

Aprovechamiento de la ceniza de cascarilla de arroz proveniente de la empresa arrocera “Agroindustria San Luis” como materia precursora para la síntesis de geopolímeros.

Proyecto de graduación para optar al título de Ingeniero Químico

Elaborado por:

Tutor:

Br. Ashley Leonela
Hernández Torrez.
Carnet: 2019-0902U

Br. Miryam Ahtziri Ortiz
Serrano.
Carnet: 2018-1137U

Br. Joel Alexander
Chamorro Martínez
Carnet: 2017-0055U

MSc. Marlon Antonio
Hurtado Obando

Dedicatoria

A Dios, por brindarnos la salud y la fortaleza espiritual para culminar esta etapa, siendo nuestro guía silencioso en cada paso del camino.

A nuestros padres, quienes con su amor, sacrificio y fe inquebrantable nos dieron las alas para volar y el apoyo para nunca rendirnos. Gracias por enseñarnos que el conocimiento es la única herencia que nadie puede quitarnos. Cada página de este trabajo lleva el sello de su amor y apoyo incondicional.

A nosotros mismos, por la disciplina, las noches de desvelo y por no abandonar el camino cuando las metas parecían lejanas. A la resiliencia que nos permitió transformar cada reto en una lección.

Y a todas aquellas personas que, con una palabra de aliento o un gesto de cariño, transformaron momentos de cansancio en una nueva oportunidad para seguir adelante. Este logro es tan nuestro como de ustedes.

Agradecimientos

Hago extensivo nuestro más sincero reconocimiento a la Universidad Nacional de Ingeniería, cuya excelencia académica ha sido el marco fundamental para nuestro desarrollo profesional. Agradecemos profundamente al tutor MSc. Marlon Hurtado por su acompañamiento estratégico y por transmitirnos la disciplina metodológica y la probidad intelectual imprescindibles para el desarrollo de este trabajo.

Asimismo, manifiesto mi gratitud a los docentes y colegas que, con sus perspectivas y debates, enriquecieron el análisis de este trabajo. En el ámbito personal, agradezco a Dios y a nuestras familias por representar el soporte emocional constante y la fuente de motivación que permitió transformar los desafíos de este proceso en peldaños hacia la superación. A todos aquellos que, de manera directa o indirecta, hicieron posible la culminación exitosa de este proyecto, mi más profunda estima y gratitud.

Resumen ejecutivo

Este proyecto desarrolla el diseño conceptual del proceso para la producción de materiales geopoliméricos a partir de ceniza de cascarilla de arroz (CCA), como alternativa sostenible al cemento Portland en el contexto agroindustrial de Sébaco, Nicaragua.

La investigación se realizó bajo un enfoque documental con alcance aplicado, abordando el análisis de las propiedades de la CCA, la descripción del proceso de geopolimerización y el diseño del sistema productivo.

Se determinó que la CCA es un precursor adecuado debido a su alto contenido de sílice y reactividad en medios alcalinos. El proceso propuesto incluye las operaciones de molienda, tamizado, mezcla, moldeo y curado térmico. El balance de materia establece una composición de 75 % CCA, 20 % activador alcalino y 5 % agua.

El análisis energético indica consumos moderados, concentrados en molienda y curado. Los resultados evidencian la viabilidad técnica del proceso; sin embargo, su carácter documental y la ausencia de validación experimental constituyen limitaciones. Se recomienda su validación y optimización para su aplicación industrial.

Abstract

This project presents the conceptual design of a process for the production of geopolymeric materials from rice husk ash (RHA) as a sustainable alternative of industrial context for Portland cement in Sébaco, Nicaragua.

The study was conducted under a documentary approach with an applied scope, focusing on the analysis of RHA properties, the geopolymerization process, and the design of the production system.

RHA was identified as a suitable precursor due to its high silica content and reactivity in alkaline environments. The proposed process includes grinding, sieving, mixing, molding, and thermal curing. The material balance indicates a composition of 75% RHA, 20% alkaline activator, and 5% water.

Energy analysis shows moderate consumption, mainly in grinding and curing stages. The results demonstrate technical feasibility; however, the lack of experimental validation remains a limitation. Further validation and optimization are recommended for industrial application.



REF.DACA.FCE.009.2026
Managua, 12 de enero del 2026

Bachilleres

MIRYAM AHTZIRI ORTIZ SERRANO / 2018-1137U
ASHLEY LEONELA HERNÁNDEZ TORREZ / 2019-0902U
JOEL ALEXANDER CHAMORRO MARTÍNEZ / 2017-0055U

Estimados Bachilleres:

Es de mi agrado informarle que el Tema y Objetivos de su Proyecto de Graduación, ha sido aprobado por la Dirección del Área de Conocimiento de Agricultura, según se describe a continuación:

TEMA:

**"APROVECHAMIENTO DE LA CENIZA DE CASCARILLA DE ARROZ
PROVENIENTE DE LA EMPRESA ARROCERA "AGROINDUSTRIA SAN LUIS"
COMO MATERIA PRECURSORA PARA LA SÍNTESIS DE GEOPOLÍMEROS".**

OBJETIVOS:

General:

Diseñar un proceso de elaboración de un geo polímero utilizando como materia precursora la ceniza de cascarilla de arroz proveniente de la empresa arrocera "Agroindustria San Luis".

Específicos:

1. Analizar las propiedades fisicoquímicas de la ceniza de cascarilla de arroz como material precursor en la síntesis del geopolímero.
2. Proponer las materias primas, equipos, parámetros de operación y las operaciones unitarias necesarias para la elaboración de un geopolímero a base de cascarilla de arroz.
3. Comparar la resistencia mecánica del geopolímero contra un mortero portland bajo condiciones estandarizadas de ensayo.

Asimismo, le comunico estar totalmente de acuerdo, que el **MSc. Marlon Antonio Hurtado Obando** sea el tutor de su trabajo final.

[Firma]
Recibido



Universidad Nacional de Ingeniería
Área de Conocimiento de Agricultura
Formas de Culminación de Estudios

La fecha límite, para que presente concluido su documento final, debidamente revisado por el tutor guía será el **28 de febrero del 2026**.

Esperando puntualidad en la entrega del Proyecto de Graduación, me despido.

Atentamente,

MSc. José Mamerto Méndez Ubeda
Director de Área de Conocimiento de Agricultura
DACA

MSc. Marlon Antonio Hurtado Obando / Tutor
MSc. Helia Vanessa Taleno Oporta / Secretaria Académica DACA
C/c: Archivo

Valoración del Tutor

Yo, M.Sc. Marlon Antonio Hurtado Obando, Tutor del proyecto “**Diseño de un proceso de elaboración de geopolímero utilizando ceniza de cascarilla de arroz como precursor**”, certifico lo siguiente:

El trabajo presenta un excelente nivel técnico y gran pertinencia nacional. Destaca por su sólida fundamentación teórica en geopolimerización, activación alcalina y valorización de residuos agroindustriales. El análisis de propiedades de la CCA, la propuesta de parámetros operativos y el modelo conceptual de proceso están bien desarrollados y alineados con los objetivos de sostenibilidad y economía circular.

Se observa buena estructura, uso adecuado de literatura y claridad en la exposición de operaciones unitarias.

Por tanto, Considero de la manera más respetuosa que el trabajo es **aprovable** y que con las mejoras sugeridas por el respetable jurado calificador, alcanzará el nivel requerido para un proyecto de graduación en Ingeniería Química.

Dado en la ciudad de Managua a los 14 días del mes de abril del año 2026.



M.Sc. Marlon Antonio Hurtado Obando

Master en Matemática Aplicada

Tutor

ÍNDICE DE CONTENIDO

I.	INTRODUCCIÓN.....	12
II.	ANTECEDENTES Y MARCO LEGAL	14
III.	OBJETIVOS	17
	Objetivo General	17
	Objetivos Específicos	17
IV.	DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO	18
V.	FUNDAMENTOS TÉCNICOS.....	20
	5.1. Geopolímeros	20
	5.2. Compuesto puzolánico	21
	5.2.1. Propiedades del compuesto puzolánico	21
	5.3. Ceniza de cascarilla de arroz	22
	5.4. Activación alcalina de la CCA	22
	5.5. Influencia de la CCA en las propiedades del geopolímero.	23
	5.6. Ventajas técnicas y ambientales del uso de CCA en geopolímeros	23
VI.	METODOLOGIA PARA EL DESARROLLO DEL PROYECTO DE GRADUACIÓN 25	
	6.1 Enfoque y tipo de investigación.....	25
	6.2. Análisis de las propiedades fisicoquímicas de la CCA	25
	6.3. Definición de materias primas y equipos necesarios para la elaboración del geopolímero	26
	6.4. Comparación de la resistencia mecánica del geopolímero frente a un mortero Portland	27
VII.	RESULTADOS	28
	7.1. Análisis de las propiedades fisicoquímicas de la CCA	28
	7.2. Definición de materias primas, equipos necesarios y parámetros de operación para la elaboración de un geopolímero	29
	7.2.1. Materias primas	30
	7.2.2. Equipos	31
	7.2.3. Operaciones unitarias necesarias para la elaboración del geopolímero a base de CCA	47

7.3. Comparación de la resistencia mecánica del geopolímero contra un mortero Portland	50
VIII. CONCLUSIONES.....	54
IX. RECOMENDACIONES	56
X. REFERENCIAS	58
XI. ANEXOS	61
11.1. Tablas	61
11.2. Imágenes.....	65

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1:Análisis comparativo de propiedades de resistencia en morteros.	50
Tabla 2: Comparación entre estructura química de geopolímeros y morteros de cemento Portland.....	51
Tabla 3: Composición química de la ceniza de cascarilla de arroz	61
Tabla 4:Tiempos de mezclado según tipo de sistema	61
Tabla 5: Factor de llenado de mezcladores según tipo de sistema	61
Tabla 6: Potencia especifica de mezclado según tipo de sistema	62
Tabla 7: Parametros operativos de moldeo de geopolímeros	62
Tabla 8: Parametros de curado de geopolímeros.....	62
Tabla 9: Ficha tecnica de molino de bolas.....	63
Tabla 10: Ficha tecnica de tamiz vibratorio de alta frecuencia.....	63
Tabla 11: Ficha tecnica mezclaodr para solución activadora	63
Tabla 12: Ficha tecnica mezclaodr para sistema geopoliméricos	64
Tabla 13: Ficha tecnica de camara de curado	64

INDICE DE IMÁGENES

Ilustración 1: Diagrama de flujo de producción de geopolímeros	47
Ilustración 2: Cascarilla de arroz.....	65
Ilustración 3: Ceniza de cascarilla de arroz (CCA)	65
Ilustración 4: Ubicación Agroindustria San Luis	65
Ilustración 5: Geopolímero a base de CCA	66
Ilustración 6: Formación de red N-A-S-H	66
Ilustración 7: Molino de bolas acorde ficha tecnica	66
Ilustración 8: Tamiz vibratorio de alta frecuencia.....	67
Ilustración 9: Mezclador para solución activadora	67
Ilustración 10: Mezclador para sistema geopolimérico	68
Ilustración 11: Moldes utilizados para producción de bloques	68
Ilustración 12: Camara de curado	68

I. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial existe una problemática ante la escasez de viviendas y el mal estado de las existentes debido a la falta de mantenimiento. La principal causa es el alto costo de los materiales de construcción, siendo el cemento, el que se utiliza con mayor demanda. Este producto, se obtiene de la molienda y calcinación conjunta de arcillas y piedra caliza. El proceso a escala industrial requiere grandes cantidades de energía en forma de calor y para generarla, se utilizan combustibles fósiles alcanzando temperaturas de hasta 1500 °C, por lo que sus costos de producción son altos e influyen directamente en el precio del cemento comercializado y generando a su vez un gran impacto al ambiente.

Una de las principales actividades del sector agropecuario en Nicaragua es el cultivo del arroz, alcanzando una producción anual de 6.1 millones de quintales oro (Ministerio Agropecuario, 2022). La cascarilla de arroz representa un 20% en peso del grano de arroz, esta constituye un subproducto considerado como un residuo agrícola abundante y hasta ahora poco utilizable para fines productivos, ya que comúnmente es quemada para la generación de calor que se requiere en el secado del arroz cuando este se corta de los campos de cultivo, ya que se debe reducir la humedad de un 22 % a un 12 % para iniciar el proceso de trillado.

Los geopolímeros se presentan como una alternativa viable a los materiales de construcción convencionales, debido a propiedades como alta resistencia a la compresión, buena resistencia a la abrasión, rápido curado y endurecimiento, baja permeabilidad, baja conductividad térmica y adecuada adherencia a diversos sustratos como hormigón, acero, vidrio y cerámica. Estas características los convierten en materiales competitivos, especialmente cuando se sintetizan a partir de residuos industriales o agrícolas, contribuyendo a la reducción del impacto ambiental asociado a la industria de la construcción.

En este contexto, la empresa nicaragüense Agroindustria San Luis utiliza la quema de cascarilla de arroz como fuente de energía térmica en el proceso de secado del grano, generando cenizas que actualmente no son aprovechadas de manera

productiva. La utilización de estas cenizas como materia prima para la elaboración de un geopolímeros representa una alternativa técnica y ambientalmente viable, que permitiría valorizar un residuo agroindustrial, reducir los costos de producción de materiales de construcción y disminuir el impacto ambiental en comparación con los materiales tradicionales basados en piedra caliza y arcilla. Desde el punto de vista social, esta propuesta contribuiría al desarrollo de materiales más accesibles, favoreciendo el acceso a soluciones constructivas para la vivienda y la infraestructura.

Este proyecto se alinea con el Plan Nacional de Producción, Consumo y Comercio (PNPCC) 2025–2026, al promover el aprovechamiento sostenible de residuos, y la reducción del impacto ambiental. De igual forma, se vincula con las líneas institucionales de investigación, innovación y extensión mediante la generación de conocimiento científico aplicado y soluciones tecnológicas acordes a la realidad nacional.

La presente propuesta de investigación tiene como objetivo diseñar un proceso de elaboración de un geopolímeros a partir de la ceniza de cascarilla de arroz generada en la empresa Agroindustria San Luis. El proyecto contempla el análisis de las propiedades fisicoquímicas de la ceniza, la definición de las materias primas, equipos y parámetros de operación necesarios, así como la propuesta de las operaciones unitarias del proceso. Finalmente, se evaluará el desempeño mecánico del geopolímeros mediante la comparación de su resistencia con la de un mortero Portland convencional, a fin de determinar su viabilidad como material alternativo para la construcción.

II. ANTECEDENTES Y MARCO LEGAL

El desarrollo de materiales alternativos al cemento Portland ha cobrado relevancia en las últimas décadas debido al impacto ambiental asociado a su producción, particularmente por las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) y el alto consumo energético. En este contexto, los geopolímeros han surgido como una alternativa viable, caracterizada por su capacidad de utilizar materiales ricos en sílice y alúmina, tales como residuos industriales y agroindustriales.

Diversos estudios a nivel internacional han demostrado que la ceniza de cascarilla de arroz (CCA) posee un alto contenido de sílice, lo que la convierte en un precursor adecuado para la síntesis de geopolímeros. Investigaciones recientes han evidenciado que, bajo condiciones controladas de combustión y procesamiento, la CCA puede presentar una estructura amorfa altamente reactiva, favoreciendo la formación del gel tipo N-A-S-H, responsable de las propiedades mecánicas del material.

A nivel regional, el aprovechamiento de residuos agroindustriales ha sido impulsado como una estrategia para reducir impactos ambientales y promover modelos de producción sostenible. En países con alta producción arroceras, como Nicaragua, la generación de cascarilla de arroz representa una fuente significativa de residuos, cuyo manejo inadecuado puede generar problemas ambientales, tales como la acumulación de desechos y emisiones por quema no controlada.

En Nicaragua, la producción de arroz constituye una actividad relevante dentro del sector agroindustrial, lo que conlleva la generación constante de subproductos como la cascarilla. Sin embargo, el aprovechamiento de este residuo en aplicaciones de valor agregado aún es limitado, lo que evidencia una oportunidad para el desarrollo de tecnologías orientadas a su valorización.

Desde el punto de vista normativo, el presente proyecto se enmarca en la legislación ambiental vigente en Nicaragua. La Ley No. 217, Ley General del Medio Ambiente y los Recursos Naturales, establece los principios para la protección, conservación y uso sostenible de los recursos naturales, promoviendo la adopción de tecnologías limpias y la reducción de impactos ambientales. En este sentido, el uso de la CCA

como materia prima alternativa se alinea con los principios de sostenibilidad y economía circular.

Asimismo, la Ley No. 883, Ley de Gestión Integral de Residuos Sólidos, fomenta la reducción, reutilización y reciclaje de residuos, incentivando el desarrollo de procesos que permitan su aprovechamiento. La transformación de la CCA en materiales geopoliméricos constituye una aplicación directa de estos lineamientos, al convertir un residuo en un insumo de valor agregado.

Por otro lado, la Ley No. 620, Ley General de Aguas Nacionales, regula el uso y protección del recurso hídrico, siendo relevante en procesos industriales donde se emplea agua como componente del sistema reactivo, como en la preparación de mezclas geopoliméricas.

Adicionalmente, el proyecto se vincula con las políticas públicas establecidas en el Plan Nacional de Producción, Consumo y Comercio (PNPCC 2025–2026), el cual promueve el desarrollo sostenible de la agroindustria y la incorporación de prácticas productivas eficientes y ambientalmente responsables.

En el ámbito técnico, el desarrollo del proceso considera principios generales aplicables a la industria de materiales de construcción, tales como el control de calidad de materias primas, la eficiencia energética en procesos térmicos y la seguridad en el manejo de sustancias químicas, especialmente en el uso de activadores alcalinos como el hidróxido de sodio.

Behak y Pérez Núñez (2008) estudiaron mezclas de suelo arenoso con CCA y cal con el objetivo de mejorar sus propiedades físico-mecánicas y ofrecer alternativas económicas para pavimentos de bajo tránsito. Analizaron la mineralogía mediante difracción de rayos X y evaluaron parámetros como compactación, resistencia a compresión y tracción diametral, y durabilidad. Su trabajo confirmó que la CCA puede modificar significativamente el comportamiento mecánico del suelo y contribuir a la estabilización de bases viales, además de mitigar problemas ambientales por su disposición.

Mejía, Mejía y Puertas (2012) utilizaron diferentes fuentes de CCA, una producida bajo condiciones controladas y otra obtenida de la industria molinera, para sintetizar materiales cementicios activados alcalinamente. La investigación demostró que el contenido de sílice amorfa (94 % en la ceniza controlada y 27 % en la industrial) influye directamente en el desempeño mecánico, alcanzando resistencias a compresión entre 28 y 48 MPa a los 7 días de curado. En todos los casos, los materiales superaron las resistencias obtenidas con cemento Portland en el mismo tiempo de curado, destacándose el uso de cenizas altamente amorfas como precursoras eficientes.

Sinclair López y Pacheco Sánchez (2016) analizaron morteros activados alcalinamente con diferentes proporciones de CCA, obtenida mediante calcinación controlada a una temperatura óptima de 700 °C. Su estudio incluyó caracterización por espectroscopía infrarroja, que confirmó la naturaleza amorfa y puzolánica de la ceniza. Observaron que el aumento del contenido de CCA tiende a disminuir las resistencias mecánicas, aunque los morteros alcanzan resistencias tempranas a los 3 días sin variaciones significativas posteriores. El estudio concluyó que las mejores propiedades mecánicas se alcanzan con el 75 % de CCA, 10 % Na_2O y un módulo de Na_2SiO_3 de 1.5.

La evaluación del desempeño mecánico se realiza conforme a estándares internacionales como ASTM C109 (American Society for Testing and Materials) para resistencia a compresión de morteros y ASTM C618 para materiales puzolánicos, garantizando validez y confiabilidad en los resultados.

III. OBJETIVOS

Objetivo General

Diseñar un proceso de elaboración de un geopolímero utilizando como materia precursora la ceniza de cascarilla de arroz proveniente de la empresa arrocería “Agroindustria San Luis”.

Objetivos Específicos

- Analizar las propiedades fisicoquímicas de la ceniza de cascarilla de arroz como material precursor en la síntesis del geopolímeros.
- Proponer las materias primas, equipos, parámetros de operación y las operaciones unitarias necesarias para la elaboración de un geopolímero a base de cascarilla de arroz.
- Comparar la resistencia mecánica del geopolímero contra un mortero Portland bajo condiciones estandarizadas de ensayo.

IV. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

El presente trabajo corresponde a un proyecto de graduación de carácter monográfico teórico, enfocado en el diseño conceptual de un proceso para la elaboración de geopolímeros utilizando como materia prima precursora la ceniza de cascarilla de arroz (CCA) generada en la empresa Agroindustria San Luis, ubicada en Sébaco, Nicaragua.

El proyecto se centra en la valorización teórica de un residuo agroindustrial abundante en el país, producto de la quema de cascarilla de arroz como fuente de energía térmica en el secado del grano. La ceniza de cascarilla de arroz, rica en sílice amorfa, se propone como precursor aluminosilicatado para la síntesis de geopolímeros mediante activación alcalina, como una alternativa sostenible al cemento Portland convencional.

El proyecto se localiza en una región agrícola de Sébaco, Nicaragua, donde existe una alta producción arroceras concentrada en áreas con presencia de trillos, caracterizada por la generación significativa de residuos de cascarilla de arroz, donde la gestión de residuos sólidos representa un desafío ambiental.

El área de influencia presenta características socioeconómicas asociadas a actividades primarias y de transformación agroindustrial, con disponibilidad de mano de obra local y limitada diversificación productiva. Desde el punto de vista ambiental, la quema inadecuada de la cascarilla y la disposición no controlada de la ceniza generan emisiones y afectaciones al suelo y al aire, lo que convierte a este proyecto en una alternativa tecnológica para el aprovechamiento sostenible de dichos residuos.

El protagonista directo es la empresa Agroindustria San Luis, en su condición de generadora del residuo agroindustrial de ceniza de cascarilla de arroz, la cual constituye la materia prima fundamental de la investigación.

De manera indirecta, el proyecto beneficia a diversos usuarios vinculados al ámbito productivo, académico y social. Entre ellos se encuentran el sector de la

construcción, que podría incorporar materiales alternativos más sostenibles; las instituciones académicas y de investigación, que encontrarán nuevos aportes al conocimiento científico; las entidades relacionadas con la gestión ambiental, interesadas en la valorización de residuos; y la comunidad local, que podría verse favorecida por iniciativas orientadas a la sostenibilidad, la innovación tecnológica y la reducción del impacto ambiental.

El estudio busca aportar al conocimiento científico sobre el aprovechamiento de residuos agroindustriales en el desarrollo de materiales de construcción alternativos, así como establecer una base teórica que sirva de referencia para futuras investigaciones o posibles aplicaciones a mayor escala.

El presente proyecto abarca el análisis técnico del proceso de geopolimerización y el desarrollo de un diseño conceptual del sistema productivo, incluyendo la identificación de operaciones unitarias, selección preliminar de equipos y estimación de requerimientos energéticos. No contempla la construcción de prototipos ni la validación experimental del proceso.

No obstante, el proyecto presenta algunas limitaciones, ya que la investigación no abarca la producción industrial ni el análisis económico del proceso a gran escala, ya que se restringe a la escala experimental, mediante ensayos desarrollados exclusivamente bajo condiciones teóricas, sin considerar su aplicación directa en estructuras reales. Además, los resultados obtenidos se limitan a la ceniza procedente de una sola empresa, por lo que se requieren estudios complementarios para el análisis de diversas fuentes de CCA.

V. FUNDAMENTOS TÉCNICOS

El presente proyecto se fundamenta en la síntesis de geopolímeros utilizando ceniza de cascarilla de arroz (CCA) como precursor. Los fundamentos técnicos expuestos a continuación orientan el diseño, formulación y evaluación del material.

5.1. Geopolímeros

Los geopolímeros son materiales cementantes inorgánicos obtenidos a partir de la activación alcalina de precursores ricos en sílice (Si) y aluminio (Al), que dan lugar a redes tridimensionales amorfas o semicristalinas formadas por tetraedros alternados de SiO_4 y AlO_4^- enlazados mediante oxígenos compartidos. Este tipo de estructura confiere a los geopolímeros elevadas propiedades mecánicas, alta estabilidad térmica y resistencia química, así como un proceso de síntesis que puede realizarse a temperaturas inferiores a 100 °C, lo que los convierte en una alternativa sostenible frente a los cementos tradicionales (Davidovits, 2015).

El proceso de formación de los geopolímeros, conocido como geopolimerización, consiste en la disolución parcial de los aluminosilicatos presentes en el material precursor bajo un medio altamente alcalino, seguida de la policondensación de las especies disueltas para formar una matriz sólida continua. Los materiales precursores pueden provenir tanto de fuentes naturales (arcillas, caolines) como de residuos industriales y agroindustriales, tales como cenizas volantes, escorias y ceniza de cascarilla de arroz (Provis & van Deventer, 2014).

Desde el punto de vista ambiental, los geopolímeros presentan ventajas significativas, ya que su producción implica menores emisiones de dióxido de carbono en comparación con el cemento Portland, al evitar procesos de calcinación intensivos en energía. Asimismo, su durabilidad, resistencia a ambientes agresivos y buen desempeño mecánico los posicionan como materiales innovadores para aplicaciones en la construcción y la ingeniería civil (Duxson et al., 2007).

En el contexto del presente proyecto, el estudio de la CCA como materia precursora se fundamenta en su elevado contenido de sílice reactiva, condición indispensable para la formación de estructuras geopoliméricas estables y funcionales.

5.2. Compuesto puzolánico

Los materiales puzolánicos son sustancias silíceas o aluminosilíceas que, en presencia de agua, reaccionan químicamente con el hidróxido de calcio liberado durante la hidratación del cemento, formando compuestos con propiedades cementantes. El uso de puzolanas se remonta a la antigüedad, siendo ampliamente empleado en construcciones romanas, y ha mantenido su relevancia hasta el desarrollo moderno de cementos mezclados y materiales cementantes suplementarios (Mehta & Monteiro, 2014).

El cemento puzolánico se obtiene mediante la molienda conjunta o mezcla íntima de puzolana y cal hidratada, generalmente en proporciones cercanas al 70 % de puzolana y 30 % de cal. La reacción puzolánica mejora la durabilidad del material, reduce la permeabilidad y contribuye a una mayor resistencia química frente a agentes agresivos (Neville, 2011).

En el marco de la ingeniería sostenible, las puzolanas de origen residual han cobrado especial interés, ya que permiten la valorización de desechos industriales y agroindustriales, reduciendo el impacto ambiental asociado a su disposición final y al uso de materias primas vírgenes (Sensale, 2006).

5.2.1. Propiedades del compuesto puzolánico

Las propiedades de las puzolanas dependen principalmente de su composición química, estructura mineralógica y grado de amorfismo. Se considera que una puzolana presenta buena actividad cuando la suma de los óxidos principales (SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3) supera el 70 %, y cuando la sílice se encuentra predominantemente en fase amorfa, lo que incrementa su reactividad química (ASTM Internacional C618, 2022).

En el caso de las puzolanas obtenidas a partir de residuos agrícolas, como la CCA, el proceso de combustión juega un rol importante en sus propiedades finales. Una quema controlada, con temperaturas entre 400 y 760 °C y tiempos de residencia adecuados, favorece la formación de sílice amorfa altamente reactiva. Por el contrario, cuando la combustión se realiza a temperaturas superiores a 800 °C, la sílice tiende a transformarse en fases cristalinas como cuarzo o cristobalita, las

cuales presentan baja reactividad puzolánica a temperatura ambiente, reduciendo su eficiencia como material cementante (Mehta, 1992; Neville, 2011).

Estas características hacen que el control del proceso de incineración sea un parámetro de control crítico, ya que garantiza el uso eficiente de la ceniza de cascarilla de arroz como material puzolánico y como precursor para la síntesis de geopolímeros.

5.3. Ceniza de cascarilla de arroz

La ceniza de cascarilla de arroz (CCA) es un subproducto generado tras la combustión de la cascarilla, residuo agrícola producido en grandes volúmenes por la industria arroceras. Esta ceniza se caracteriza por su elevado contenido de sílice, que puede superar el 90 %, lo que la convierte en una fuente alternativa y económica de sílice para aplicaciones en materiales cementantes y geopoliméricos (Rodríguez et al., 1992).

Las principales impurezas presentes en la ceniza corresponden a óxidos de calcio, potasio, magnesio y manganeso, mientras que elementos como aluminio, hierro, boro y fósforo aparecen en concentraciones menores. La naturaleza y cantidad de estas impurezas dependen del tipo de arroz, las condiciones de cultivo y el proceso de combustión empleado (Rodríguez et al., 1992).

Estudios previos han demostrado que la CCA puede reemplazar parcialmente el cemento Portland, alcanzando resistencias a compresión comparables y favoreciendo la reducción de emisiones de CO₂ (Sensale, 2006; Duxson et al., 2007).

5.4. Activación alcalina de la CCA

La activación alcalina consiste en la reacción química entre un material rico en sílice y/o alúmina y una solución alcalina concentrada, generalmente compuesta por hidróxidos alcalinos (NaOH, KOH) y silicatos alcalinos.

En el caso de la CCA, su rol principal es el de fuente de sílice reactiva, que al disolverse en el medio alcalino libera especies silicatadas necesarias para la formación del gel geopolimérico. Los factores que influyen en la activación alcalina

son: Concentración molar del activador, relación silicato/hidróxido, relación sólido/líquido, temperatura y tiempo de curado (Davidovits, 2015; Duxson et al., 2007; Provis & van Deventer, 2014).

5.5. Influencia de la CCA en las propiedades del geopolímero.

La incorporación de ceniza de cascarilla de arroz como precursor influye directamente en la resistencia mecánica, la durabilidad química, la resistencia térmica y la permeabilidad del geopolímero. Su alto contenido de sílice amorfa favorece la formación del gel aluminosilicatado tipo N-A-S-H durante la activación alcalina, lo que contribuye al desarrollo de resistencia estructural (Davidovits, 2015; Provis & van Deventer, 2014). La magnitud de esta resistencia depende del grado de reacción de la sílice y de una adecuada relación Si/Al, la cual incide en el nivel de reticulación y compacidad de la matriz formada.

Una relación Si/Al equilibrada y una reacción eficiente generan matrices más densas y homogéneas, con menor porosidad capilar, lo que mejora tanto la resistencia mecánica como la durabilidad (Provis & van Deventer, 2014). A diferencia de los sistemas Portland, la baja presencia de hidróxido de calcio reduce la susceptibilidad a procesos de lixiviación y ataque químico, favoreciendo la estabilidad en ambientes agresivos (Mehta & Monteiro, 2014).

Asimismo, la estructura tridimensional del gel geopolimérico presenta mayor estabilidad frente a temperaturas elevadas en comparación con matrices basadas en C-S-H, lo que explica su mejor comportamiento térmico (Davidovits, 2015). En conjunto, estas propiedades dependen de la reactividad de la CCA y de la homogeneidad del gel formado durante el proceso de activación.

5.6. Ventajas técnicas y ambientales del uso de CCA en geopolímeros

El aprovechamiento de la CCA de Agroindustria San Luis como precursor geopolimérico presenta ventajas relevantes: Valorización de un residuo agroindustrial, disminución de la huella de carbono frente al cemento Portland y reducción de emisiones de CO₂ asociadas a materiales cementantes convencionales (Duxson et al., 2007).

La producción de geopolímeros a partir de CCA permite obtener materiales con alta resistencia mecánica, baja permeabilidad y elevada estabilidad química y térmica. Además, su uso contribuye al desarrollo de materiales de construcción sostenibles y de menor impacto ambiental (Davidovits, 2015; Duxson et al., 2007).

VI. METODOLOGIA PARA EL DESARROLLO DEL PROYECTO DE GRADUACIÓN

6.1 Enfoque y tipo de investigación

El estudio adopta un enfoque descriptivo, orientado a la caracterización teórica de las propiedades del material y al diseño conceptual del proceso productivo. Se trata de una investigación de tipo aplicado, orientada al diseño conceptual de un proceso para la producción de materiales geopoliméricos a partir de ceniza de cascarilla de arroz (CCA) para la valorización de un residuo agroindustrial mediante principios de ingeniería química y ciencia de materiales.

La información analizada proviene de una revisión bibliográfica sistemática de artículos científicos, libros especializados, normas técnicas (ASTM) y reportes técnicos relacionados con geopolímeros, ceniza de cascarilla de arroz y materiales cementantes alternativos. Esta revisión documental constituye la base fundamental para el análisis de propiedades, la definición de parámetros y la propuesta del proceso. reducir la acumulación de residuos sólidos industriales.

La metodología se estructuró en función de los objetivos específicos planteados, definiendo para cada uno de los procedimientos técnicos, herramientas, criterios de análisis y mecanismos de validación.

6.2. Análisis de las propiedades fisicoquímicas de la CCA

Se realiza una revisión exhaustiva de la literatura científica especializada sobre CCA con el fin de identificar y analizar las propiedades fisicoquímicas de la ceniza de cascarilla de arroz que determinan su aptitud como precursor en la síntesis de geopolímeros; identificando las condiciones de reactividad del material.

Los aspectos evaluados incluyen:

Composición química elemental, con énfasis en el contenido de SiO_2 y Al_2O_3 .

Naturaleza mineralógica (proporción de fases amorfas versus cristalinas).

Propiedades físicas tales como tamaño de partícula, área superficial específica, densidad aparente y pérdida por ignición.

Influencia de las condiciones de combustión (temperatura y tiempo) en la reactividad puzolánica de la ceniza.

Esta caracterización teórica permite establecer los requisitos de calidad que debe cumplir la CCA para ser utilizada eficientemente en procesos de activación alcalina.

6.3. Definición de materias primas y equipos necesarios para la elaboración del geopolímero

A partir de datos sobre la producción total de arroz en la empresa Agroindustrias San Luis y de los resultados del análisis de las propiedades de la CCA, se propone la selección de materias primas, equipos de laboratorio y parámetros operativos óptimos para la síntesis del geopolímero.

Se definen:

- Las materias primas principales (CCA como precursor, solución activadora alcalina a base de NaOH y Na_2SiO_3 , y agregados finos); realizando los cálculos necesarios de las proporciones a utilizarse de cada uno de ellos.
- Los equipos requeridos para las operaciones de molienda, tamizado, mezclado, moldeo y curado, realizando un análisis para determinar diferentes parámetros operacionales fundamentales de cada uno de los equipos.
- Los parámetros de operación críticos, tales como concentración del activador, relación sólido/líquido, módulo del silicato, relación Si/Al, tiempo y temperatura de mezclado y condiciones de curado.

La definición de estos elementos se basa en el análisis comparativo de estudios previos reportados en la literatura científica, buscando identificar las condiciones que optimizan la reactividad de la CCA y el desempeño mecánico del geopolímero.

El diseño desarrollado corresponde a una simulación conceptual de carácter ingenieril basada en datos reportados en la literatura.

6.4. Comparación de la resistencia mecánica del geopolímero frente a un mortero Portland

Se efectúa una comparación teórica del desempeño mecánico entre el geopolímero elaborado a base de CCA y el mortero convencional fabricado con cemento Portland.

Esta comparación se basa en la revisión y análisis de datos reportados en la literatura científica, seleccionando estudios que utilicen condiciones de ensayo comparables (norma ASTM C109, tiempo de curado, geometría de probetas y método de ensayo).

Se evalúan principalmente los valores de resistencia a la compresión a diferentes edades, así como otras propiedades relevantes como estabilidad térmica y resistencia a agentes químicos agresivos. El propósito es determinar, desde un punto de vista teórico, la viabilidad técnica del geopolímero como material alternativo al mortero Portland en aplicaciones de la construcción.

Para el desarrollo de los cálculos se emplearon ecuaciones de transferencia de calor, balances de energía y relaciones de potencia mecánica aplicadas a equipos industriales

VII. RESULTADOS

El presente capítulo expone los resultados derivados del análisis documental realizado para el diseño de un proceso de elaboración de un geopolímero utilizando como materia precursora la ceniza de cascarilla de arroz (CCA) proveniente de la empresa arrocería Agroindustria San Luis.

El estudio se basa en información documental y modelación conceptual, por lo que no incluye validación experimental. Los resultados representan una aproximación teórica del proceso.

7.1. Análisis de las propiedades fisicoquímicas de la CCA

El cultivo de arroz en Agroindustria San Luis, ubicado en Sébaco, departamento de Matagalpa, se caracteriza por la producción de arroz de tipo *Oryza sativa* de grano largo; tipo de arroz adaptado a sistemas de riego intensivos en el valle de Sébaco. La Cascarilla en este tipo de grano representa entre el 18 y el 20% según estudios realizados por la FAO.

La CCA es un subproducto generado durante la combustión de la cascarilla de arroz en procesos industriales de generación de energía térmica. Diversos estudios reportan que su composición química está dominada por un alto contenido de dióxido de silicio (SiO_2), acompañado en menor proporción por óxidos de aluminio (Al_2O_3), calcio (CaO), hierro (Fe_2O_3) y otros compuestos minerales, composición de la CCA ver Tabla 3 en Anexos 11.1.

Estudios experimentales reportan que la ceniza de cascarilla de arroz presenta contenidos de dióxido de silicio (SiO_2) entre 80 % y 95 %, dependiendo de las condiciones de combustión y del origen del arroz. Investigaciones coinciden en que cuando la combustión se realiza en un rango de 700 ± 50 °C durante períodos controlados de 1 a 2 horas, la sílice obtenida se mantiene predominantemente en estado amorfo, alcanzando fracciones amorfas superiores al 85 %.

En contraste, temperaturas superiores a 800 °C favorecen la transformación estructural de la sílice amorfa hacia fases cristalinas como cristobalita, lo cual reduce significativamente su reactividad en medios alcalinos. Por debajo de 500 °C,

la combustión incompleta puede generar residuos carbonosos que disminuyen la pureza del material y afectan su comportamiento en procesos de activación alcalina.

La literatura también reporta que la CCA producida en el rango óptimo de 700 ± 50 °C presenta áreas superficiales específicas entre 40 y 100 m²/g, lo que incrementa su capacidad de disolución en soluciones alcalinas concentradas (8–12 M de NaOH), favoreciendo la formación de geles aluminosilicatados responsables del desarrollo de resistencia mecánica en sistemas geopoliméricos.

En consecuencia, el control térmico durante la combustión constituye un factor crítico para garantizar la obtención de sílice amorfa altamente reactiva, condición esencial para su aplicación eficiente como precursor en procesos de geopolimerización.

Como resultado del análisis descriptivo realizado, se obtuvo la validación teórica de la CCA como precursor geopolimérico, así como la identificación de factores críticos de calidad que determinan su desempeño: temperatura de combustión (control del estado amorfo), grado de molienda (reactividad superficial) y nivel de pureza (contenido de carbono residual y compuestos no reactivos). Asimismo, se consolidó la fundamentación técnica necesaria para sustentar su aplicación en la síntesis de materiales geopoliméricos con uso potencial en la construcción.

7.2. Definición de materias primas, equipos necesarios y parámetros de operación para la elaboración de un geopolímero

La producción promedio anual de arroz en Agroindustrias San Luis es de 350,000 a 450,000 quintales por año; lo que representa que al año se desechan en promedio entre 87,500 y 112,500 quintales de cascarilla de arroz, el cual una vez se realiza el proceso de combustión térmica tiene una pérdida de peso entre el 75 y 85% produciendo en promedio 21,875 y 28,125 quintales de CCA.

Tomando en consideración el promedio de días de producción al año, 300 días productivos, y la producción anual de 350,000, en agroindustrias San Luis se

produce al día 1,170 quintales de arroz, lo que representa que en promedio se desechan 73.125 quintales de CCA, que es igual a 7,312.5 libras.

Para la elaboración del geopolímero se definieron las materias primas, especificaciones químicas y condiciones operativas necesarias para garantizar la formación de una matriz aluminosilicatada estable.

7.2.1. Materias primas

La CCA debe contener $\geq 80\%$ de SiO_2 , con al menos 70% en fase amorfa. El contenido de CaO no debe superar 5% y la pérdida por ignición debe ser $\leq 6\%$. El tamaño de partícula requerido es $< 75\ \mu\text{m}$ y la humedad $< 5\%$. Estas características se obtienen mediante combustión controlada a $700 \pm 50\ ^\circ\text{C}$ durante 1–2 h.

El sistema activador seleccionado es una mezcla de hidróxido de sodio (NaOH) y silicato de sodio (Na_2SiO_3). La concentración óptima de NaOH es $10 \pm 2\ \text{M}$. Para preparar una solución $10\ \text{M}$ se requieren 400 g de NaOH por litro ($\text{PM} = 40\ \text{g/mol}$).

El silicato de sodio debe presentar módulo $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ entre 2.0 y 3.3. La relación en masa $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ recomendada es 1.5–2.5. El diseño del sistema debe mantener una relación molar $2 \leq \text{Si}/\text{Al} \leq 3$

En geopolímeros acorde a literatura abordada la proporción de cada solución para la obtener el sistema activador debe ser 60 – 70% de silicato de sodio y 30 – 40% de hidróxido de sodio.

Relaciones inferiores generan matrices frágiles; superiores a 3.5 disminuyen resistencia por exceso de sílice no integrada. La relación sólida/líquido óptimo es 0.40–0.45.

Como formulación base, por cada 1 kg de CCA se emplean 0.45 kg de solución activadora (0.15 kg NaOH $10\ \text{M}$ y 0.30 kg Na_2SiO_3). Para mortero, se incorpora arena sílicea en proporción 2:1 a 3:1 respecto al precursor.

Tomando en consideración que la producción promedio diaria de CCA es de 7,312.5 libras, equivalente a 3,316.89 kg, se requiere 1,4595 kg de solución activadora.

7.2.2. Equipos

a. Molino

El proceso requiere un molino de bolas, capaz de reducir el tamaño de partícula de la CCA hasta $\leq 75 \mu\text{m}$, con capacidad de molienda fina de 500 – 1500lb/h.

Para el cálculo de la potencia del molino se utiliza la ecuación de energía de molienda basada en la teoría de Ley de Bond:

$$E = 10W_i \left(\frac{1}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{F_{80}}} \right)$$

Donde:

E: energía específica (kWh/ton)

W_i : índice de trabajo (kWh/ton)

F_{80} : tamaño inicial (μm)

P_{80} : tamaño final (μm)

Sabiendo que:

$W_i \approx 14 \text{ kWh/ton}$ (material silíceo)

F_{80} : 500 μm

P_{80} : 75 μm

Sustituyendo en ecuación

$$E = 10(14) \left(\frac{1}{\sqrt{75}} - \frac{1}{\sqrt{500}} \right)$$

La energía específica requerida es de 9.8kWh/ton; a partir de este dato se obtiene la potencia requerida con la siguiente formula:

$$P = E \times \text{Capacidad}$$

La capacidad de dicho molino es la cantidad de ceniza de CCA que se introducirá por hora, asumiendo un tiempo de operación de 6 horas. Se sabe que 7,312.5 lb es equivalente a 3.32 toneladas métricas, teniendo así capacidad de 0.55 ton/h.

Sustituyendo en ecuación de potencia se tiene:

$$P = 9.8 \times 0.55$$

Teniendo potencia de 5.225kW, considerando el 85% de eficiencia del sistema la potencia real es de 6.34 kW, considerando así la potencia final recomendada 6 – 8 kW (8 – 11 HP).

Para poder dimensionar el molino se utiliza la formula:

$$P \approx 0.285D^{2.5}L$$

Donde:

D: Diámetro (m)

L: Longitud (m)

Considerando que es un proceso de moliendas fina se necesita mayor tiempo de residencia, mayor contacto bola – partícula y más eventos de fricción, no solo impacto; Se tiene la relación:

$$L \approx 1.2D$$

Sustituyendo la ecuación anterior:

$$6.34 \approx 0.285D^{2.5}(1.2D)$$

Teniendo así que se requiere un diámetro de 2.3 m y una longitud de 2.76m; además acorde a revisión bibliográfica se indago que la velocidad debe ser dentro del 65 al 75% de la velocidad crítica y la carga de las bolas del 40% del volumen.

La molienda incrementa el área superficial específica y mejora la disolución de la sílice en medio alcalino. Sin esta etapa, la reacción geoplímica se vuelve lenta e incompleta.

b. Tamiz

Posteriormente se emplea un tamiz vibratorio de alta frecuencia (malla 200, 75 μm) frecuencia en rango de 1500 – 3000 rpm para garantizar homogeneidad granulométrica, mejorando la separación de finos y reduciendo el cegamiento de malla. Para el caso de una producción estimada de 0.5 – 0.6ton/h el tamiz se debe sobredimensionar al menos a 1 ton/h para evitar saturación.

La uniformidad del tamaño de partícula mejora la reproducibilidad del material y evita zonas con diferente grado de reacción.

c. Mezclador

c.1. Solución activadora

Para la preparación del activador se requiere un tanque de acero inoxidable AISI 316 resistente a medios alcalinos, ya que el NaOH es altamente corrosivo; con sistema de tapa, protección contra salpicaduras y se debe realizar una dosificación controlada del NaOH.

Es muy importante considerar que se trata de una disolución exotérmica que acorde a literatura puede alcanzar temperaturas de 60 – 90°C ; por ende, es recomendable el uso de ventilación o de camisa de enfriamiento.

Tomando en consideración parámetros anteriores, donde la capacidad por hora es de 0.55ton/h equivalente a 550kg/h; considerando la relación de CCA y solución activadora el flujo del diseño es de 247.5kg/h tomando en consideración un flujo de 250kg/h para facilidades de cálculos.

El cálculo de la densidad de la solución activadora se puede estimar mediante una regla de mezclas en base a fracciones másicas:

$$\frac{1}{\rho_{mix}} = \sum \frac{\omega_i}{\rho_i}$$

Donde:

ρ_{mix} : densidad de la solución

ω_i : fracción másica por cada componente

ρ_i : densidad por cada componente

La densidad típica de hidróxido de sodio (8 – 12 M) es de 1300 – 1500 kg/m³ y la de silicato de sodio líquido es de 1400 – 1600kg/m³; suponiendo que la mezcla es 35% hidróxido de sodio con densidad de 1400kg/m³ y 65% de silicato de sodio con densidad de 1500kg/m³.

Sustituyendo en la ecuación:

$$\frac{1}{\rho_{mix}} = \frac{0.65}{1500} + \frac{0.35}{1400}$$

La densidad de la solución activadora es aproximadamente 1463.41kg/m³, tomando en consideración para facilidad de cálculo una densidad de 1400 kg/m³.

El tiempo de preparación recomendado del activador es de 20 – 40 minutos se toma el tiempo promedio de 30 minutos o equivalente a 0.5h; el cual será necesario para el cálculo del volumen que debe tener el tanque; la ecuación a utilizarse es:

$$V = \frac{Qt}{\rho}$$

Donde:

Q: Caudal (250 kg/h)

t: tiempo (0.5h)

ρ : densidad de solución (1400kg/m³)

Teniendo un volumen de 0.089 m³ el cual tomando en consideración un factor de seguridad del 20 – 30%, el volumen real es de 0.12m³; considerando un volumen considerado 0.12 – 0.15m³.

Considerando un tanque cilíndrico, se utiliza la siguiente fórmula para saber cuál es el valor del diámetro y la altura:

$$V = \frac{\pi D^2 H}{4}$$

Donde:

H: Altura (m)

D: diámetro (m)

Se considera el volumen del tanque de 0.13m^3

La relación estándar de altura/diámetro (H/D) proviene de criterio de diseño hidrodinámico y mecánico establecidos en la literatura para tanques agitados; esto basado en los patrones de flujo en tanques agitados, eficiencia de la mezcla y la transferencia de masa y energía.

Según literatura la relación óptima industrial debe ser 1 – 1.5 para tener flujo balanceado y buena mezcla axial y radial; ya que así se evita zonas muertas, se tiene una mejor distribución en el agitador y se obtiene una mezcla homogénea en menor tiempo.

$$H/D = 1 - 1.5$$

Suponiendo el valor de esta relación es 1,2

Sabemos que el diámetro del tanque debe ser de aproximadamente 0.45m y de altura de 0.55m

Al tener soluciones de viscosidad baja – media y un sistema monofásico (líquido – líquido) y requiriendo disolver el hidróxido de sodio y homogenizar soluciones densas se requiere seleccionar un agitador de turbina de cuatro palas inclinadas (típicamente 45°) con velocidad de 200 – 500 rpm; ya que se requiere un flujo combinado axial, donde se tenga circulación vertical y radial donde se realice dispersión lateral; para evitar zonas muertas, mejorar disolución y homogenizar rápidamente.

La potencia del agitador para líquidos de viscosidad media es de $0.15 - 1.5 \text{ kW/m}^3$, por motivos de cálculo se selecciona potencia de 1 kW/m^3 y sabiendo que el volumen es de 0.13 m^3 se tiene la siguiente formula:

$$P = VP_i$$

Teniendo que la potencia del agitador es de aproximadamente 0.13 kW , recomendando una potencia de $0.25 - 0.5 \text{ kW}$.

c.2. Sistema geopoliméricos

Para el cálculo del mezclador; primero se realiza el balance de masa; sabiendo ya que el flujo de CCA es de 550 kg/h y del de activador alcalino es de 247.5 kg/h ; se calcula el de la arena de sílice que se sabe tiene relación de 2:1 a 3:1 (arena/CCA); El flujo mínimo de arena a utilizarse es de 1100 kg/h y el máximo de 1650 kg/h .

El flujo total de masa en base a formula es:

$$m_{total} = m_{CCA} + m_{act} + m_{arena}$$

Teniendo en el caso mínimo 1897.5 kg/h y en el caso máximo 2447.5 kg/h tomando un promedio de 2200 kg/h equivalente a 2.2 ton/h .

La mezcla está compuesta por CCA que es un polvo fino, arena de sílice que es un sólido granular y la solución activadora que es un líquido viscoso, esto genera un sistema sólido – sólido con adición de líquido (granular húmeda/pasta). Para este tipo de sistema se requiere mezcla convectiva (movimiento en masa), distribución uniforme del líquido y baja segregación de partículas; por ende, es requerido un mezclador de paletas horizontal porque las paletas generan un flujo convectivo eficiente causando elevación del material, caída por gravedad y mezcla tridimensional lo que lo convierte ideal para mezcla de sólidos líquidos y mezclas densas.

También se caracteriza por el manejo de altas cargas de sólido, en este caso representan el rango de 75 al 85% evitando así compactaciones.

Este tipo de mezclador está diseñado a escala industrial (flujo de masa del proceso de 2.2 ton/h) para operaciones continuas o semi continuas y tiene una alta capacidad industrial.

Acorde a literaturas consultadas para mezclas de morteros/geopolímeros el tiempo de mezclado es de 3 – 8 min Ver tabla 4 Tiempos de mezclado según tipo de sistema en sección de anexos 11.1. Se selecciona un tiempo de 5 min, equivalente a 0.083 h, considerando alta proporción de sólidos.

La densidad de la mezcla se calcula se realiza mediante una estimación basada en el sistema utilizando fórmula para sistemas solidos líquidos:

$$\rho_{mix} = \frac{\sum m_i}{\sum \left(\frac{m_i}{\rho_i} \right)}$$

Donde:

ρ_{mix} : densidad de la mezcla (kg/m³)

m_i : masa de cada componente (kg)

ρ_i : densidad de cada componente (kg/m³)

Considerando el promedio de arena que es 1375 kg/h y obteniendo los datos de las densidades de cada uno de los compuestos de literatura abordada donde densidad de CCA es 600 – 900kg/m³ (materiales livianos), densidad de arena es 2,600kg/m³ y de la solución activadora 1,400kg/m³.

Sustituyendo en la ecuación tenemos:

$$\rho_{mix} = \frac{550 + 247.5 + 1375}{\frac{550}{800} + \frac{247.5}{1400} + \frac{1375}{2600}}$$

Teniendo una densidad de la solución de 1,559.02kg/m³

A partir de estos datos se calcula el volumen de mezclado con la siguiente formula:

$$V = \frac{Qt}{\rho}$$

Donde:

Q: Caudal (2200 kg/h)

t: tiempo (0.083h)

ρ : densidad de mezcla (1559.02kg/m³)

Sustituyendo

$$V = \frac{(2200)(0.083)}{(1559.02)}$$

Teniendo un volumen aproximado de la solución de 0.117m³ este dato es relevante para poder calcular el volumen real del tanque; acorde a literatura el rango del factor de llenado para sistemas sólido + líquidos está en rango de 50 – 70% Ver tabla 5 factor de llenado de mezcladores según tipo de sistema en sección anexos 11.1.

La ecuación del factor de llenado es la siguiente:

$$\Phi = \frac{V_{ocupado}}{V_{total}}$$

Donde:

Φ : factor de llenado

$V_{ocupado}$: Volumen de la mezcla (m³)

V_{total} : Volumen del equipo (m³)

Tomando un factor medio de llenado de 0.65 y sustituyendo en ecuación se tiene:

$$0.65 = \frac{0.117}{V_{total}}$$

Teniendo el volumen total del equipo de 0.18m³ el cual podría estar dentro de rango de 0.18 a 0.25 m³; considerando la media de 0.2m³.

El tanque se considera un cilindro horizontal, la relación H/D del mezclador se estableció en rango de 1.5 – 2.5, de acuerdo con recomendaciones la literatura para mezcladores horizontales, seleccionándose un valor de 2 como condición óptima que garantiza un adecuado tiempo de residencia y eficiencia de mezcla (Paul et al., 2004; Perry y Green, 2008).

La ecuación para el cálculo del volumen es:

$$V = \frac{\pi D^2 H}{4}$$

Donde:

H: Altura (m)

D: diámetro (m)

Y acorde a la relación H/D = 2; se determina que H=2D, sustituyendo así:

$$V = \frac{\pi D^2 (2D)}{4}$$

Obteniendo así:

$$0.2 = \frac{\pi D^3}{2} \therefore 0.12 = D^3$$

Teniendo así el diámetro igual a 0.49 m y basado en la relación H/D la altura del mezclador es 0.98 m; considerando un factor de redondeo el diámetro recomendado final es de 0.5m y la altura de 1m.

A partir del volumen del equipo se procede con el cálculo de potencial del mezclador; que acorde a literatura para mezcladores de paletas el rango es 5 – 10kW por m³ considerando una media de 7kW/m³ ver Tabla 6 Potencia específica de mezclado según tipos de sistema en sección Anexos 11.1.

La potencia se estima con la siguiente ecuación:

$$P = P_v V$$

Donde:

P: potencia (kW)

P_v : potencia específica (kW/m³)

V: Volumen útil del mezclador (m³)

Sustituyendo:

$$P = 0.2 (7) \approx 1.4kW$$

Teniendo como resultado la potencia para mezclador de aproximadamente 1.4kW, entrando en rango de recomendación de 1.5 – 3kW.

Adicional el tanque debe ser de acero inoxidable AISI 304/316 con un espesor de 3 – 5mm para garantizar la presión atmosférica y la carga mecánica de este.

El diámetro del eje del mezclador se estimó inicialmente como una fracción del diámetro del mezclador (5 – 10%) de acuerdo con prácticas reportadas por la literatura:

$$D_{eje} \approx 0.05 - 0.1D_{tanque}$$

Teniendo así el rango de 25 – 50 mm.

La altura de las paletas y su inclinación se determinan por geometría y el mecanismo de mezcla que es un flujo convectivo; se usa la proporción:

$$h_p = (0.7 - 0.9)D$$

Donde:

h_p : altura radial de la paleta

D: diámetro interno del mezclador.

Si la altura de la paleta es menor a 0.7D la mezcla es deficiente ya que no levanta suficiente material y si la altura es mayor a 0.9D se tiene alta probabilidad de rozamiento de paredes causando desgaste y mayor consumo energético. La altura de la paleta se establece como el 80% del mezclador con el fin de garantizar un

adecuado levantamiento del material y evitar zona muerta; por tanto, la altura de la paleta es 0.4m.

La inclinación de la paleta controla el tipo de flujo si se tiene paletas rectas (ángulo =0°) se tiene una mala distribución longitudinal ya que solo se hace una mezcla radial; si el ángulo de las paletas es mayor a 60° se tiene poca mezcla real por transporte excesivo; lo recomendado es que este en rango de 30° – 40° garantizando mezcla tridimensional optima teniendo un flujo axial a lo largo del eje y flujo radial mezcla local

La velocidad de operación del mezclador se determinó mediante el uso del número de Froude como criterio teórico y su ajuste con rangos empíricos reportados para mezclador de paletas. El número de Froude cumple la siguiente ecuación:

$$Fr = \frac{N^2 D}{g}$$

Donde:

Fr: número de Froude

N: velocidad (rev/s)

D: diámetro del mezclador (m)

g: gravedad

Mediante consultas bibliográficas (Paul et al., 2004; Perry, 2008) se tiene que Fr menor que 0.5 el resultado es una mezcla pobre; si FR mayor a 2 se trata de centrifugación; el régimen optimo es Fr en rango de 0.5 a 1.5; seleccionando para calculo Fr=1.

Despejando la formula anterior:

$$N = \sqrt{\frac{Fr g}{D}}$$

Teniendo así velocidad de 4.43rev/s que al realizar la conversión a rpm se tiene 266rpm; este valor es teórico, pero en mezcladores de paletas no se usa directamente por que el movimiento lo genera la paleta no solo la gravedad; el material es abrasivo (arena) y se busca evitar desgaste, segregación y consumo excesivo; según literatura el mezclador de paletas tiene un rango de velocidad de 20 – 60 rpm ; al trabajar con un sistema que es una mezcla densa la velocidad recomendada de 30 – 50rpm con un valor optimo de 40rpm.

d. Moldes

Para geopolímeros de tipo construcción se tiene dos opciones más comunes de tipo de producto a fabricar bloques tipo mampostería y probetas para ensayo; el tamaño más usado y recomendado por la literatura pasado en norma NTON bloques de concreto Nicaragua y ASTM C90 es de tamaño estándar de 40 x 20 x20 cm; teniendo así un volumen de 0.016m³.

Basado en cálculos realizados anteriormente se sabe que el caudal de la solución es de 2200kg/h y la densidad es 1600kg/m³ calculando así el volumen de producción:

$$V = \frac{Q}{\rho}$$

Teniendo un volumen de 1.375m³/h lo que nos funciona para determinar cuántos bloques se logra fabricar por hora según:

$$n = \frac{V_{producción}}{V_{bloque}}$$

Produciendo así 86 bloques por hora; basado en variaciones en los procesos anteriores el rango de producción sería en rango de 70 – 80 bloques por hora considerando pérdidas, compactación y la eficiencia de la operación.

La mezcla que es material granular húmedo no fluido se coloca en moldes normalizados de acero, y se compacta mediante vibro compresión, combinando vibración y presión mecánica para lograr una alta densidad y resistencia reduciendo vacíos, mejorando la compactación y aumentando la resistencia.

La vibración se aplica desde la base o el molde con frecuencias típicas de 3000 – 6000 rpm con el objetivo de reacomodar partículas, eliminar aire atrapado y mejorar el empaquetamiento; además a su vez se aplica presión mediante un pistón o prensa con presión de 2 – 5 MPa; es importante que estos procesos se realicen de forma simultánea ya que producen una mayor densidad, mejor cohesión y una menor porosidad. Ver tabla 7 Parámetros operativos de moldeo de geopolímeros en la sección de anexos 11.1.

Para la evaluación de la resistencia a compresión, la literatura recomienda el uso de moldes cúbicos de 50 × 50 × 50 mm conforme a la norma ASTM C109/C109M, empleada en la caracterización de morteros cementantes y geopoliméricos en estudios experimentales.

Para el desmoldeo se retira el molde inmediatamente manteniendo el bloque su forma; para esto es necesario que la mezcla sea semiseca con suficiente cohesión porque así no pierde su forma que ocurre al estar muy húmeda ni tampoco pierde compactación que ocurre si está muy seca.

El tiempo de moldeo se estableció en un rango de 10 a 30 segundos, de acuerdo con prácticas industriales de vibro compresión en la fabricación de bloques, donde la compactación ocurre rápidamente y tiempos mayores no generan mejoras significativas en la densidad del material (Neville, 2011; PCA).

e. Cámara de curado

El curado de los bloques geopoliméricos se realiza en cámara térmica controlada a temperaturas entre 60 y 70 °C y humedad relativa superior a 80% durante 48 horas condición que favorece la reacción de geopolimerización y el desarrollo de resistencia mecánica.

Es un proceso termoquímico donde ocurre la polimerización aluminosilicática teniendo como reacción principal.



El curado se divide en tres etapas entre ellas se destaca; el endurecimiento inicial comprende el rango inicial 0 – 26 horas y apoya a la formación de enlaces y

ganancia rápida de resistencia; la polimerización que abarca el rango de 1 – 7 días donde se da el desarrollo estructural e incrementa la resistencia y la maduración que es posterior a los 7 días donde se logra la estabilización del material.

Existen diversos tipos de curados que son abordados en las diferentes fuentes bibliográficas abordadas; curado termino, el más recomendado, donde aumenta la velocidad de la reacción y mejora la resistencia y el curado ambiente el cual es un proceso más lento y se obtiene menor resistencia inicial.

Los parámetros claves para este proceso acorde a revisión bibliográfica son la temperatura, humedad, tiempo y la ventilación; ver Tabla 8 Parámetros de curado de geopolímeros en sección de Anexos 11.1.

El factor más importante en el proceso de curado es la temperatura ya que en base a esto aumenta la velocidad de la reacción y mejora la formación del gel N-A-S-H; el rango optimo de temperatura es de 60 – 70°C, ya que si se trabaja con temperaturas inferiores a 30°C es una reacción más lenta y al trabajarlo a temperatura de 90°C o mayor se puede presentar fisuras.

Otro de los factores relevantes a controlar en este proceso es la humedad, que evita la evaporación del agua y las fisuras por contracción, las condiciones óptimas son del 80 – 95% HR.

Las cámaras de curado deben ser ambientes cerrados tipo horno húmedo, con sistema de calefacción, generador de vapor/humidificador, sensores de temperatura y humedad y bandejas o rack; debe tener un flujo de aire uniforme para poder evitar gradientes térmicos.

Basado en los datos obtenidos con anterioridad se sabe que la producción basada en las condiciones estipuladas es de 80 bloques/hora; considerando una jornada de 8 horas la producción equivalente a 640 bloques/días; si el proceso de curado es de 48 horas la producción total es de 1280 bloques.

Cada bloque tiene volumen de 0.016m³ el volumen requerido de la cámara de curado es de 20,48m³ teniendo así un rango de 20 – 25 m³.

Si el proceso de curado no es controlado se tendrá una baja resistencia, fisuración en los geopolímeros, reacciones incompletas y alta porosidad.

El proceso de curado acorde a literaturas consultadas induce una pérdida de masa controlada entre 8 y 15%, asociada a la eliminación de agua libre y al desarrollo de la estructura aluminosilicatada, lo cual es fundamental para alcanzar propiedades mecánicas óptimas.

La potencia térmica requerida para el cálculo del balance térmico es:

$$Q_{total} = Q_{calentamiento} + Q_{perdidas}$$

Teniendo los datos de volumen de la cámara de 20m³; considerando la temperatura de operación es de 65°C y la temperatura ambiente de 25°C; teniendo así $\Delta T=40K$; y la capacidad de la cámara es de 1280 bloques.

Para ello es necesario el cálculo de la masa por bloque:

$$m_{bloque} = V_{bloque} \times \rho_{bloque}$$

Sabiendo que el volumen de cada bloque es de 0.016m³ y la densidad de la mezcla es 1600kg/m³ la masa por bloque es de 25.6kg; teniendo así una masa total de 32,768kg.

El calentamiento de bloques se calcula por el calor sensible se calcula con la siguiente formula:

$$Q = mc_p \Delta T$$

Donde:

Cp: es el calor específico (kJ/kg.K)

Que para geopolímeros húmedos es de 0.88kJ/kg.K; teniendo así el calentamiento de bloque de 1,153,792 kJ; convirtiendo a kWh es de 320kWh. La potencia para las 48horas se obtiene de la división del calentamiento del bloque entre el tiempo; teniendo potencia de 6.7kW.

Además, es de relevancia las pérdidas térmicas ocasionadas por fugas de aire, aperturas de la cámara y las fugas por las paredes; típicamente rango de pérdida es del +30% al +50%. Tomamos el 40%; teniendo potencia real de 9.4kW; teniendo así que el rango de la potencia térmica requerida es 9 – 10kW; dicha potencia cubre el calentamiento inicial de la masa, mantiene la temperatura a 65°C, la compensación por pérdidas y la estabilidad térmica.

La calefacción recomendada son resistencias eléctricas de 10kW o generadores de vapor equivalentes; distribuidos en flujo de aire forzado, recirculación interna y uniformidad de ± 2 °C.

Este balance asume que se trata un sistema cerrado, las temperaturas son uniformes y la mezcla térmica homogénea sin incluir el calor de reacción, ya que es pequeña a esta escala.

7.2.3. Operaciones unitarias necesarias para la elaboración del geopolímero a base de CCA

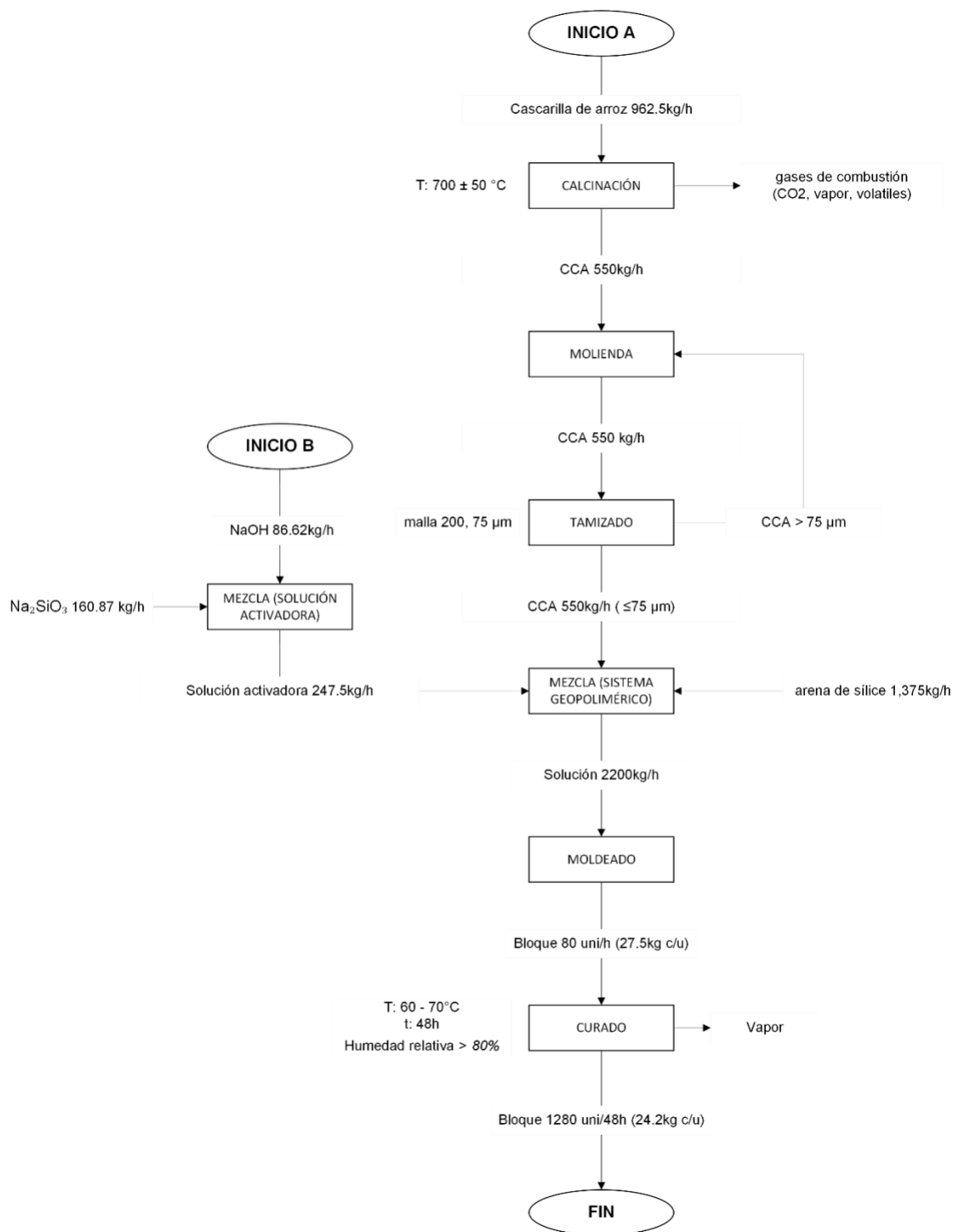


Ilustración 1: Diagrama de flujo de producción de geopolímeros

La producción de un geopolímero a partir de CCA puede describirse como una secuencia de operaciones unitarias térmicas, mecánicas y fisicoquímicas que involucran transferencia de calor, transferencia de masa y reacción química en un sistema heterogéneo sólido-líquido. Aunque el presente trabajo es de carácter bibliográfico, la literatura permite estructurar el proceso.

La primera etapa es una operación térmica de transformación mediante calcinación controlada. En esta fase ocurre la eliminación de materia orgánica y la formación de sílice. El control de temperatura es determinante, ya que temperaturas elevadas favorecen la cristalización hacia fases más estables y menos reactivas, reduciendo la fracción amorfa disponible para la activación alcalina. Por tanto, esta etapa condiciona directamente la reactividad del precursor.

Posteriormente se realiza la reducción de tamaño, operación mecánica que incrementa el área superficial específica del sólido. En sistemas heterogéneos, la velocidad de reacción depende del área superficial sólido-líquido, por ello, partículas más finas disminuyen las limitaciones por difusión y favorecen la disolución en medio alcalino.

La etapa siguiente corresponde a la mezcla sólido-líquido con reacción simultánea. A diferencia del cemento Portland, la reacción geoplímica inicia inmediatamente al contacto con el activador alcalino. El proceso comprende la disolución de especies silicatadas y la posterior policondensación, que da lugar a una red tridimensional aluminosilicatada. La eficiencia de esta etapa depende de la adecuada dispersión del activador y de la movilidad iónica en el sistema.

El moldeado y compactación constituyen una operación mecánica destinada a reducir aire atrapado y porosidad inicial, factores que influyen directamente en la resistencia mecánica final del material ya que asegura el contacto íntimo entre el activador alcalino y las partículas de CCA.

Finalmente, el curado térmico acelera la policondensación y estabiliza la microestructura formada. El incremento moderado de temperatura favorece la

movilidad iónica y la reorganización estructural del gel, permitiendo el desarrollo progresivo de resistencia.

En conjunto, el proceso puede clasificarse como un sistema heterogéneo sólido-líquido en el que cada operación unitaria influye en la microestructura y en las propiedades finales del geopolímero.

El consumo energético del proceso se concentra principalmente las etapas de molienda (6 – 8 kW) y curado térmico (9 - 10 kW) , lo que sugiere un requerimiento total estimado en el orden de 15 – 20 kW para operación continua. Este nivel de consumo es comparable con procesos industriales de transformación de materiales cementantes, lo que indica una viabilidad energética preliminar.

Para el análisis de proceso, se estableció un balance global de materia basado en la producción de un bloque geopolimérico; considerando una masa aproximada de 4kg por unidad, distribuida en un 75% de CCA (3kg); 20% de activador alcalino (0.8kg) y 5% agua (0.2kg).

El balance global se expresa como:

$$\textit{Entrada total} = \textit{Salida total}$$

Durante el proceso no se consideran pérdidas significativas de masa, excepto evaporación parcial de agua durante el curado, lo cual no afecta de forma relevante la masa final del producto.

Desde el punto de vista de proceso el sistema puede considerarse como un sistema cerrado en términos sólidos; además de un sistema abierto para transferencia de calor y vapor.

Este sistema evidencia la estabilidad del proceso y la eficiencia en el aprovechamiento de materias primas.

7.3. Comparación de la resistencia mecánica del geopolímero contra un mortero Portland

Tabla 1: Análisis comparativo de propiedades de resistencia en morteros.

Parámetros	Cemento Portland	Geopolímero a base de CCA	Análisis
Resistencia en tiempo de curado	25 - 40 Mpa a 28 días	20 - 50 Mpa a 28 días	Ambos materiales presentan resistencias comparables. El geopolímero puede alcanzar valores superiores, lo que evidencia mayor potencial mecánico según su formulación
Perdida de resistencia a altas temperaturas	40 - 60% de resistencia a 600°C	Inferior a 25% a 600°C	El geopolímero muestra mayor estabilidad térmica, con menor degradación estructural a altas temperaturas.
Pérdida de masa frente agentes químicos agresivos	20 - 50%	Inferior al 15%	El geopolímero presenta mejor resistencia química, lo que sugiere mayor durabilidad en ambientes agresivos.

La resistencia mecánica constituye el principal parámetro de desempeño estructural en materiales cementantes. En este capítulo se presenta una comparación entre geopolímeros elaborados a partir de CCA y morteros convencionales elaborados a partir de cemento Portland, tomando como referencia ensayos de resistencia a la compresión reportados en literatura.

De las principales diferencias entre la producción de geopolímeros y los morteros de cemento Portland a parte de las materias primas utilizadas tenemos la fase ligante, para la fabricación de geopolímeros se tiene fase ligante N-A-S-H y en el

caso de morteros de cemento Portland son C-S-H y la activación de estos sistemas al tratarse de geopolímeros se da por activación alcalina y de cemento la hidratación.

Tabla 2: Comparación entre estructura química de geopolímeros y morteros de cemento Portland.

Aspecto	Cemento Portland	Geopolímero a base de CCA	Análisis
Tipo de gel	C-S-H (silicato de calcio hidratado)	N-A-S-H (silicoaluminato de sodio hidratado)	Ambos son responsables de la resistencia, pero difieren en composición química y estructura.
Composición química	Rica en calcio (Ca)	Rica en sílice (Si) y aluminio (Al), bajo contenido de calcio	La baja presencia de calcio en geopolímeros mejora su estabilidad química.
Estructura	Amorfa a semicristalina	Red amorfa tridimensional más polimerizada	El N-A-S-H forma una estructura más estable y menos permeable.
Mecanismo de formación	Hidratación del cemento	Policondensación por activación alcalina	Diferencia clave en la generación de la fase ligante.

La resistencia a la compresión es el parámetro mecánico más utilizado para evaluar el desempeño estructural de materiales cementantes. En morteros elaborados con cemento Portland, el ensayo de resistencia a compresión se realiza comúnmente conforme a la norma ASTM C109/C109M de ASTM International (2022), utilizando cubos de 50 mm. Para morteros convencionales con relaciones agua/cemento típicas (0.45–0.60), la literatura reporta resistencias a 28 días comprendidas generalmente entre 25 y 40 MPa (Neville, 2011; Mehta & Monteiro, 2014).

El desarrollo de resistencia en el mortero Portland está asociado al proceso de hidratación de las fases del clínker, que conduce a la formación del gel C-S-H como principal responsable del endurecimiento (Mehta & Monteiro, 2014). Este proceso es progresivo y dependiente del tiempo de curado, alcanzando una fracción significativa de la resistencia final a los 28 días (Neville, 2011).

En contraste, los geopolímeros presentan un mecanismo de endurecimiento distinto, basado en la activación alcalina de materiales aluminosilicatados y la formación de una red tridimensional de tipo N-A-S-H (Davidovits, 2015; Provis & van Deventer, 2014). Según Davidovits (2015), los geopolímeros pueden desarrollar resistencias a compresión comparables o superiores a las del cemento Portland convencional, dependiendo de la formulación y del régimen de curado.

En el caso específico de materiales derivados de CCA, la alta concentración de sílice amorfa favorece su reactividad en medios alcalinos (Mehta, 1992; Rodríguez et al., 1992). Estudios sobre CCA utilizada como material cementante suplementario han reportado mejoras en resistencia mecánica cuando se controla adecuadamente la finura y el contenido reactivo (Sensale, 2006; Hwang & Chandra, 1997).

Cuando la CCA se emplea como precursor principal en sistemas activados alcalinamente, se han reportado resistencias a compresión en el orden de 20 a 50 MPa a 28 días en curados a temperatura ambiente y a 2 días en curados en ambientes controlados, dependiendo de la pureza de la sílice, el grado de molienda y el régimen de curado (Mejía et al., 2012; Sinclair López & Pacheco Sánchez, 2016). Estos valores se ubican dentro del intervalo típico de los morteros Portland convencionales y, en formulaciones optimizadas, pueden superarlo.

Al comparar los rangos reportados en la literatura (25–40 MPa para mortero Portland convencional frente a 20–50 MPa para sistemas geopoliméricos basados en CCA), se observa que ambos materiales presentan desempeños mecánicos superpuestos en condiciones estándar de curado. Asimismo, formulaciones geopoliméricas optimizadas pueden alcanzar valores cercanos o superiores a 50 MPa, lo que evidencia una competitividad estructural desde el punto de vista mecánico.

Además del comportamiento estructural, la literatura reporta diferencias cuantificables en el desempeño térmico, químico y ambiental entre morteros Portland y sistemas geopoliméricos basados en CCA.

En cuanto a estabilidad térmica, los morteros Portland pueden perder entre 40 y 60 % de su resistencia a compresión cuando se exponen a temperaturas cercanas a 600 °C, y hasta 70–80 % a 800 °C, debido a la deshidratación del gel C-S-H y la descomposición del Ca(OH)_2 (Mehta & Monteiro, 2014). En contraste, geopolímeros activados alcalinamente han mostrado pérdidas de resistencia inferiores al 25 % a 600 °C, conservando en algunos casos hasta 70–90 % de su resistencia original, atribuible a la estabilidad termoquímica de la red N-A-S-H (Davidovits, 2015; Provis & van Deventer, 2014).

Respecto al comportamiento ante agentes químicos agresivos, los morteros Portland expuestos a ambientes ácidos pueden presentar pérdidas de masa entre 20 y 50 % debido a la disolución de compuestos cálcicos y formación de productos expansivos. Por su parte, matrices geopoliméricas con bajo contenido de calcio han mostrado pérdidas de masa típicamente inferiores al 15 % bajo condiciones similares, evidenciando mayor estabilidad frente a agentes agresivos (Davidovits, 2015).

Desde el punto de vista ambiental, la producción de una tonelada de cemento Portland genera aproximadamente 950 kg de CO_2 , representando cerca del 8 % de las emisiones globales asociadas a procesos industriales. En contraste, sistemas geopoliméricos pueden reducir estas emisiones entre 40 y 80 %, dependiendo del tipo de activador empleado, al eliminar la etapa de clínker y operar a menores temperaturas de procesamiento (Davidovits, 2015; Provis & van Deventer, 2014).

Si bien esta investigación no contempló ensayos experimentales, la revisión de la literatura permite validar la CCA como precursor técnicamente factible para la síntesis de geopolímeros aplicables al sector constructivo.

VIII. CONCLUSIONES

A partir del análisis documental realizado, se determinó que la ceniza de cascarilla de arroz (CCA) constituye un precursor técnicamente viable para la síntesis de geopolímeros, debido a su elevado contenido de sílice y a su capacidad de desarrollar una fracción amorfa altamente reactiva bajo condiciones controladas de combustión. Estas características permiten su aprovechamiento como material alternativo en la producción de matrices cementantes sostenibles.

Mediante el análisis de las propiedades fisicoquímicas de la ceniza de cascarilla de arroz (*Oryza sativa*), se estableció que este material presenta condiciones favorables para su uso como precursor geopolimérico. Se identificó un contenido de dióxido de silicio (SiO_2) en el rango de 80 % a 95 %, con una fracción amorfa superior al 85 % cuando la combustión se realiza a temperaturas de 700 ± 50 °C durante 1 a 2 horas. Asimismo, se determinaron propiedades físicas relevantes como área superficial específica entre 40 y 100 m^2/g , tamaño de partícula menor a 75 μm , contenido de humedad inferior al 5 % y pérdida por ignición menor o igual al 6 %. Estos parámetros evidencian una alta reactividad en medios alcalinos, lo que valida su idoneidad como material precursor en sistemas geopoliméricos.

En cuanto a la definición de materias primas y parámetros de operación, se estableció una formulación óptima compuesta por 75 % de CCA, 20 % de solución activadora y 5 % de agua, con una relación sólido/líquido entre 0.40 y 0.45. La solución activadora fue definida con una concentración de hidróxido de sodio de 10 ± 2 M y una relación en masa $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ entre 1.5 y 2.5, manteniendo una relación molar Si/Al en el rango de 2 a 3. Estas condiciones favorecen la formación de una matriz aluminosilicatada estable, permitiendo el adecuado desarrollo de la reacción de geopolimerización.

Desde el punto de vista del diseño del proceso, se establecieron las operaciones unitarias de molienda, tamizado, mezclado, moldeo y curado térmico, las cuales inciden en la calidad del producto final. La molienda, con una energía específica de 9.8 kWh/ton y potencia de 6 a 8 kW, permite reducir el tamaño de partícula a valores menores a 75 μm , incrementando la superficie de reacción. Posteriormente, el

tamizado mediante malla de 75 μm garantiza una distribución granulométrica homogénea, mejorando la reproducibilidad del sistema. La operación de mezclado, realizada mediante un sistema de paletas, asegura la adecuada dispersión del activador alcalino, promoviendo una mezcla homogénea y evitando segregaciones, lo que resulta fundamental para la uniformidad de la reacción.

El proceso de curado térmico se estableció a temperaturas entre 60 y 70 $^{\circ}\text{C}$, con humedad relativa superior al 80 % y un tiempo de 48 horas, registrándose una pérdida de masa entre 8 % y 15 %, asociada a la eliminación de agua libre y al desarrollo de la estructura geopolimérica. En conjunto, el proceso propuesto evidencia coherencia técnica, integrando adecuadamente variables operativas y principios de transferencia de masa, energía y reacción química, lo que respalda su viabilidad desde el punto de vista ingenieril.

En relación con el desempeño mecánico, se determinó que los geopolímeros a base de CCA presentan resistencias a la compresión entre 20 y 50 MPa a los 28 días, valores comparables e incluso superiores a los del mortero Portland convencional, que oscilan entre 25 y 40 MPa. Adicionalmente, el geopolímero mostró una pérdida de resistencia inferior al 25 % a 600 $^{\circ}\text{C}$, en comparación con el 40 % a 60 % del cemento Portland, evidenciando mayor estabilidad térmica. En términos de resistencia química, la pérdida de masa fue inferior al 15 %, frente a valores de 20 % a 50 % en morteros convencionales.

De manera general, el diseño conceptual desarrollado demuestra que la ceniza de cascarilla de arroz constituye una materia prima viable para la producción de geopolímeros, cumpliendo con los requerimientos técnicos establecidos. El proceso presenta condiciones operativas definidas y un consumo energético estimado entre 15 y 20 kW, lo que sugiere viabilidad técnica preliminar como alternativa sostenible al cemento Portland. No obstante, se recomienda la validación experimental para optimizar el proceso y evaluar su aplicación a escala industrial.

IX. RECOMENDACIONES

9.1. Profundizar en ensayos experimentales

Se sugiere desarrollar una fase experimental que permita validar empíricamente los parámetros de formulación identificados en la revisión documental, con énfasis en la determinación de la reactividad puzolánica, la cinética de activación alcalina y el comportamiento mecánico bajo condiciones controladas de laboratorio.

9.2. Evaluar la influencia de la variabilidad del precursor

Dado que la composición de la ceniza de cascarilla de arroz depende del método de combustión y de las características agrícolas del cultivo, es recomendable caracterizar distintos lotes de CCA para analizar cómo la variación en la finura, el contenido de sílice amorfa y la presencia de impurezas afecta la eficiencia del proceso geopolimérico.

9.3. Realizar estudios de durabilidad a largo plazo

Para determinar la viabilidad del material en aplicaciones estructurales, es pertinente investigar su desempeño frente a ciclos de humedad-sequedad, exposición a sulfatos, carbonatación acelerada y resistencia a altas temperaturas. Esto permitirá establecer comparaciones más precisas con los materiales cementantes tradicionales.

9.4. Modelar el proceso productivo a escala piloto

Se aconseja desarrollar simulaciones de flujo y balances de masa y energía para prever el comportamiento del proceso en condiciones industriales. Esto facilitará la identificación de cuellos de botella, requerimientos energéticos y oportunidades de optimización tecnológica.

9.5. Realizar análisis de sostenibilidad y viabilidad económica

Además del desempeño técnico, resulta necesario evaluar el impacto ambiental mediante metodologías como Análisis de Ciclo de Vida (ACV) y calcular los costos asociados al proceso de activación y producción. Estos estudios permitirán determinar la competitividad del geopolímero frente a los materiales convencionales.

9.6. Explorar aplicaciones constructivas específicas

Se recomienda investigar su aptitud en elementos tales como morteros de reparación, prefabricados no estructurales o componentes expuestos a ambientes agresivos, donde las propiedades intrínsecas del geopolímero podrían ofrecer ventajas significativas.

X. REFERENCIAS

ASTM International. (2022). *ASTM C618/C618M-22: Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete*. ASTM International.

ASTM International. (2022). *ASTM C109/C109M-21: Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (using 2-in. or [50-mm] cube specimens)*. ASTM International.

ASTM International. (2022). *ASTM C618/C618M-22: Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete*. ASTM International.

Behak, E., & Pérez Núñez, M. (2008). *Caracterización de suelo arenoso con ceniza de cáscara de arroz y cal*.

Davidovits, J. (2015). *Geopolymer chemistry and applications* (4th ed.). Institut Géopolymère.

Duxson, P., Fernández-Jiménez, A., Provis, J. L., Lukey, G. C., Palomo, A., & van Deventer, J. S. J. (2007). Geopolymer technology: The current state of the art. *Journal of Materials Science*, 42(9), 2917–2933.

Hardjito, D., & Rangan, B. V. (2005). *Development of fly ash-based geopolymer concrete*. Curtin University of Technology.

Hwang, C. L., & Chandra, S. (1997). The use of rice husk ash in concrete. En S. Chandra (Ed.), *Waste materials used in concrete manufacturing* (pp. 184–234). William Andrew Publishing.

Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S. (2011). *Fundamentals of heat and mass transfer* (7th ed.). John Wiley & Sons.

McCabe, W. L., Smith, J. C., & Harriott, P. (2005). *Unit operations of chemical engineering* (7th ed.). McGraw-Hill.

Mehta, P. K. (1992). Rice husk ash—A unique supplementary cementing material. *Advances in Concrete Technology*, 1, 407–430.

Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). *Concrete: Microstructure, properties, and materials* (4th ed.). McGraw-Hill Education.

Mejía, J., Mejía de Gutiérrez, R., & Puertas, F. (2012). *Producción de materiales cementicios utilizando silicato de sodio y subproductos industriales y agroindustriales*.

Ministerio Agropecuario (MAG). (2022). *Producción nacional de arroz en Nicaragua*.

Neville, A. M. (2011). *Properties of concrete* (5th ed.). Pearson Education Limited.

Oldshue, J. Y. (1983). *Fluid mixing technology*. McGraw-Hill.

Paul, E. L., Atiemo-Obeng, V. A., & Kresta, S. M. (2004). *Handbook of industrial mixing: Science and practice*. John Wiley & Sons.

Perry, R. H., & Green, D. W. (2008). *Perry's chemical engineers' handbook* (8th ed.). McGraw-Hill.

Portland Cement Association. (2008). *Concrete masonry handbook*. Portland Cement Association.

Provis, J. L., & van Deventer, J. S. J. (2014). *Alkali-activated materials: State-of-the-art report, RILEM TC 224-AAM*. Springer.

Rodríguez, J. E., Ramírez, S. M., & Gómez, L. F. (1992). Caracterización química y mineralógica de la ceniza de cascarilla de arroz. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, 12(2), 45–52.

Sensale, G. R. (2006). Strength development of concrete with rice-husk ash. *Cement and Concrete Composites*, 28(2), 158–160.

Sinclair López, J., & Pacheco Sánchez, J. (2016). *Evaluación del efecto de la sustitución de la ceniza de cáscara de arroz en morteros activados alcalinamente*.

XI. ANEXOS

11.1. Tablas

Tabla 3: Composición química de la ceniza de cascarilla de arroz

Componente químico	Fórmula química	Porcentaje (%)
Dióxido de silicio	SiO ₂	94.10
Óxido de calcio	CaO	0.55
Óxido de magnesio	MgO	0.95
Óxido de potasio	K ₂ O	2.10
Óxido de sodio	Na ₂ O	0.11
Sulfato	SO ₃	0.06
Cloro	Cl	0.05
Óxido de titanio	TiO ₂	0.05
Óxido de aluminio	Al ₂ O ₃	0.12
Otros componentes (P ₂ O ₅ , Fe ₂ O ₃)	—	1.82

Tabla 4: Tiempos de mezclado según tipo de sistema

Tipo de sistema	Tiempo
Sólidos secos	2 – 5 minutos
Sólidos + Líquidos	3 – 10 minutos
Pastas viscosas	5 – 15 minutos

Fuente: Handbook of Industrial Mixing. Wiley (2004) Paul, E.L. , Atiemo – Obeng, V. A., & Kresta, S. M.

Tabla 5: Factor de llenado de mezcladores según tipo de sistema

Tipo de sistema	Factor de llenado
Sólidos secos	40 – 60%
Sólidos + Líquidos	50 – 70%
Pastas viscosas	60 – 80%

Fuente: Handbook of Industrial Mixing. Wiley (2004) Paul, E.L. , Atiemo – Obeng, V. A., & Kresta, S. M.

Tabla 6: Potencia específica de mezclado según tipo de sistema

Tipo de sistema	P_v (kW/m³)
Sólidos secos	2 – 5
Sólidos + líquidos	5 – 10
Pastas viscosas	10 - 20

Fuente: Handbook of Industrial Mixing. Wiley (2004) Paul, E.L. , Atiemo – Obeng, V. A., & Kresta, S. M.

Tabla 7: Parámetros operativos de moldeo de geopolímeros

Parámetros	Rango típico
Frecuencia	3000 – 6000 rpm
Presión	2 – 5 MPa
Tiempo	10 – 30 s
Humedad	Baja (Mezcla semiseca)

Fuente: Handbook of Industrial Mixing. Wiley (2004) Paul, E.L. , Atiemo – Obeng, V. A., & Kresta, S. M.

Tabla 8: Parámetros de curado de geopolímeros

Parametros	Rango recomendado
Temperatura	40 – 80 °C
Humedad relativa	>80%
Tiempo	24 – 72 horas
Ventilación	Controlada

Fuente: Geopolymer chemistry and applications Daviddovits, J. (2011). Geopolymer chemistry and applications (3rd ed.). Institut Gépolymère.

Tabla 9: Ficha técnica de molino de bolas

Modelo	Diámetro del cilindro (mm)	Longitud del cilindro (mm)	Modelo de motor	Potencia del motor (kW)	Longitud (mm)	Ancho (mm)	Altura (mm)	Capacidad (t/h)	Volumen efectivo (m3)
MQGg 2230	2200	3000	JR137-8	210	8220	3864	3183	7.5~45	9.8
MQGg 2436	2400	3600	JR138-8	320	9604.5	4836.4	3490	8~100	13.8
MQGg 2442	2400	4200	JR138-8	320	10204.5	4836.4	3490	8~110	16

Fuente: Zhengzhou Hanfa Imp & Exp Trading Co., Ltd.

Tabla 10: Ficha técnica de tamiz vibratorio de alta frecuencia

Modelo de criba oscilante circular	Modelo de motor	Potencia del motor	voltaje	velocidad del motor	Material del equipo	Número de capas
YBS-1200	Y100L1-4	2.2KW	220-480V de alimentación trifásica industrial	1500r/min	Q235/304/316L	1-3 pisos
YBS-1600	Y100L2-4	3.0KW	220-480V industrial three-phase power	1500r/min	Q235/304/316L	1-3 floors
YBS-2000	Y112M-4	4.0KW	220-480V industrial three-phase power	1500r/min	Q235/304/316L	1-3 floors

Fuente: Zhengzhou Hanfa Imp & Exp Trading Co., Ltd.

Tabla 11: Ficha técnica mezclador para solución activadora

Volumen efectivo (L)	Dimensiones del tanque (D*H) (mm)	Altura total (mm)	Potencia del motor (kw)	Velocidad de mezcla (r/min)
500	840*1000	2750	0.75	Según los requisitos del cliente
600	920*1000	2850	0.75	
700	990*1000	2850	0.75	
800	950*1220	3000	0.75	
900	1010*1220	3000	0.75	
1000	1060*1220	3150	1.1	
1500	1160*1500	3350	1.1	
2000	1340*1500	3410	1.5	
3000	1410*2000	4000	2.2	
4000	1620*2000	4250	2.2	
5000	1810*2000	4300	3	
6000	1980*2000	4550	3	
7000	1930*2440	5000	3	
8000	2060*2440	5000	4	
9000	2180*2440	5050	4	

Fuente: Zhengzhou Hanfa Imp & Exp Trading Co., Ltd.

Tabla 12: Ficha técnica mezclador para sistema geopoliméricos

Modelo	500L	1000L	2000L	4000L	6000L	8000L
Volumen / L	500	1000	2000	4000	6000	8000
Potencia del motor / KW	5.5	7.5	15	22	37	45
Velocidad / r/m	41	33	33	27	27	23
Dimensión / m	1.9*0.7*1.4	3*0.8*1.5	3.3*1.4*1.7	3.6*1.4*1.7	3.8*1.7*1.8	4.5*1.8*1.9
Espesor de la placa /mm	4	4	6	8	8	8
Material	Material de contacto SUS 304, otros materiales acero al carbono. SUS201, 316 disponible					

Fuente: Zhengzhou Hanfa Imp & Exp Trading Co., Ltd.

Tabla 13: Ficha técnica de cámara de curado

modelo	Serie HLS-S				
	150 años	225 unidades	408 unidades	800 unidades	1000 segundos
Temperatura.rango	-70°C ~150°C				
Tamaño interior	ancho (mm)	600	700	700	1000
	Altura (mm)	600	700	750	1000
	Diámetro (mm)	460	480	800	800
Tamaño exterior	ancho (mm)	880	980	980	1280
	Altura (mm)	1730	1890	1940	2160
	Diámetro (mm)	1400	1460	1740	1750
Potencia (KW)	5.8	6	7.5	12.8	12.8
Peso (kg)	280	330	450	550	650
Uniformidad de humedad	±3,0% H.R.			±5,0% de humedad relativa	
Tiempo de calentamiento	-70°C ~+100°C, dentro de 60 minutos				
Tiempo de descarga	+20°C ~-70°C, en 80 minutos				
Rango de Humedad	20~98% de humedad relativa				
Temperatura.constancia	±0,5°C				
Constante de humedad	±2,5% H.R.				
Temperatura.uniformidad	±2,0°C				
Dispositivo de seguridad (estándar)	NFB, protección contra sobrepresión, sobrecalentamiento y sobrecorriente para el compresor, sobretemperatura.protección, protección contra sobrecarga del soplador, protección contra calor seco				
Material interior	Placa de Acero Inoxidable (SUS 304)				
Material exterior	Pintura al horno de acero o acero inoxidable (SUS304)				
Material de aislamiento	Espuma rígida de poliuretano y lana de fibra de vidrio				
Temperatura ambiente.	+5°C ~+35°C				
Método de cableado	CA 380±10% 50Hz, trifásico 4 hilos + Tierra				
Controlador	Pantalla táctil LCD, visualización en chino o inglés seleccionable				
	Modelo de operación: Ejecución de programa o punto fijo				
	Capacidad de memoria: 120 programas, 1200 pasos				
	Todos los ciclos se repiten 999 veces, las partes se repiten 99 veces.				

Fuente: Zhengzhou Hanfa Imp & Exp Trading Co., Ltd.

11.2. Imágenes



Ilustración 2: Cascarilla de arroz



Ilustración 3: Ceniza de cascarilla de arroz (CCA)

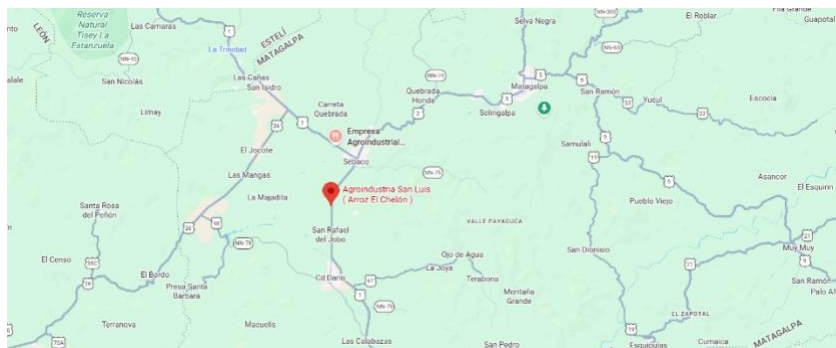


Ilustración 4: Ubicación Agroindustria San Luis



Ilustración 5: Geopolímero a base de CCA

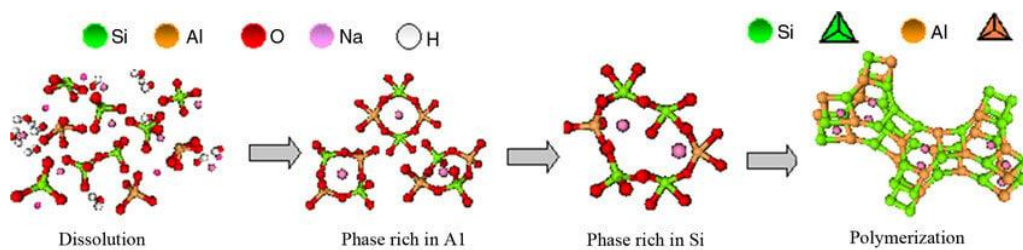


Ilustración 6: Formación de red N-A-S-H



Ilustración 7: Molino de bolas acorde ficha técnica



Ilustración 8: Tamiz vibratorio de alta frecuencia



Ilustración 9: Mezclador para solución activadora



Ilustración 10: Mezclador para sistema geopolimérico



Ilustración 11: Moldes utilizados para producción de bloques



Ilustración 12: Cámara de curado

MATRICULA ORDINARIA CURSO 2026 SEMESTRE 1

CÓDIGO DE ESTUDIANTE	69-F4D7B-5		
NOMBRE	CHAMORRO MARTÍNEZ JOEL ALEXANDER		
ÁREA/CUR	DIRECCIÓN DE ÁREA DE CONOCIMIENTO DE AGRICULTURA		
CARRERA	Ingeniería Química		
TURNO	Diurno	SEXO	M
AÑO MATRICULADO	6	GRUPO	D1FCE-QUI-R
SIT. ESC	REINGRESO	AÑO ING. EDUC. SUP	2017

AÑO	GRUPO	ASIGNATURA
6	D1FCE-QU	FORMAS DE CULMINACION DE ESTUDIOS

**LAS ASIGNATURAS MARCADAS CON (*) SON LLEVADAS POR TERCERA VEZ.
Para Consultar Informe de Calificaciones en <https://singu.setec.edu.ni/>**

□

FECHA: 26/02/2026 04:30:05

**Creado Por: DPEREZ3
Actualizado Por:**

MATRICULA ORDINARIA CURSO 2026 SEMESTRE 1

CÓDIGO DE ESTUDIANTE	6E-F8124-0		
NOMBRE	HERNÁNDEZ TORREZ ASHLEY LEONELA		
ÁREA/CUR	DIRECCIÓN DE ÁREA DE CONOCIMIENTO DE AGRICULTURA		
CARRERA	Ingeniería Química		
TURNO	Diurno	SEXO	F
AÑO MATRICULADO	6	GRUPO	D1FCE-QUI-R
SIT. ESC	REINGRESO	AÑO ING. EDUC. SUP	2019

AÑO	GRUPO	ASIGNATURA
6	D1FCE-QU	FORMAS DE CULMINACION DE ESTUDIOS

**LAS ASIGNATURAS MARCADAS CON (*) SON LLEVADAS POR TERCERA VEZ.
Para Consultar Informe de Calificaciones en <https://singu.setec.edu.ni/>**

□

FECHA: 27/02/2026 04:16:20

**Creado Por: DPEREZ3
Actualizado Por:**

MATRICULA ORDINARIA CURSO 2026 SEMESTRE 1

CÓDIGO DE ESTUDIANTE	6A-686F6-2		
NOMBRE	ORTIZ SERRANO MIRYAM AHTZIRI		
ÁREA/CUR	DIRECCIÓN DE ÁREA DE CONOCIMIENTO DE AGRICULTURA		
CARRERA	Ingeniería Química		
TURNO	Diurno	SEXO	F
AÑO MATRICULADO	6	GRUPO	D1FCE-QUI-R
SIT. ESC	REINGRESO	AÑO ING. EDUC. SUP	2018

AÑO	GRUPO	ASIGNATURA
6	D1FCE-QU	FORMAS DE CULMINACION DE ESTUDIOS

LAS ASIGNATURAS MARCADAS CON (*) SON LLEVADAS POR TERCERA VEZ.
Para Consultar Informe de Calificaciones en <https://singu.setec.edu.ni/>

□

FECHA: 27/02/2026 04:20:49

Creado Por: DPEREZ3
Actualizado Por: