeso; las propiedades mecánicas de los geopolímeros con adición de fibras de ichu fue óptima al 1.5%, con valores de resistencias a la compresión, flexión y tracción de 125.21, 79.86 y 22.47 kg/cm², respectivamente. La adición de fibras de ichu mejoró las propiedades mecánicas del geopolímero.
6. Dentro del mejor geopolímero hallado se encontró cuarzo, aluminosilicatos, y aftalita, en los análisis de SEM y EDS hubo presencia de inclusiones ricas en carbono, procedentes de cenizas de origen vegetal, también se observó la presencia de 39.09% de oxígeno, 23.40% carbono, 5.99% de potasio, 6.64% de sodio, 1.18% de aluminio, 18.09% de silicio, 2.12% de azufre, 0.31% de cloro, 5.99% de potasio, 1.33% de calcio, 0.84% de fierro y 1.01% (magnesio y manganeso). Se alcanzó un porcentaje de masa residual del 90.6% a 990

°C, y el geopolímero posee vibraciones de estiramiento O-H y H-O-H, vibraciones de flexión H-O-H en el espectro infrarrojo cercano de 1640 cm^{-1} y vibraciones de estiramiento Si-O-Si y Al-O-Si asimétricas, tal como se observa en el espectrograma en las frecuencias de 470, 800 y 1070 cm^{-1} .

7. Finalmente se determinó que la incorporación de ceniza de cáscara de arroz con proporción de 0.4 (peso de los álcalis / peso del CCA) + 20% de yeso + 1.5% de fibra de ichu influyeron de manera positiva en la resistencia mecánica ya que se logró alcanzar resistencias adecuadas para sustituir al concreto no estructural (menores a $f'c = 210\text{ kg/cm}^2$) pudiendo generar una reducción en el uso del cemento Portland de esta manera el geopolímero desarrollado podría constituirse en un material de construcción amigable con el medio ambiente.

5.2 Recomendaciones

Se recomienda:

1. Investigar la actividad puzolánica a través de pruebas de refracción de rayos X y compararlas con las de resistencia a la compresión.
2. Investigar el proceso de curado del geopolímero de 8, 10, 12 y 14 M a altas temperaturas con la ceniza de cáscara de arroz.
3. Investigar nuevos geopolímeros para mejorar su resistencia a la compresión con ingredientes de cenizas volantes, escorias de alto horno, microsílíce, metacaolín.
4. Evaluar la elaboración de geopolímeros con materiales precursores tales como cenizas volantes, escorias de alto horno, microsílíce, metacaolín y otro componente sustituyente del yeso (si fuera necesario) con los procesos de mezclado de: $((\text{material precursor} + \text{NaOH}) + \text{Na}_2\text{O}_3) + \text{cal}$), $((\text{material precursor} + (\text{NaOH} + \text{Na}_2\text{O}_3)) + \text{cal})$ y $((\text{material precursor} + \text{NaOH} + \text{Na}_2\text{O}_3) + \text{cal})$.
5. Investigar las propiedades mecánicas de los geopolímeros empleando materiales precursores como cenizas volantes, escorias de alto horno, microsílíce, metacaolín reforzadas con fibras vegetales como fibra de coco, fibra de plátano, fibra de caña de azúcar entre otros a diferentes temperaturas de curado.
6. Evaluar las propiedades microestructurales de los geopolímeros empleando materiales precursores como cenizas volantes, escorias de alto horno,

microsílice, matacaolín reforzadas con fibras vegetales como fibra de coco, fibra de plátano, fibra de caña de azúcar entre otros a diferentes temperaturas de curado.

7. Continuar con investigaciones usando materiales precursores mencionados como insumo para desarrollar geopolímeros ecoamigables a altas temperaturas de curado para acelerar el proceso de geopolimerización, y de esta manera reduzca el uso de cemento y disminuya la huella de carbono.

REFERENCIA BIBLIOGRÁFICAS

- Abd-Ali, M., & Kadhim, S. (2020). Experimental Study on Influence of Iraqi Rice Husk Ash as Supplementary Material on the Performance of Concrete. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 870, 012050. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/870/1/012050>
- Adnan , S., Azemi , N., Osman, M., Jeni , M., Ern , P., Yassin , N., Jamellodin , Z., Hamid , N., & Akasyah , W. (2019). Influence of Palm oil fuel ash (POFA) towards fire resistance performance of brick. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 265, 120357. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120357>
- Ahmad, M., Abdullah, M., Samad, A., Ramasamy, S., & Nawli, M. (2020). Effects of aging to the mechanical properties of geopolymer concrete with addition of hooked steel fibers cured at ambient temperature. *1st International Conference on Science, Engineering and Technology, ICSET 2020*, 932, p. 012121. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/932/1/012121>
- Ali , M., Sidur, R., & Hossain, M. (2011). A review on emission analysis in cement industries. *Renew Sust Energ Rev*, 15(5), 2252–2261.
- Alsaif, A., Albidah, A., Abadel, A., Abbas, H., & Al-Salloum, Y. (2022). Development of metakaolin-based geopolymer rubberized concrete: fresh and hardened properties. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 22(3), 144. <https://doi.org/10.1007/s43452-022-00464-y>
- Alyousef, R., Alabduljabbar, H., El-Zeadani, M., & Amran, Y. (2020). Clean production and properties of geopolymer concrete; A review. *Journal of Cleaner Production*, 251. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119679>
- Amari, S., Darestani, M., Millar, G., Rintoul, L., & Samali, B. (2021). Microchemistry and microstructure of sustainable mined zeolite-geopolymer. *Journal of Cleaner Production*, 234, 1165 - 1177. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.237>
- Amran, M., Debbarma, S., & Ozbakkaloglu, T. (2021). Fly ash-based eco-friendly geopolymer concrete: A critical review of the long-term durability properties. *Construction and Building Materials*, 270. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121857>
- An, Q., Pan, H., Zhao, Q., Du, S., & Wang, D. (2022). Strength development and microstructure of recycled gypsum-soda residue-GGBS based geopolymer. *Construction and Building Materials*, 331, 127312. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127312>
- Anjani Kumar Yadav, Kumar Gaurav, Roop Kishor, & S.K. Suman. (2017). Stabilization of alluvial soil for subgrade using rice husk ash, sugarcane bagasse ash and cow dung ash for rural roads. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 10(3), 254-261. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2017.02.001>
- Apolonio, P., Lima, J., Marinho, E., Nobrega, A., Freitas, J., & Martinelli, A. (2020). Produção de geopolímeros utilizando cinza da casca de arroz como fonte complementar de sílica. *Cerâmica*, 172-178. <https://doi.org/10.1590/0366-69132020663782914>
- Arruda Pereira, M., Leite Vasconcelos, D. C., & Vasconcelos, W. L. (2019). Synthetic Aluminosilicates for Geopolymer Production. *Materials Research*, 22(2). <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2018-0508>
- ASTM E1131. (2020). *Standard Test Method for Compositional Analysis by Thermogravimetry - TGA*. ASTM International.

- ASTM E1252-21. (2021). *Standard Practice for General Techniques for Obtaining Infrared Spectra for Qualitative Analysis*. ASTM International.
- Bazan, P., Kozub, B., Łach, M., & Korniejenko, K. (2020). Evaluation of hybrid melamine and steel fiber reinforced geopolymers composites. *Materials*, 13(23), 1 - 15. <https://doi.org/10.3390/ma13235548>
- Bellum, R., Venkatesh, C., & Madduru, S. (2021). Influence of red mud on performance enhancement of fly ash-based geopolymer concrete. *Innovative Infrastructure Solutions*, 6(4), 215. <https://doi.org/10.1007/s41062-021-00578-x>
- Bellum, R., Venkatesh, C., & Madduru, S. (2021). Influence of red mud on performance enhancement of fly ash-based geopolymer concrete. *Innovative Infrastructure Solutions*, 6(4), 215. <https://doi.org/10.1007/s41062-021-00578-x>
- Bernal, C. (2010). *Metodología de la investigación administración, economía, humanidades y ciencias sociales*. PEARSON. <https://anyflip.com/vede/ohla/basic>
- Billong, N., Kinuthia, J., Oti, J., & Melo, U. (2018). Shear behavior of geopolymer concrete panels under diagonal tensile stresses. *Construction and Building Materials*, 189, 307 - 313. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.001>
- Bobirică, C., Shim, J.-H., & Park, J.-Y. (2017). Leaching behavior of fly ash-waste glass and fly ash-slag-waste glass-based geopolymers. *Ceramics International*.
- Burduhos Nergis, D., B. Abdullah, A., Vizureanu, P., & Tahir, M. (2018). Geopolymers and Their Uses: Review. *Euroinvent ICIR*. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/374/1/012019>
- Candiotti, S., Mantari, J., Flores, C., & Charca, S. (2020). Assessment of the mechanical properties of peruvian Stipa Obtusa fibers for their use as reinforcement in composite materials. *Composites Part A*, 135, 105950. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2020.105950>
- Cárdenas Pulido, J., Aperador Chaparro, J., Aperador Chaparro, W., Pinzón Cárdenas, M., Pinzón Cárdenas, M., & Ospina Guzman, M. (2019). Cenizas de cascarilla de arroz para la activación alcalina de cementantes binarios (ceniza volante/escoria de alto horno). *Matéria*.
- Carter, K., Deaver, E., Ziehl, P., & N. Assi, L. (2020). Review of availability of source materials for geopolymer/sustainable concrete. *Journal of Cleaner Production*, 263. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121477>
- Chao-Lung, H., & Trong-Phuoc, H. (2015). Effect of alkali-activator and rice husk ash content on strength development of fly ash and residual rice husk ash-based geopolymers. *Construction and Building Materials*, 101, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.025>
- Chen, L., Komarneni, S., Wang, H., Zhuang, X. Y., Zhou, C. H., Tong, D. S., Yang, H. M., & Yu, W. H. (2016). Fly Ash-based Geopolymer: Clean Production, Properties and Applications. *Journal of Cleaner Production*, 125, 253-267. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.019>
- Chithambar, A., Rajesh Kumar, K., Vinod Kumar, M., Vyshnavi, Vandhiyan, R., Gurumoorthy, N., & Sivakumar, S. (2020). Durability Studies on the Hybrid Fiber reinforced Geopolymer concrete made of M-sand under ambient curing. *2020 International Conference on Recent Advancements in Engineering and Management, ICRAEM 2020*, 981, p. 032074. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/981/3/032074>

- Cong, P., & Cheng, Y. (2021). Advances in geopolymer materials: A comprehensive review. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 351. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2021.03.004>
- da Silva Alves, L., dos Reis Ferreira, R., Bellini Machado, L., & de Castro Motta, L. (2019). Optimization of metakaolin-based geopolymer reinforced with sisal fibers. *Industrial Crops and Products*, 139, 111551. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111551>
- Danish, A., & Mosaberpanah, M. (2021). Influence of cenospheres and fly ash on the mechanical and durability properties of high-performance cement mortar under different curing regimes. *Construction and Building Materials*, 279, 122458. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122458>
- Dassekpo, J., Feng, W., Miao, L., & Dong, Z. (2021). Effect of alkali activators on loess geopolymer: potential waterproof repair material. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 33(9), 04021247-1. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003784](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003784)
- Davidovits, J. (2005). Geopolymers Inorganic polymeric new materials. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 37(8), 1633–1656. <https://doi.org/10.1007/bf01912193>
- Davidovits, J. (2013). Geopolymer cement: A review. *Institut Géopolimere*, 1-11. <https://torusdome.com/wp-content/uploads/2015/07/2013GeopolymerReview.pdf>
- Davidovits, J. (2020). *Geopolymer Chemistry and Applications*. (J. Davidovits, Ed.) Geopolymer Institute, Saint-Quentin, France.
- Diab, M. (2022). Enhancing class F fly ash geopolymer concrete performance using lime and steam curing. *Journal of Engineering and Applied Science*, 69(1), 59. <https://doi.org/10.1186/s44147-022-00111-6>
- Diaz-Loya,, E. I., Allouche, E., & Vaidya, S. (s.f.). Mechanical Properties of Fly-Ash-Based Geopolymer Concrete. *ACI materials journal*, 108(3), 300-306.
- Dimas, F., & Arie , W. (2019). Penggunaan abu sekam padi sebagai bahan substitusi fly ash pada mortar geopolimer dengan naoh 8 molar ditinjau dari kuat tekan dan porositas. *Rekayasa Teknik Sipil*, 1(3). <https://ejournal.unesa.ac.id/index.php/rekayasa-teknik-sipil/article/view/28948>
- Duxson, P. (2009). Geopolymer precursor design. In J. Provis, & J. Van Deventer (Eds.), *Geopolymers: Structures, processing, properties and industrial applications*.
- Elimbi, A., Tchakoute, H., Kondoh, M., & Dika Manga, J. (2014). Thermal behavior and characteristics of fired geopolymers produced from local Cameroonian metakaolin. *Ceramics International*, 40(3), 4515 - 4520. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2013.08.126>
- El-Sayed, T., & Shaheen, Y. (2020). Flexural performance of recycled wheat straw ash-based geopolymer RC beams and containing recycled steel fiber. *Structures*, 28, 1713 - 1728. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.10.013>
- Fahim Hussein, G., J. Mirzaa, S. K. Ghoshal, & A. Abdulameer Hussein. (2017). Geopolymer mortars as sustainable repair material: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, 54-74. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.076>
- Farhan, K., Johari, M., & Demirboğa, R. (2021). Impact of fiber reinforcements on properties of geopolymer composites: A review. *Journal of Building Engineering*, 44, 102628. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102628>

- Federación Interamericana del Cemento. (2019). *Informe estadístico 2019*. https://ficem.org/wp-content/uploads/2021/06/00_Informe-estadistico-2019.pdf
- Fernando, S., Gunasekara, C., Law, D., Nasvi, M., Setunge, S., & Dissanayake, R. (2021). Life cycle assessment and cost analysis of fly ash–rice husk ash blended alkali-activated concrete. *Journal of Environmental Management*, 295, 113140. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113140>
- Garces, J. I., Dollente, I. J., Beltran, A. B., Tan, R. R., & Promentilla, M. A. (2021). Life cycle assessment of self-healing geopolymers concrete. *Cleaner Engineering and Technology*, 4. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100147>
- García, C., Navarro, A., & Ramírez, J. (2015). *ESTUDIO DEL YESO TRADICIONAL Y SUS APLICACIONES EN LA ARQUITECTURA DEL PALLARS SOBIRÁ*. <https://core.ac.uk/download/pdf/46111557.pdf>
- Gholampour, A., Danish, A., Ozbakkaloglu, T., HeumYeon, J., & Gencil, O. (2022). Mechanical and durability properties of natural fiber-reinforced geopolymers containing lead smelter slag and waste glass sand. *Construction and Building Materials*, 352, 129043. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129043>
- Giergiczny, Z. (2019). Fly ash and slag. *Cement and Concrete Research*, 124. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105826>
- Gire Quispe, A., & Caceres Lupaca, A. (2019). "Evaluación de La Influencia del tratamiento superficial sobre el comportamiento mecánico de fibras de Ichu en biocompuestos a base de Pla. Universidad Nacional de San Agustín. <http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/UNSA/11140/IMGiqua%26aluag.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Gökhan , K., & Gökhan , G. (2019). Investigation of usability of quarry dust waste in fly ash-based geopolymer adhesive mortar production. *Construction and Building Materials*, 217, 498-506. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.05.104>
- Guo, L., Zhou, M., Wang, X., Li, C., & Jia, H. (2022). Preparation of coal gangue-slag-fly ash geopolymer grouting materials. *Construction and Building Materials*, 328(126997). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126997>
- Hamada, H., Skariah Thomas, B., Yahaya, F., Muthusamy, K., Yang, J., Abdalla, J., & Hawileh, R. (2021). Sustainable use of palm oil fuel ash as a supplementary cementitious material: A comprehensive review. *Journal of Building Engineering*, 40, 102286. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.job.2021.102286>
- Han, Y., Lin, R., & Wang, X. (2021). Performance and sustainability of quaternary composite paste comprising limestone, calcined Hwangtoh clay, and granulated blast furnace slag. *Journal of Building Engineering*, 43, 102655. <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.102655>
- Handayani, L., Aprilia, S., Abdullah, Rahmawati, C., Aulia, T., Ludvig, P., & Ahmad, J. (2022). Sodium Silicate from Rice Husk Ash and Their Effects as Geopolymer Cement. *Polymers*, 14(14), 2920. <https://doi.org/10.3390/polym14142920>
- Haozhe , G., Peng , Y., Baifa , Z., Qiang , W., Liangliang , D., & Dong , L. (2021). Realization of high-percentage addition of fly ash in the materials for the preparation of geopolymer derived from

- acid-activated metakaolin. *Journal of Cleaner Production*, 285, 125430. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125430>
- Hassan, A., Arif, M., & Shariq, M. (2019). Use of geopolymer concrete for a cleaner and sustainable environment. *Journal of Cleaner Production*.
- Hernández Sampieri , R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, M. (2014). *Metodología de la Investigación sexta edición*. McGRAW-HILL / INTERAMERICANA EDITORES, S.A. DE C.V.
- Hosan, A., Haque, S., & Shaikh, F. (2016). Compressive behaviour of sodium and potassium activators synthesized fly ash geopolymer at elevated temperatures: A comparative study. *Journal of Building Engineering*, 8, 123-130. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2016.10.005>
- Hossain, S., Roy, P., & Chang-Jun, B. (2021). Utilization of waste rice husk ash for sustainable geopolymer: A review. *Construction and Building Materials*, 310, 125218. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125218>
- Ilmiah, R. (2017). *Pengaruh Penambahan Abu Sekam Padi Sebagai Pozzolan Pada Binder Geopolimer Menggunakan Alkali Aktifator Sodium Silikat (Na₂SiO₃) Serta Sodium Hidroksida (NaOH)*. Institutteknologi Sepuluh Nopember. <https://repository.its.ac.id/2962/>
- Indrayani, Herius, A., Mirza, A., & Ravsyah, R. (2020). Comparison of the use of fly ash dan rice husk ash in the making of geopolymer concrete. *Atlantis Highlights in Engineering - Proceedings of the 4th Forum in Research, Science, and Technology (FIRST-T1-T2-2020)*, 7, 339-342. <https://doi.org/10.2991/ahe.k.210205.056>
- Ionescu, B., & Lăzărescu, A. (2020). A Review Regarding the Use of Natural and Industrial by-products in the Production of Geopolymer Binders. *Materials Science and Engineering*, 877. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/877/1/012033>
- Januar, F., Monita, O., & Iskandar, R. (2016). Perancangan Mortar Geopolimer Abu Sekam. *Jurnal Online Mahasiswa Fakultas Teknik Universitas Riau*, 3(2), 1-8.
- K. Wattimena, O., Antoni, & Hardjito, D. (2017). A review on the effect of fly ash characteristics and their variations on the synthesis of fly ash based geopolymer. *AIP Conference Proceedings*, 1887(1). <https://doi.org/10.1063/1.5003524>
- Kalaw, M., Kalaw, J., & Promentilla, M. (2021). Geopolymers synthesized from philippine coal ash as sustainable alternative low heat transmission and fire-resistant material for buildings. *ASEAN Engineering Journal*, 11(3), 45-56. <https://doi.org/10.11113/AEJ.V11.16871>
- Kathirvel, P., & Sreekumaran, S. (2021). Sustainable development of ultra high performance concrete using geopolymer technology. *Revista de ingeniería de la construcción*, 39, 102267. <https://doi.org/10.1016 / j.jobbe.2021.102267>
- Khater, H. (2019). Development and characterization of sustainable. *Cerâmica*, 153.
- Kljajević, L., Nenadović, M., Ivanović, M., Bučevac, D., Mirković, M., Nikolić, N., & Nenadović, S. (2022). Heat Treatment of Geopolymer Samples Obtained by Varying Concentration of Sodium Hydroxide as Constituent of Alkali Activator. *Gels*, 8(6), 333. <https://doi.org/10.3390/gels8060333>

- Kotop, M., El-Feky, M., Alharbi, Y., Abadel, A., & Binyahya, A. (2021). Engineering properties of geopolymer concrete incorporating hybrid nano-materials. *Ain Shams Engineering Journal*, 12(4), 3641 - 3647. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2021.04.022>
- Kumer Saha, A. (2018). Effect of class F fly ash on the durability properties of concrete. *Sustainable Environment Research*, 28(1), 25-31. <https://doi.org/10.1016/j.serj.2017.09.001>
- Laxman Yadav, A., Sairam, V., Muruganandam, L., & Srinivasan, K. (2020). Synthesis and characterization of geopolymer from metakaolin and sugarcane bagasse ash. *Construction and Building Materials*, 258, 119231. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119231>
- Leite Vasconcelos, D. C., & Vasconcelos, W. L. (2019). Synthetic Aluminosilicates for Geopolymer Production. *Materials Research*, 22(2). <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2018-0508>
- Lianasari, A., Atmajayanti, A., Efendi, B., & Sitidaon, N. (2015). Sifat mekanik beton geopolimer berbasis solid material abu terbang (fly ash) dan abu sekam padi (rice husk ash) dengan alkaline activator sodium silikat dan sodium hidroksida. *E-Journal Universitas Atma Jaya Yogyakarta*. <https://www.onesearch.id/Record/IOS2676.7451/TOC#toc>
- Liang, G., Zhu, H., Zhang, Z., & Wu, Q. (2019). Effect of rice husk ash addition on the compressive strength and thermal stability of metakaolin based geopolymer. *Construction and Building Materials*.
- Liew, Y., Kamarudin, H., Al Bakri, A., Bnhussain, M., Luqman, M., Khairul Nizar, I., Ruzaidi, C., & Heah, C. (2012). Optimization of solids-to-liquid and alkali activator ratios of calcined kaolin geopolymeric powder. *Construction and Building Materials*, 37, 440 - 451. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.07.075>
- Mabroum, S., Moukannaa, S., El Machi, A., Taha, Y., Benzaazoua, M., & Hakkou, R. (2020). Mine wastes based geopolymers: A critical review. *Cleaner Engineering and Technology*, 1. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2020.100014>
- Majhi, R. K., Padhy, A., & Nayak, A. (2021). Performance of structural lightweight concrete produced by utilizing high volume of fly ash cenosphere and sintered fly ash aggregate with silica fume. *Cleaner Engineering and Technology*, 3. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100121>
- Martin Ernesto L., K., Joshua Martin, K., & Michael Angelo B., P. (2021). Geopolymers synthesized from philippine coal ash as sustainable alternative low heat transmission and fire-resistant material for buildings. *ASEAN Engineering Journal*, 11(3), 45-56. <https://doi.org/10.11113/AEJ.V11.16871>
- Martínez López, C. (2015). *Evaluación ambiental del uso de geopolímeros basados en dos puzolanas volcánicas como puzolanas volcánicas como alternativa potencial al cemento portland*. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/54362>
- Mehta, A., & Siddique, R. (2016). An overview of geopolymers derived from industrial by-products. *Construction and Building Materials*, 127, 183-198. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.136>
- Mohajerani, A., Suter, D., Bailey, T. J., Song, T., Arulrajah, A., Horpibulsuk, S., & Law, D. (2019). Recycling waste materials in geopolymer concrete. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 21, 493–515. <https://doi.org/10.1007/s10098-018-01660-2>

- Mohr, D., Wilson, W., & Freund, R. (2021). *Statistical Methods*. <https://doi.org/10.1016/C2019-0-02521-6>
- Mori, S., Charca, S., Flores, E., & Salvastrano, H. (2019). Physical and Thermal Properties of Novel Native Andean Natural Fibers. *Journal of Natural Fibers*, 18(4), 475-491. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/15440478.2019.1629150>
- Mrityunjay Jaiswal, & Bindhu Lal. (2016). Impact of Rice Husk Ash on Soil Stability (Including Micro Level Investigation). *Indian Journal of Science and Technology*, 9(30), 1-7. <https://doi.org/10.17485/ijst/2016/v9i30/99189>
- Newaz Khan, M., Md. Akhter Jamil, & Karim, M. R. (2015). Utilization of Rice Husk Ash for Sustainable Construction: A Review. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 9(12), 1119-1127. <https://doi.org/10.19026/rjaset.9.2606>
- Noushini, A., Hastings, M., Castel, A., & Aslani, F. (2018). Mechanical and flexural performance of synthetic fibre reinforced geopolymer concrete. *Construction and Building Materials*, 186, 454-475. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.110>
- Nuaklong, P., Janprasit, K., & Jongvivatsakul, P. (2021). Enhancement of strengths of high-calcium fly ash geopolymer containing borax with rice husk ash. *Journal of Building Engineering*, 40. <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2021.102762>
- Öztürk, O. (2021). Engineering performance of reinforced lightweight geopolymer concrete beams produced by ambient curing. *Structural Concrete*. <https://doi.org/10.1002/suco.202000664>
- Pan, Z., Sanjayan, J., & Rangan, B. (2015). Fracture properties of geopolymer paste and concrete. *10.1063/1.5003524*, 63(10), 763-771. <https://doi.org/10.1680/macrc.2011.63.10.763>
- Payakaniti, P., Pinitsoonthorn, S., Thongbai, P., Amornkitbamrung, V., & Chindaprasirt, P. (2018). Effects of carbon fiber on mechanical and electrical properties of fly ash geopolymer composite. *Materials Today: Proceedings*, 5, 14017-14025. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.02.054>
- Pham, V., & Tran, V. (2020). Rice Husk Ash Burnt in Simple Conditions for Soil Stabilization. *Geotechnics for Sustainable Infrastructure Development. Lecture Notes in Civil Engineering*, 62, 717-721. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-981-15-2184-3_93
- Rajan, H., & Kathirvel, P. (2021). Sustainable development of geopolymer binder using sodium silicate synthesized from agricultural waste. *Journal of Cleaner Production*, 286, 124959. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124959>
- Ramakrishna, G., & Sundararajan, T. (2019). Long-term strength and durability evaluation of sisal fiber composites. *Durability and Life Prediction in Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites*, 211-255. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102290-0.00010-6>
- Ranganathan, S., Dutta, S., Moses, J., & Anandharamakrishnan, C. (2020). Utilization of food waste streams for the production of biopolymers. *Heliyon*, 6(9), e04891. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04891>
- Redaoui, D., Sahnoune, F., Heraiz, M., & Raghdhi, A. (s.f.). Mechanism and Kinetic Parameters of the Thermal Decomposition of Gibbsite Al(OH)₃ by Thermogravimetric Analysis. *Acta Physica Polonica Series*, 131(3), 562-565. <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.131.562>

- Rissanen, J., Ohenoja, K., Kinnunen, P., Romagnoli, M., & Illikainen, M. (2018). Milling of peat-wood fly ash: Effect on water demand of mortar and rheology of cement paste. *Construction and Building Materials*, 180, 143 - 153. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.014>
- Rithuparna, R., Jittin, V., & Bahurudeen, A. (2021). Influence of different processing methods on the recycling potential of agro-waste ashes for sustainable cement production: A review. *Journal of Cleaner Production*, 316, 128242. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128242>
- Robbie, A. (2019). Global CO₂ emissions from cement production, 1928–2018. *Earth Syst. Sci. Data*, 11(4), 1675–1710. <https://doi.org/10.5194/essd-11-1675-2019>
- Rosyadi, A. (2021). *Prototipe Semen Geopolimer Berbasis Fly Ash Tipe C dengan Pengaruh Substitusi Abu Limbah Sekam Padi*. Institut teknologi Sepuluh Nopember. <https://repository.its.ac.id/83825/>
- Ruiz, S. (2017). *Preparación y caracterización de geopolímeros empleando como materia prima cenizas de cáscara de arroz*. <https://tauja.ujaen.es/handle/10953.1/6516>
- Saloni, Parveen, Lim, Y., Pham, T., Jatin, & Kumar, J. (2021). Sustainable alkali activated concrete with fly ash and waste marble aggregates: Strength and Durability studies. *Construction and Building Materials*, 283, 122795. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122795>
- Shaik Numan, M., Dushyanth VBabu, R., Nabil Hossiney, & Mohd Mustafa, A. (2022). Strength and durability properties of geopolimer paver blocks made with fly ash and brick kiln rice husk ash. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e00800. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00800>
- Shang, M., Zhao, M., Zhang, G., Mann, D., Lumsden, K., & Tao, M. (2016). Durability of red mud-fly ash based geopolimer and leaching behavior of heavy metals in sulfuric acid solutions and deionized water. *Construction and Building Materials*.
- Shehata, N., Sayed, E., & Abdelkareem, M. (2021). Recent progress in environmentally friendly geopolymers: A review. *Science of the Total Environment*, 762, 143166. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143166>
- Sherman, P., Lin, H., & McElroy, M. (2022). Projected global demand for air conditioning associated with extreme heat and implications for electricity grids in poorer countries. *Energy and Buildings*, 268(112198). <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112198>
- Singh, K. (2020). Experimental study on metakolin and baggashe ash based geopolimer concrete. *Materials Today: Proceedings*.
- Singh, N., & Middendorf, B. (2020). Geopolymers as an alternative to Portland cement: An overview. *Construction and Building Materials*, 237, 117455. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117455>
- Siriwan, C. (2017). Effect of Fly Ash on Compressive Strength of Metakaolin Based Geopolymer. *Applied Mechanics and Materials*, 873, 170-175. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.873.170>
- Skariah Thomas, B., Yang, J., Mo, K., Abdalla, J., Hawileh, R., & Ariyachandra, E. (2021). Biomass ashes from agricultural wastes as supplementary cementitious materials or aggregate replacement in cement/geopolimer concrete: A comprehensive review. *Journal of Building Engineering*, 40, 102332. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102332>

- Somna, R., Saowapu, T., Somna, K., & Chindaprasirt, P. (2022). Rice husk ash and fly ash geopolymer hollow block based on NaOH activated. *Case Studies in Construction Materials*, e01092. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01092>
- Sudhakarreddy, K., Angadi, S., Sivakondareddy, B., Chandrasekharreddy, T., & Malagavelli, V. (2018). Flexural behaviour of cement added geopolymer concrete. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 439(9), 142035. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/431/9/092003>
- Teewara, S., & Mitzi, F. (2017). Effect of manufacturing process on the mechanisms and mechanical properties of fly ash-based geopolymer in ambient curing temperature. *Materials and Manufacturing Processes*, 32(5), 461–467. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1080/10426914.2016.1198013>
- Tenazoa, C., Savastano, H., Charca, S., Quintana, M., & Flores, E. (2019). The Effect of Alkali Treatment on Chemical and Physical Properties of Ichu and Cabuya Fibers. *Journal of Natural Fibers*. <https://doi.org/10.1080/15440478.2019.1675211>
- Toniolo, N., & Boccaccini, A. R. (2017). Fly ash-based geopolymers containing added silicate waste. A review. *Ceramics International*, 43. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.07.221>
- Topçu, İ., & Sofuoğlu, T. (s.f.). Properties of geopolymers produced with sugar press filter waste and fly ash under certain curing conditions. *Journal of Building Engineering*, 44, 102938. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102938>
- Torres, M., & Puertas, F. (2017). La activación alcalina de diferentes aluminosilicatos como una alternativa al Cemento Portland: cementos activados alcalinamente o geopolímeros. *Revista ingeniería de construcción*, 32(2). <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732017000200001>
- Torres-Carrasco, M., & Puertas, F. (2017). Alkaline activation of different aluminosilicates as an alternative to Portland cement: alkali activated cements or geopolymers. *Revista Ingeniería de Construcción*.
- Tun, T., Bonnet, S., & Gheewala, S. (2021). Emission reduction pathways for a sustainable cement industry in Myanmar. *Sustainable Production and Consumption*, 27, 449-461. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.01.016>
- Villaquirán Caicedo, M. A., Rodríguez, E. D., & Mejía De Gutiérrez, R. (2015). Microstructure Assessment of Metakaolin Based-Geopolymers Produced with Alternative Silica Sources Exposed to High Temperatures. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 16(1), 113-122.
- Villaquirán-Caicedo, M., & Mejía-de Gutiérrez, R. (2015). Synthesis of ternary geopolymers based on metakaolin, boiler slag and rice husk ash. *DYNA*.
- Weather Spark. (2022). <https://es.weatherspark.com/s/19294/2/Tiempo-promedio-en-el-oto%C3%B1o-en-Chiclayo-Per%C3%BA#Figures-SolarEnergy>.
- Yao, X., Zhang, Z., Zhu, H., & Chen, Y. (2009). Geopolymerization process of alkali–metakaolinite characterized by isothermal calorimetry. *Thermochimica Acta*, 493, 49–54. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2009.04.002>
- Yavuz, E., & Kul Gul, N. (2022). Characterization of class C and F fly ashes based geopolymers incorporating silica fume. *Ceramics International*, 48(21), 32213 - 32225. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.07.163>

- Zeynab , E., Nilofar , A., Mohamad , H., Mohd , A., Ali , M., Mojtaba, A., & Kamaruzzaman , S. (2017). Development of Green Geopolymer Using Agricultural and Industrial Waste Materials with High Water Absorbency. *Applied Sciences (Switzerland)*, 7(5), 514. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/app7050514>
- Zhang, M., Zhao, M., Zhang, G., El-Korchi, T., & Tao, M. (2017). A multiscale investigation of reaction kinetics, phase formation, and mechanical properties of metakaolin geopolymers. *Cement and Concrete Composites*, 78, 21-32. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.12.010>

ANEXOS

Anexo 01. Ensayos de granulometría, peso unitario suelto y compactado, contenido de humedad, peso específico y absorción de los agregados fino y grueso.

Tabla a1

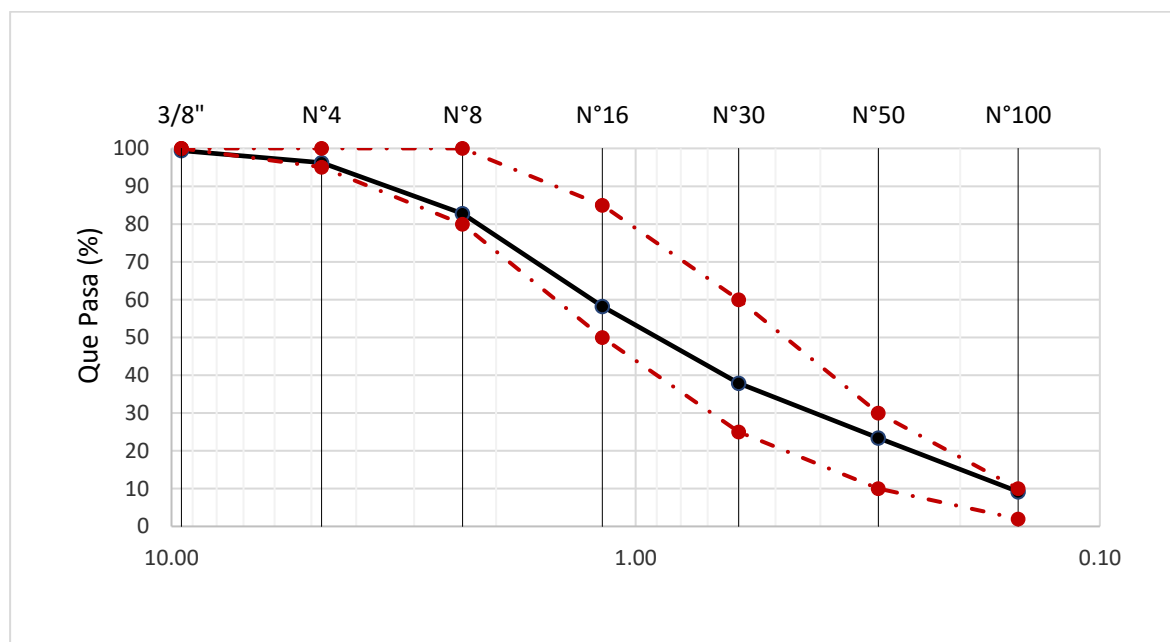
Granulometría del agregado fino

Malla Pulg.	Malla (mm.)	% Retenido	% Retenido Acumulado	% Que Pasa Acumulado	GRADACIÓN "C"
3/8"	9.520	0.6	0.6	99.4	100
Nº 4	4.750	1.5	3.8	96.2	95 - 100
Nº 8	2.360	13.5	17.3	82.7	80 - 100
Nº 16	1.180	24.5	41.8	58.2	50 - 85
Nº 30	0.600	20.3	62.1	37.9	25 - 60
Nº 50	0.300	14.5	76.6	23.4	10 - 30
Nº 100	0.150	14.2	90.8	9.2	2 - 10
MÓDULO DE FINEZA					2.93

Nota. Fuente: Elaboración propia

Figura a1

Curva granulométrica del agregado fino.



Nota. Fuente: Elaboración propia

Tabla a2

Peso unitario suelto del agregado fino

Datos del ensayo	M1	M2	M3
01.- Peso de la muestra suelta + recipiente (g.)	31.16	31.06	30.80
02.- Peso del recipiente (g.)	8.26	8.26	8.26
03.- Peso de muestra (g.)	22.91	22.81	22.55
04.- Constante ó Volumen (cm ³)	0.01	0.01	0.01
05.- Peso unitario suelto húmedo (g/cm ³)	1.66	1.66	1.64
06.- Peso unitario suelto humedo (Promedio) (g/cm ³)		1.65	
07.- Peso unitario suelto seco (Promedio) (g/cm ³)		1.62	

Nota. Fuente: Elaboración propia

Tabla a3

Peso unitario compactado del agregado fino

Datos del ensayo	M1	M2	M3
01.- Peso de la muestra suelta + recipiente (g.)	33.00	33.00	33.00
02.- Peso del recipiente (g.)	8.26	8.26	8.255
03.- Peso de muestra (g.)	24.77	24.77	24.61
04.- Constante ó Volumen (cm ³)	0.014	0.014	0.014
05.- Peso unitario suelto húmedo (g/cm ³)	1.799	1.800	1.788
06.- Peso unitario compactado humedo (Promedio) (g/cm ³)		1.796	
07.- Peso unitario seco compactado (Promedio) (g/cm ³)		1.760	

Nota. Fuente: Elaboración propia

Tabla a4

Contenido de humedad del agregado fino

Datos del ensayo	Resultados
01.- Peso de muestra húmeda (g.)	3040.00
02.- Peso de muestra seca (g.)	2985.00
03.- Peso de recipiente (g.)	235.00
04.- Contenido de humedad (g.)	2.00

Nota. Fuente: Elaboración propia

Tabla a5*Peso específico y absorción del agregado fino*

Datos del ensayo	Resultados
1.- Peso de la arena superficialmente seca + peso del frasco + peso del agua (g.)	1005.0
2.- Peso de la arena superficialmente seca + peso del frasco (g.)	685.8
3.- Peso del agua (g.)	319.2
4.- Peso de la arena secada al horno + peso del frasco (g.)	682.8
5.- Peso del frasco (g.)	185.8
6.- Peso de la arena secada al horno (g.)	497.0
7.- Volumen del frasco (cm ³)	500.0
8.- Peso específico de masa (g/cm ³)	2.75
9.- Peso específico de masa saturado superficialmente seco (g/cm ³)	2.77
10.- Peso específico aparente (g/cm ³)	1.16
11.- porcentaje de absorción (%)	0.60

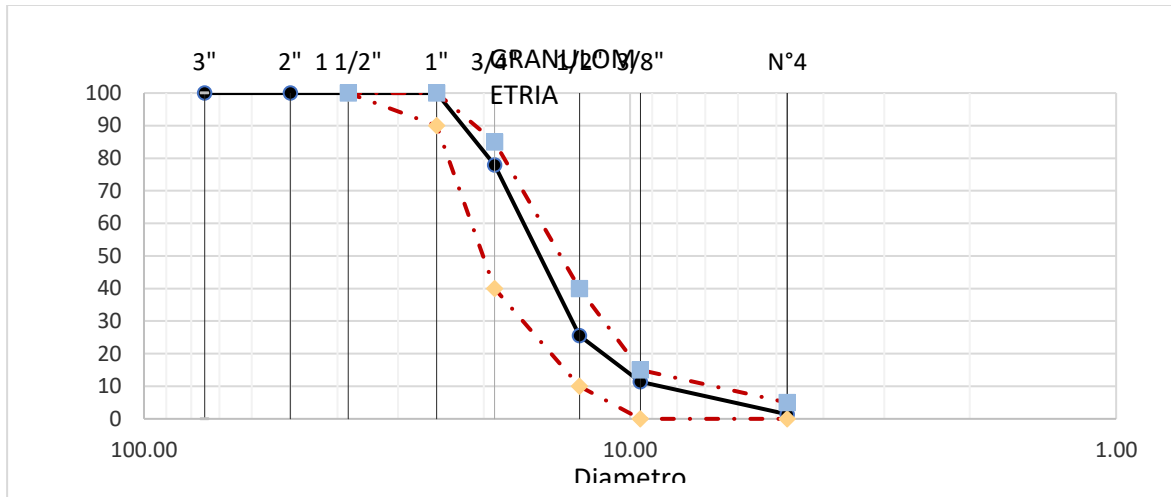
Nota. Fuente: Elaboración propia

Tabla a6*Granulometría del agregado grueso*

Análisis Granulométrico por tamizado						HUSO		
N° Tamiz	Abertura (mm)	% Retenido	% Acumulado Retenido	% Que pasa Acumulado				
2"	50.00	0.0	0.0	100.0	56			
1 1/2"	38.00	0.0	0.0	100.0	100			
1"	25.00	0.0	0.0	100.0	90	-	100	
3/4"	19.00	22.1	22.1	77.9	40	-	85	
1/2"	12.70	52.4	74.5	25.5	10	-	40	
3/8"	9.52	14.1	88.6	11.4	0	-	15	
Nº4	4.75	10.0	98.6	1.4	0	-	5	
TAMAÑO MÁXIMO NOMINAL						3/4"		

Nota. Fuente: Elaboración propia

Figura a2*Curva granulométrica del agregado grueso.*



Nota. Fuente: Elaboración propia

Tabla a7

Peso unitario suelto del agregado grueso

Datos del ensayo	M1	M2	M2
01.- Peso de la muestra suelta + recipiente (g.)	29.95	29.92	30.28
02.- Peso del recipiente (g.)	8.36	8.36	8.36
03.- Peso de muestra (g.)	21.59	21.57	21.93
04.- Constante ó Volumen (cm ³)	0.01	0.01	0.01
05.- Peso unitario suelto húmedo (g/cm ³)	1.57	1.57	1.59
06.- Peso unitario suelto humedo (Promedio) (g/cm ³)		1.58	
07.- Peso unitario suelto seco (Promedio) (g/cm ³)		1.57	

Nota. Fuente: Elaboración propia

Tabla a8

Peso unitario compactado del agregado grueso

Datos del ensayo	M1	M2	M3
01.- Peso de la muestra suelta + recipiente (g.)	31	31	31.190
02.- Peso del recipiente /g.)	8.355	8.355	8.355
03.- Peso de muestra (g.)	22.785	22.755	22.835
04.- Constante ó Volumen (cm ³)	0.014	0.014	0.014
05.- Peso unitario suelto húmedo (g/cm ³)	1.655	1.653	1.659
06.- Peso unitario compactado humedo (Promedio) (g/cm ³)		1.656	
07.- Peso unitario seco compactado (Promedio) (g/cm ³)		1.650	

Nota. Fuente: Elaboración propia

Tabla a9*Contenido de humedad del agregado grueso*

Datos del ensayo	Resultados
01.- Peso de muestra húmeda (g.)	4515.00
02.- Peso de muestra seca (g.)	4500.00
03.- Peso de recipiente (g.)	390.00
04.- Contenido de humedad (%)	0.36

Nota. Fuente: Elaboración propia

Tabla a10*Peso específico y absorción del agregado grueso*

Datos del ensayo	Resultados
1.- Masa de la muestra secada al horno (g.)	2634
2.- Masa de la muestra saturada superficialmente seca (g.)	2645
3.- Masa de la muestra saturada dentro del agua + peso de la canastilla (g.)	2705
4.- Masa de la canastilla (g.)	1025
5.- Masa de la muestra saturada dentro del agua (g.)	1680
6.- Peso específico de masa (g/cm ³)	2.730
7.- Peso específico de masa saturado superficialmente seco (g/cm ³)	2.741
8.- Peso específico aparente (g/cm ³)	2.761
9.- Porcentaje de absorción (%)	0.4

Nota. Fuente: Elaboración propia

Tabla a11*Proporciones de materias primas en la mezcla de geopolímeros con diferentes proporciones de yeso, NaOH y Na₂SiO₃*

Molaridad del hidróxido de sodio + % yeso	NaOH (slido) (kg/m ³)	Agua (kg/m ³)	Silicato de sodio (líquido) (kg/m ³)	Yeso (kg/m ³)	CCA (kg/m ³)	Agregado fino (kg/m ³)	Agregado grueso (kg/m ³)
8M + 0% gypsum	86.2	269.5	129.3	----	539.0	665.6	358.4
8 M + 10% gypsum	86.2	269.5	129.3	53.9	485.1	665.6	358.4
8 M + 20% gypsum	86.2	269.5	129.3	107.8	431.2	665.6	358.4
8 M + 30% gypsum	86.2	269.5	129.3	161.7	377.3	665.6	358.4
8 M + 40% gypsum	86.2	269.5	129.3	215.6	323.4	665.6	358.4
8 M + 50% gypsum	86.2	269.5	129.3	269.5	269.5	665.6	358.4
10 M + 0% gypsum	92.2	230.4	138.3	----	576.1	674.05	362.95
10 M + 10% gypsum	92.2	230.4	138.3	57.6	518.5	674.05	362.95
10 M + 20% gypsum	92.2	230.4	138.3	115.2	460.9	674.05	362.95
10 M + 30% gypsum	92.2	230.4	138.3	172.8	403.3	674.05	362.95

10 M + 40% gypsum	92.2	230.4	138.3	230.4	345.7	674.05	362.95
10 M + 50% gypsum	92.2	230.4	138.3	288.1	288.1	674.05	362.95
12 M + 0% gypsum	93.7	195.2	140.5		585.6	659.75	355.25
12 M + 10% gypsum	93.7	195.2	140.5	58.6	527.0	659.75	355.25
12 M + 20% gypsum	93.7	195.2	140.5	117.1	468.5	659.75	355.25
12 M + 30% gypsum	93.7	195.2	140.5	175.7	409.9	659.75	355.25
12 M + 40% gypsum	93.7	195.2	140.5	234.2	351.3	659.75	355.25
12 M + 50% gypsum	93.7	195.2	140.5	292.8	292.8	659.75	355.25
14 M + 0% gypsum	89.7	160.2	134.5		560.6	614.25	330.75
14 M + 10% gypsum	89.7	160.2	134.5	56.1	504.5	614.25	330.75
14 M + 20% gypsum	89.7	160.2	134.5	112.1	448.5	614.25	330.75
14 M + 30% gypsum	89.7	160.2	134.5	168.2	392.4	614.25	330.75
14 M + 40% gypsum	89.7	160.2	134.5	224.2	336.4	614.25	330.75
14 M + 50% gypsum	89.7	160.2	134.5	280.3	280.3	614.25	330.75

Tabla a12

Proporciones de materias primas en la mezcla de geopolímeros con el contenido óptimo de yeso, NaOH y Na₂SiO₃ y diferentes proporciones de fibra de ichu

Molaridad óptima de hidróxido de sodio + % óptimo de yeso + % de fibra de ichu	NaOH (kg/m ³)	Agua (kg/m ³)	Silicato de sodio (kg/m ³)	Yeso (kg/m ³)	CCA (kg/m ³)	Agregado fino (kg/m ³)	Agregado grueso Stone (kg/m ³)	Fibra de ichu (kg/m ³)
12 M + 20% yeso + 0,5% fibrde ichua	93.7	195.2	140.5	117.1	468.5	659.75	355.25	10.15
12 M + 20% yeso + 1,0% fibra natural de ichu	93.7	195.2	140.5	117.1	468.5	659.75	355.25	20.3
12 M + 20% yeso + 1,5% fibrade ichu	93.7	195.2	140.5	117.1	468.5	659.75	355.25	30.45
12 M + 20% yeso + 2,0% fibra de ichu	93.7	195.2	140.5	117.1	468.5	659.75	355.25	40.6

Anexo 02. Panel Fotográfico

Figura a3

Calcinación de la cáscara de arroz, determinación de la óptima temperatura de quemado.



Nota. Fuente: Elaboración propia

Figura a4

Molienda y tamizado de la ceniza de cáscara de arroz.



Nota. Fuente: Elaboración propia

Figura a5

Mezcla del geopolimero



Nota. Fuente: Elaboración propia

Figura a6

Fabricación del geopolimero en un cubo de 5 cm de lado



Nota. Fuente: Elaboración propia

Figura a7

Fabricación del geopolimero con especímenes normalizados



Nota. Fuente: Elaboración propia

Figura a8

Ensayos de resistencia mecánica de los geopolimeros



Nota. Fuente: Elaboración propia

Tesis Doctoral: INFLUENCIA DE LA CCA CON YESO Y FIBRAS DE ICHU EN LA ELABORACIÓN DE GEOPOLÍMEROS

por Socrates Pedro Muñoz Perez

Fecha de entrega: 18-jun-2023 02:16p.m. (UTC-0500)

Identificador de la entrega: 2118367553

Nombre del archivo: UNIVERSIDAD_NACIONAL_DEL_SANTA_tesis_doctorado.docx (17.72M)

Total de palabras: 29423

Total de caracteres: 141512

Tesis Doctoral: INFLUENCIA DE LA CCA CON YESO Y FIBRAS DE ICHU EN LA ELABORACIÓN DE GEOPOLÍMEROS

INFORME DE ORIGINALIDAD

13%

INDICE DE SIMILITUD

12%

FUENTES DE INTERNET

6%

PUBLICACIONES

3%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	hdl.handle.net Fuente de Internet	2%
2	Submitted to Universidad Nacional del Centro del Peru Trabajo del estudiante	1%
3	repositorio.uss.edu.pe Fuente de Internet	1%
4	es.scribd.com Fuente de Internet	1%
5	repositorio.uns.edu.pe Fuente de Internet	<1%
6	riunet.upv.es Fuente de Internet	<1%
7	repositorio.ucv.edu.pe Fuente de Internet	<1%
8	Submitted to Universidad Cesar Vallejo Trabajo del estudiante	<1%

9	pt.scribd.com Fuente de Internet	<1 %
10	docplayer.es Fuente de Internet	<1 %
11	www.researchgate.net Fuente de Internet	<1 %
12	kupdf.net Fuente de Internet	<1 %
13	repositorio.unsa.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
14	Submitted to Universidad Santo Tomas Trabajo del estudiante	<1 %
15	patents.google.com Fuente de Internet	<1 %
16	repositorio.ulatina.ac.cr Fuente de Internet	<1 %
17	www.scielo.org.mx Fuente de Internet	<1 %
18	redpav-fpolar.info.ve Fuente de Internet	<1 %
19	noesis.uis.edu.co Fuente de Internet	<1 %
20	repositorio.bicu.edu.ni Fuente de Internet	<1 %

21

repositorio.utea.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

22

Nicolás Pardo, Guillermo Penagos, Mauricio Correa, Esperanza López. "Desarrollo de morteros de bajo impacto ambiental a partir de residuos sílico-aluminosos activados alcalinamente del sector minero", Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, 2021

Publicación

<1 %

23

edoc.pub

Fuente de Internet

<1 %

24

navarrof.orgfree.com

Fuente de Internet

<1 %

25

www.atlantis-press.com

Fuente de Internet

<1 %

26

issuu.com

Fuente de Internet

<1 %

27

repositorio.uc.cl

Fuente de Internet

<1 %

28

1library.co

Fuente de Internet

<1 %

29

Submitted to Universidad Católica de Santa María

Trabajo del estudiante

<1 %

30	tesis.ucsm.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
31	Submitted to Universidad Nacional del Santa Trabajo del estudiante	<1 %
32	tesis.unjbg.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
33	Submitted to Universidad Continental Trabajo del estudiante	<1 %
34	dokumen.pub Fuente de Internet	<1 %
35	idoc.pub Fuente de Internet	<1 %
36	e-journal.uajy.ac.id Fuente de Internet	<1 %
37	pdfcookie.com Fuente de Internet	<1 %
38	repositorio.unal.edu.co Fuente de Internet	<1 %
39	es.slideshare.net Fuente de Internet	<1 %
40	revistas.sqperu.org.pe Fuente de Internet	<1 %
41	123dok.com Fuente de Internet	<1 %

42	renati.sunedu.gob.pe Fuente de Internet	<1 %
43	repositorio.uap.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
44	documents.tips Fuente de Internet	<1 %
45	link.springer.com Fuente de Internet	<1 %
46	B. Silva Hermo, B. Prieto Lamas, T. Rivas Brea, L. Pereira Pardo. "Origen y efectos deteriorantes del yeso en monumentos graníticos del noroeste de España", <i>Materiales de Construcción</i> , 2010 Publicación	<1 %
47	Palacios Santillán Armando. "Elaboración de pet-concreto, buscando mejorar sus propiedades mecánicas de tensión y flexión", <i>TESIUNAM</i> , 2014 Publicación	<1 %
48	repositorio.ulvr.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
49	scielo.conicyt.cl Fuente de Internet	<1 %
50	epdf.pub Fuente de Internet	<1 %

51	purl.org Fuente de Internet	<1 %
52	qdoc.tips Fuente de Internet	<1 %
53	www.aaps.gob.bo Fuente de Internet	<1 %
54	archive.org Fuente de Internet	<1 %
55	repositorio.upeu.edu.pe:8080 Fuente de Internet	<1 %
56	www.maryscottnp.org Fuente de Internet	<1 %
57	Vargas López Sofía Beatriz. "Modificación de las propiedades mecánicas del mortero", TESIUNAM, 2017 Publicación	<1 %
58	cybertesis.unmsm.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
59	documentop.com Fuente de Internet	<1 %
60	repository.its.ac.id Fuente de Internet	<1 %
61	docplayer.info Fuente de Internet	<1 %

62	repositorio.ug.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
63	ri.uaq.mx Fuente de Internet	<1 %
64	www.mdpi.com Fuente de Internet	<1 %
65	Submitted to Florida State University Trabajo del estudiante	<1 %
66	Gonzalez Celis Rangel Andrea Julieta. "Centro de readaptacion social para menores infractores : Diseno de un centro de readaptacion social para menores infractores, mediante la interaccion interdisciplinaria que coadyuve a la sociabilizacion del menor", TESIUNAM, 1983 Publicación	<1 %
67	gc.scalahed.com Fuente de Internet	<1 %
68	repositorio.usil.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
69	repositoriotec.tec.ac.cr Fuente de Internet	<1 %
70	www.coursehero.com Fuente de Internet	<1 %
71	www.iccat.int	

<1 %

72

J. Puig Montraveta, D. Masó Gamell, J. A. Ortiz Lozano, A. C. P. Dos Santos, A. Aguado de Cea. "Estudio experimental sobre la influencia de la temperatura ambiental en la resistencia del hormigón preparado. Parte 2: implementación industrial", Materiales de Construcción, 2010

Publicación

<1 %

73

Pedro Palacios, Cintia Rodríguez, Cecilia Méndez-Sánchez, Alicia-Edith Hermosillo-De-La-Torre et al. "The development of the first symbolic uses in Mexican children from the pragmatics of object / Desarrollo de los primeros usos simbólicos en niños mexicanos desde la pragmática del objeto", Estudios de Psicología, 2016

Publicación

<1 %

74

periodicos.ufpb.br

Fuente de Internet

<1 %

75

polodelconocimiento.com

Fuente de Internet

<1 %

76

repositorio.udh.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

77

repositorio.ufpb.br

Fuente de Internet

<1 %

78

Irene Ramón-Álvarez, Carolina Marugán-Cruz, Esther Enríquez, Sergio Sánchez-Delgado, Manuel Torres-Carrasco. "Alkali-activated and hybrid materials: Alternative to Portland cement as a storage media for solar thermal energy", Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, 2021

Publicación

<1 %

79

Julián Dávalos, Ashley Bonilla, Mónica A. Villaquirán-Caicedo, Ruby M. de Gutiérrez, Jesús Ma. Rincón. "Preparation of glass-ceramic materials from coal ash and rice husk ash: Microstructural, physical and mechanical properties", Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, 2020

Publicación

<1 %

80

M. L. Martínez, D. Eliche, N. Cruz, F. A. Corpas. "Utilización de bagazo de la industria cervecera para la producción de ladrillos para construcción", Materiales de Construcción, 2012

Publicación

<1 %

81

Submitted to Universidad Andina del Cusco

Trabajo del estudiante

<1 %

82

apps.dtic.mil

Fuente de Internet

<1 %

83

moam.info

Fuente de Internet

<1 %

84

prezi.com

Fuente de Internet

<1 %

85

www.abaxis.com

Fuente de Internet

<1 %

86

www.cacic2016.unsl.edu.ar

Fuente de Internet

<1 %

87

www.degruyter.com

Fuente de Internet

<1 %

88

Julián Salas, Percy Castillo, M. Isabel Sánchez de Rojas, Janer Veras. "Empleo de cenizas de cáscara de arroz como adiciones en morteros", *Materiales de Construcción*, 2012

Publicación

<1 %

89

S. A. Bernal, R. Mejía de Gutiérrez, F. Ruiz, H. Quiñones, J. L. Provis. "Desempeño a temperaturas altas de morteros y hormigones basados en mezclas de escoria/metacaolín activadas alcalinamente", *Materiales de Construcción*, 2012

Publicación

<1 %

90

Taja Chayeb Lucia Guadalupe. "Análisis mutacional de los genes EGFR y PDGFR en cáncer de pulmón y cervico-uterino", *TESIUNAM*, 2006

Publicación

<1 %

91	core.ac.uk Fuente de Internet	<1 %
92	dspace.udla.edu.ec Fuente de Internet	<1 %
93	eprints.ucm.es Fuente de Internet	<1 %
94	linguatoools.de Fuente de Internet	<1 %
95	phavi.umcs.pl Fuente de Internet	<1 %
96	ruidera.uclm.es Fuente de Internet	<1 %
97	thectengineeringgroup.com Fuente de Internet	<1 %
98	www.itc.mx Fuente de Internet	<1 %
99	www.scribd.com Fuente de Internet	<1 %
100	www.slideshare.net Fuente de Internet	<1 %
101	zaguan.unizar.es Fuente de Internet	<1 %
102	Elena Díez Sánchez. "Aprovechamiento de subproductos de zumos de frutos rojos para	<1 %

el diseño de alimentos", Universitat
Politecnica de Valencia, 2021

Publicación

103

Elijah Adesanya, Katja Ohenoja, Andrea Di
Maria, Paivo Kinnunen, Mirja Illikainen.
"Alternative alkali-activator from steel-making
waste for one-part alkali-activated slag",
Journal of Cleaner Production, 2020

Publicación

104

GEOSERVICE INGENIERIA S.A.C.. "EIA del
Proyecto Planta de Fabricación de Cementos
Piura-IGA0006998", R.D. N° 008-2013-
PRODUCE/DVMYPE-I/DIGGAM, 2021

Publicación

105

S Subekti, R Bayuaji, M S Darmawan, N A
Husin, B Wibowo, B Anugraha, S Irawan, D
Dibiantara. "Review: Potential Strength of Fly
Ash-Based Geopolymer Paste with
Substitution of Local Waste Materials with
High-Temperature Effect", IOP Conference
Series: Materials Science and Engineering,
2017

Publicación

106

Uriegas Uriegas José Luis. "Análisis del
comportamiento económico de plantas de la
industria química", TESIUNAM, 1979

Publicación

107

biblioteca.universia.net

<1 %

<1 %

<1 %

<1 %

Fuente de Internet

<1 %

108 cdigital.dgb.uanl.mx
Fuente de Internet

<1 %

109 de.slideshare.net
Fuente de Internet

<1 %

110 dspace.ucuenca.edu.ec
Fuente de Internet

<1 %

111 repositorio.uladech.edu.pe
Fuente de Internet

<1 %

112 repositorio.umsa.bo
Fuente de Internet

<1 %

113 repositorio.unh.edu.pe
Fuente de Internet

<1 %

114 repositorio.unia.edu.pe
Fuente de Internet

<1 %

115 repositorio.upagu.edu.pe
Fuente de Internet

<1 %

116 repositorio.urp.edu.pe
Fuente de Internet

<1 %

117 revistas.utp.edu.co
Fuente de Internet

<1 %

118 teses.usp.br
Fuente de Internet

<1 %

119

vsip.info

Fuente de Internet

<1 %

120

www.cinterfor.org.uy

Fuente de Internet

<1 %

121

Ariel Rey Villca Pozo. "Utilización de geopolímero para la mejora de las propiedades en morteros cal-puzolana y su empleo en países en desarrollo.", Universitat Politecnica de Valencia, 2021

Publicación

<1 %

122

Flores Martinez Lydia Josefina. "Mineralización primaria de la hojarasca y sus efectos sobre la erodabilidad del suelo", TESIUNAM, 2001

Publicación

<1 %

123

Juan Manuel Carricondo Antón. "Utilización de residuos vegetales para la eliminación de fósforo en aguas residuales mediante procesos de adsorción", Universitat Politecnica de Valencia, 2020

Publicación

<1 %

Excluir citas

Apagado

Excluir coincidencias

Apagado

Excluir bibliografía

Apagado