

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Escuela de Posgrado

**MAESTRÍA EN CIENCIAS CON MENCIÓN EN GESTIÓN AMBIENTAL
Y DESARROLLO SOSTENIBLE**

**INFLUENCIA DE LA EFLORESCENCIA EN LA FORMACIÓN
DE MORTEROS BASADOS EN RESIDUOS MINEROS
Y TERMOELÉCTRICOS MEDIANTE
GEOPOLIMERIZACIÓN**

TESIS

PRESENTADA POR:

CARLOS GENARO MORALES ARANIBAR

Para optar el Grado Académico de:

**MAESTRO EN CIENCIAS (*MAGISTER SCIENTIAE*) CON MENCIÓN
EN GESTIÓN AMBIENTAL Y DESARROLLO SOSTENIBLE**

TACNA - PERÚ

2022





UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Escuela de Posgrado

**MAESTRÍA EN CIENCIAS CON MENCIÓN EN GESTIÓN AMBIENTAL Y
DESARROLLO SOSTENIBLE**

**INFLUENCIA DE LA EFLORESCENCIA EN LA FORMACIÓN DE
MORTEROS BASADOS EN RESIDUOS MINEROS Y
TERMOELÉCTRICOS MEDIANTE
GEOPOLIMERIZACIÓN**

Tesis sustentada y aprobada el 20 de diciembre del 2022; estando el jurado calificador integrado por:

PRESIDENTE	:	 Dr. Tolomeo Raúl Soto Pérez
SECRETARIO	:	 Dr. Carlos Huisa Ccori
MIEMBRO	:	 Dr. Nataniel Mario Linares Gutiérrez
ASESOR	:	 Dr. Nataniel Mario Linares Gutiérrez

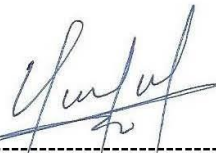
CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo Dr. Nataniel Mario Linares Gutiérrez en mi condición de asesor acreditado por la **RESOLUCION ESCUELA DE POSGRADO N° 11254-2022-ESPG/UNJBG** de la Tesis: **INFLUENCIA DE LA EFLORESCENCIA EN LA FORMACIÓN DE MORTEROS BASADOS EN RESIDUOS MINEROS Y TERMOELÉCTRICOS MEDIANTE GEOPOLIMERIZACIÓN**

Presentada por Bachiller **CARLOS GENARO MORALES ARANÍBAR** para optar el Grado Académico de Maestro en Ciencias (*MAGISTER SCIENTIAE*) con mención en **Gestión Ambiental y Desarrollo Sostenible**.

Habiendo cumplido con lo establecido en el reglamento de originalidad y de similitud de trabajos de investigación y producción intelectual, considerando que según la revisión, evaluación y análisis realizado a través del software de similitud textual **Turnitin** cuenta con el nivel de similitud permitido cuyo porcentaje es 8 %. Por lo que CERTIFICO LA SIMILARIDAD de la tesis está de acuerdo al nivel PERMITIDO, para continuar con los trámites correspondientes y para su publicación en el repositorio Institucional.

Se emite el presente certificado con fines de continuar con los trámites respectivos para su obtención del grado académico de Maestro.



NATANIEL MARIO LINARES GUTIÉRREZ
DNI: 00797389



DEDICATORIA

*A mi madre Purificación Miriam Aranibar Condori,
rosa en el desierto, mujer de acero
cariño sincero.*

*A mis hermanos Joaquín Alberto Morales Aranibar
Luis Fortunato Morales Aranibar
Isabel Morales Aranibar.*

AGRADECIMIENTOS

*Agradecimiento especial mi madre y mis hermanos
por su apoyo incondicional.*

*Agradecimiento al Dr. Nataniel Linares Gutiérrez
por enseñanzas y consejos.*

CONTENIDO

DEDICATORIA	IV
AGRADECIMIENTO	V
RESUMEN	XIV
ABSTRACT	XV
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	2
1.1. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA.....	2
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	2
1.2.1. El problema principal	3
1.2.2. Problemas secundarioS.....	4
1.3. JUSTIFICACIÓN EN IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN.....	4
1.3.1. Justificación social.....	4
1.3.2. Justificación económica.....	5
1.3.3. Justificación técnica-ambiental	5
1.3.4. Justificación académica.....	6
1.3.5. Importancia de la investigación	6
1.4. OBJETIVOS.....	7
1.4.1. Objetivo general	7
1.4.2. Objetivos específicos.....	7
1.5. HIPÓTESIS.....	7
1.5.1. Hipótesis general.....	7
1.5.2. Hipótesis específicas	7
1.6. VARIABLES	8
1.6.1. Identificación de las variables.....	8
1.6.2. Caracterización (o definición conceptual) de las variables	8
1.6.3. Definición operacional de las variables	9
1.6.4. Operacionalización de las variables	10
1.7. LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN	10

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	11
2.1. ANTECEDENTES DEL ESTUDIO.....	11
2.2. BASES TEÓRICAS	19
2.2.1. Geopolímeros	19
2.2.2. Proceso de geopolimerización.....	20
2.2.3. Variables que participan en la síntesis de geopolímeros.....	21
2.2.4. Eflorescencia en materiales tradicionales.....	24
2.2.5 Eflorescencia en los geopolímeros	27
2.2.6 Seguridad minera	27
2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS.....	28
2.4. MARCO LEGAL	30
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	32
3.1. TIPO Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN	32
3.2. POBLACIÓN Y MUESTRA DE ESTUDIO	32
3.3. METODOLOGÍA	32
3.3.1. Caracterización física de los relaves y ceniza volante.....	33
3.3.2. Caracterización granulométrica	33
3.3.3. Caracterización de la gravedad específica.	33
3.3.4. Caracterización de la humedad	33
3.3.5. Caracterización mediante análisis EDAX	33
3.3.6. Caracterización mediante análisis TCLP	33
3.3.7. Caracterización mediante DRX	34
3.3.8. Caracterización morfológica mediante microscopia (MEB)	34
3.3.9. Elaboración de los morteros	34
3.3.10. Relaciones molares para $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3\text{-NAO}/\text{SiO}_2\text{-NAO}/\text{Al}_2\text{O}_3$	34
3.3.11. Ensayo de resistencia a la compresión	34
3.3.12. Pesado de la eflorescencia	34
3.3.13. Caracterización de la densidad	35
3.3.14. Caracterización de la humedad.....	35
3.3.15. Caracterización organoléptica	35
3.3.16. Caracterización mediante análisis TCLP.....	35

3.3.17. Caracterización morfológica mediante microscopio electrónico de barrido (MEB)	35
3.3.18. Caracterización mediante DRX	35
3.3.19. Ensayos mecánicos y caracterización del geopolímero	35
3.4. MATERIALES E INSTRUMENTOS.....	36
3.5. TRATAMIENTO DE DATOS	37
CAPÍTULO IV: RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN	39
4.1. RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN DE LOS RELAVES	39
4.2. RESULTADOS DE LA HUMEDAD EN RELAVES MINEROS Y CENIZAS VOLANTES	39
4.3. RESULTADOS DEL ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE LOS RELAVES MINEROS Y CENIZAS VOLANTES.....	40
4.4. RESULTADOS DEL ANÁLISIS EDAX PARA RELAVES Y CENIZAS VOLANTES	41
4.5. RESULTADOS MICROSCOPIA (MEB).....	41
4.6. ANÁLISIS DE DIFRACTÓMETRO DE RAYOS X (XRD).....	43
4.7 RESULTADOS RELACIONES MOLARES PARA $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3\text{-NAO/SiO}_2$..	45
4.8. ENSAYOS DE RESISTENCIA MECÁNICA DEL GEOPOLÍMERO FORMADO	45
4.9. RESULTADOS ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA COMPARACIÓN DE LAS MUESTRAS PARA LOS PESOS DE EFLORESCENCIA	50
4.10. RESULTADOS ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA COMPARACIÓN DE LAS MUESTRAS PARA LA RESISTENCIA DEL GEOPOLÍMERO	54
4.11. COMPARACIÓN DE LÍNEAS DE REGRESIÓN RESISTENCIA – EFLORESCENCIA (R-10 M-35D vs. PE 10 M 35D).....	57
4.12. RESULTADOS ANÁLISIS TCLP	59
CAPÍTULO V: DISCUSIÓN.....	60
CONCLUSIONES	62
RECOMENDACIONES	63
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64

ANEXOS 75

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES	9
TABLA 2. DEFINICIÓN OPERACIONAL DE LAS VARIABLES	9
TABLA 3. PROPIEDADES FÍSICAS INICIALES EN LOS RELAVES MINEROS	39
TABLA 4. RESULTADOS DE LA HUMEDAD EN RELAVES MINEROS Y CENIZAS VOLANTES.....	39
TABLA 5. RESULTADOS DEL ANÁLISIS EDAX PARA RELAVES Y CENIZAS VOLANTES.....	41
TABLA 6. RESULTADOS DEL ANÁLISIS (XRD) PARA RELAVES MINEROS, CENIZAS VOLANTES Y EFLORESCENCIAS.....	43
TABLA 7. RESULTADOS RELACIONES MOLARES PARA $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ - NaO/SiO_2 - $\text{NaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$	44
TABLA 8. MEZCLAS FORMULADAS ENTRE RELAVE, CENIZA VOLANTE Y METACAOLÍN.....	46
TABLA 9. RESISTENCIA MECÁNICA DEL GEOPOLÍMERO FORMADO EN MORTEROS A LOS 28 Y 35 DÍAS DE CURADO / PRESENCIA DE EFLORESCENCIA.	50
TABLA 10. RESUMEN ESTADÍSTICO PE.....	51
TABLA 11. ANOVA PARA PE	51
TABLA 12. MEDIAS CON INTERVALOS DE CONFIANZA DEL 95.0 %	52
TABLA 13. PRUEBA DE KRUSKAL-WALLIS	53
TABLA 14. RESUMEN ESTADÍSTICO	54
TABLA 15. ANOVA PARA LA RESISTENCIA DEL GEOPOLÍMERO.....	54

TABLA 16. TABLA DE MEDIAS CON INTERVALOS DE CONFIANZA DEL 95,0 %	55
TABLA 17. PRUEBA DE KRUSKAL-WALLIS	56
TABLA 18. ANÁLISIS DE REGRESIÓN MÚLTIPLE	57
TABLA 19. ANÁLISIS DE VARIANZA	57

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. PROCESO GENERAL DE GEOPOLIMERIZACIÓN,.....	20
FIGURA 2. ESQUEMA DEL PROCESO DE FORMACIÓN DE EFLORESCENCIA.....	25
FIGURA 3. IMPLEMENTOS DE SEGURIDAD PARA EL MUESTREO Y ACARREO DEL RELAVE.	27
FIGURA 4. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE RELAVES MINEROS.....	40
FIGURA 5. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO PARA CENIZAS VOLANTES....	40
FIGURA 6. CENIZAS VOLANTES A 100 X Y 1500 X	42
FIGURA 7. RELAVE MINERO A 100 X Y 1500 X.....	42
FIGURA 8. DIFRACTOGRAMA CORRESPONDIENTE A LAS FASES MINERALÓGICAS PRESENTES EN LA EFLORESCENCIA.	44
FIGURA 9. EFLORESCENCIA PRESENTE EN EL MORTERO GEOPOLIMÉRICO ACTIVADO A 1 M CURADO A 28 DÍAS.....	47
FIGURA 10. EFLORESCENCIA PRESENTE EN EL MORTERO GEOPOLIMÉRICO ACTIVADO A 5 M CURADO A 28 DÍAS.....	47
FIGURA 11. EFLORESCENCIA PRESENTE EN EL MORTERO GEOPOLIMÉRICO ACTIVADO A 10 M CURADO A 28 DÍAS.....	48
FIGURA 12. EFLORESCENCIA PRESENTE EN EL MORTERO GEOPOLIMÉRICO ACTIVADO A 15 M CURADO A 28 DÍAS.....	48
FIGURA 13. EFLORESCENCIA PRESENTE EN EL MORTERO GEOPOLIMÉRICO ACTIVADO A 10 M CURADO A 35 DÍAS.....	49
FIGURA 14. GRÁFICO DE MEDIAS Y 95% DE FISHER LSD	52
FIGURA 15. GRÁFICO DE CAJAS Y BIGOTES PARA PE	53
FIGURA 16. GRÁFICO DE MEDIAS Y 95% DE FISHER LSD	55

FIGURA 17. GRÁFICO DE CAJAS Y BIGOTES PARA RESISTENCIA DEL GEPOLÍMERO	56
FIGURA 16. GRÁFICO DEL MODELO AJUSTADO.....	58

RESUMEN

Este trabajo de investigación tiene como objetivo caracterizar las formaciones de eflorescencias en morteros geopoliméricos basados en relaves mineros de Toquepala-Perú y cenizas volantes de la empresa ENGIE en Ilo Perú y su influencia en las propiedades mecánicas del mortero geopolimérico. La metodología se basó en dos fases; la primera fase de caracterización física y química de la materia prima y su análisis instrumental mediante EDAX y DRX; La segunda fase para lo cual se desarrollaron mezclas compuestas por Relave mineros, Ceniza Volante y Metacaolín, el cual fue activado con una solución de NaOH con concentraciones de 1 M, 5 M, 10 M y 15 M y fue curado durante 28 y 35 días al aire libre, se caracteriza el geopolímero obtenido y su eflorescencia, mediante análisis DRX y ensayos de resistencia mecánica evaluando los resultados a nivel estadístico comparando los pesos de eflorescencia y resistencia mecánica. Los resultados de los análisis de la materia prima demuestran que la granulometría es apta para la formación de morteros y el análisis instrumental EDAX y DRX muestran elevada presencia de aluminosilicatos evidenciándose en la relación de $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ y NaO/SiO_2 , presentando valores de 4,43 y 0,080. Los resultados para las mezclas geopoliméricas evidencian mediante el análisis DRX la presencia de Cristales de Óxido de Silicio, Thenardita y Moscovita. Los ensayos de resistencia mecánica demuestran a nivel estadístico mediante la comparación de muestras y modelamiento mediante líneas de regresión la relación antagónica entre peso de eflorescencia y resistencia mecánica del geopolímero observándose que las mezclas activadas a 10 M en 35 días de curado presentando resistencia mecánica de 24,6 Mpa y un peso de eflorescencia de 0,005 g para la mezcla conformada por 55 % de relave, 37,5% de ceniza volante y 7,5 % de metacaolín. Estos datos son importantes ya que proporcionan datos significativos en la industria de la construcción sostenible con miras a desarrollar materiales basados en residuos mineros y termoeléctricos para uso doméstico permitiendo su inclusión en la economía circular

Palabras clave: Relave Minero, Ceniza Volante, Geopolímero, economía circular.

ABSTRACT

This research work aims to characterize the efflorescence formations in geopolymeric mortars based on mining tailings from Toquepala-Peru and fly ash from ENGIE company in Ilo, Peru and its influence on the mechanical properties of the geopolymeric mortar. The methodology was based on two phases; the first phase of physical and chemical characterization of the raw material and its instrumental analysis by EDAX and DRX; The second phase for which mixtures composed of mining tailings, fly ash and Metakaolin were developed, which was activated with a NaOH solution with concentrations of 1 M, 5 M, 10 M and 15 M and was cured for 28 and 35 days in the open air, the obtained geopolymer and its efflorescence were characterized by XRD analysis and mechanical strength tests, evaluating the results at a statistical level by comparing the efflorescence and mechanical strength weights. The results of the raw material analysis show that the granulometry is suitable for the formation of mortars and the instrumental analysis EDAX and DRX show a high presence of aluminosilicates, evidenced in the ratio of $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ and NaO/SiO , presenting values of 4,43 and 0,080. The results for the geopolymeric mixtures show by XRD analysis the presence of silicon oxide crystals, thenardite and muscovite. The mechanical strength tests demonstrate at a statistical level by comparing samples and modeling through regression lines the antagonistic relationship between efflorescence weight and mechanical strength of the geopolymer, observing that the mixtures activated at 10 M in 35 days of curing presented mechanical strength of 24,6 Mpa and an efflorescence weight of 0,005 g for the mixture made up of 55 % tailings, 37.5% fly ash and 7,5 % metakaolin. These data are important as they provide significant data in the sustainable construction industry with a view to developing materials based on mining and thermoelectric wastes for domestic use allowing their inclusion in the circular economy.

Keywords: Mining Tailings, Fly Ash, Geopolymer, circular economy.

INTRODUCCIÓN

El desarrollo constante de componentes electrónicos es actualmente un desafío ambiental, energético y sostenible frente al calentamiento global, la necesidad de materias primas, como el cobre y los metales preciosos (Caribe, 2021), sumando la creciente demanda de energía industrial y de uso doméstico, están dejando importantes millones de toneladas de residuos industriales como relaves mineros (Araya et al., 2020) y cenizas volantes, estos contaminantes son muy reactivos en el medio ambiente debido a sus componentes químicos y su diminuto tamaño de partícula (Latorre & Tovar, 2017b; Ortiz-Hernández et al., 2018), por lo que deben ser tratados para su estabilización (Silva et al., 2012) haciendo uso de tecnologías emergentes como la geopolimerización para el tratamiento de contaminantes industriales son una alternativa latente. Debido a que las propiedades físicas y químicas del geopolímero, este reduce la contaminación insertando en su matriz los contaminantes formando un material resistente que puede ser usado potencialmente como material de construcción, por lo que el estudio de sus propiedades como la formación eflorescencia están estrechamente relacionadas con su materia prima y solución activadora afectando las propiedades de resistencia final del geopolímero (Chen et al., 2021; Cristelo et al., 2020), por lo que esta investigación tiene como objetivo caracterizar la eflorescencias en morteros de geopolímeros basadas en relaves mineros y cenizas volantes para su inclusión como material de construcción dentro de una nueva economía circular sustentable.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

Este trabajo pretende investigar la influencia de la eflorescencia en las propiedades físicas y mecánicas de morteros basados en desechos mineros de provenientes del embalse de relaves de quebrada Honda y desechos termoeléctricos provenientes de la planta termoeléctrica de ENGIE mediante el proceso de geopolimerización.

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Actualmente la industria metalúrgica y energética está en crecimiento a nivel mundial, la necesidad de metales para uso industrial y la energía para su transformación son de preocupación para el desarrollo sostenible, conductores como el cobre están en auge en todas partes del mundo y son de gran aporte para el desarrollo de nuestra civilización, sin embargo, para la extracción del metal valioso se remueven inmensas cantidades de tierras que ya son procesadas y reducidas de tamaño extrayéndose el metal valioso y dejando como subproductos relaves mineros, esta energía utilizada en Perú todavía es mediante la quema de combustibles fósiles debido a que es la fuente más barata y fácil de producir estos procesos dejan como desechos cenizas volantes que son de alta difusión en el ambiente con un alto potencial de contaminación, luego de estos procesos los relaves que son más del 90 % de tierras que son desechadas (Donoso Muñoz, 2013) y son depositadas en relaveras, las cuales están diseñadas para contener estos relaves, sin embargo estos métodos de contención de contaminantes no contemplan la economía circular descontando estos desechos fuera de la cadena de valor. La tecnología como la geopolimerización, permiten elaborar morteros en base a estos residuos como relaves mineros y cenizas volante debido a sus propiedades como su elevada

proporción de aluminosilicatos que al actuar con soluciones alcalinas se reorganizan a nivel químico y físico formando estructuras tetragonales que inmovilizan los posibles elementos contaminantes de estos residuos minero termoeléctricos, ganando a su vez elevada resistencia mecánica que puede ser usada como material de construcción.

Actualmente en la región sur del Perú se encuentran importantes centrales termoeléctricas como la planta termoeléctrica de ENGIE en Ilo Perú que genera como principal subproducto cenizas volantes que por su composición y tamaño de partícula muy fino lo hace muy reactivo a su difusión en el medio ambiente, En la zona sur del Perú se encuentra también las unidades mineras de Toquepala y Cuajone que pertenecen a la empresa minera Southern Perú Copper Corporación, estas producen como principal producto cátodos de cobre a partir del proceso de flotación diferenciada, sin embargo para la producción de estos cátodos también se generan como principal desecho relaves mineros, estos son depositados en el embalse de relaves de quebrada Honda en el distrito de Jorge Basadre en Tacna Perú, estos por su tamaño de partícula y composición química también son susceptibles a difuminarse en el medio ambiente, por lo que elaborar geopolímeros en base a residuos mineros y termoeléctricos permite estudiar las propiedades como su resistencia mecánica y la influencia de la eflorescencia que están poco estudiados, por lo que esta puede afectar sus propiedades mecánicas afectando el proceso de inclusión de este material dentro de una nueva economía circular en la que este material sea protagonista del cambio y valorización de los desechos minero termoeléctricos.

1.2.1. El problema principal

¿Cómo influye la eflorescencia en las propiedades físicas y mecánicas de los morteros basados en desechos mineros de provenientes del embalse de relaves de quebrada Honda y desechos termoeléctricos provenientes de la planta termoeléctrica de ENGIE mediante el proceso de geopolimerización?

1.2.2. Problemas secundarios

¿Cómo influye el activador alcalino en la formación de Eflorescencia en morteros basados en desechos mineros provenientes del embalse de relaves de quebrada Honda y desechos termoeléctricos provenientes de la planta termoeléctrica de ENGIE mediante el proceso de geopolimerización?

¿Cómo influyen la granulometría en la formación de Eflorescencia en morteros basados en desechos mineros provenientes del embalse de relaves de quebrada Honda y desechos termoeléctricos provenientes de la planta termoeléctrica de ENGIE mediante el proceso de geopolimerización?

1.3. JUSTIFICACIÓN EN IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN

1.3.1. Justificación social

Actualmente en una sociedad vacilante ante las operaciones mineras, estas oponiéndose a estas actividades por temor a la contaminación ambiental y de la posible degradación de sus suelos, operando un estado que en muchos casos olvida a las poblaciones campesinas visibilizando las desigualdades sociales entre nuestras poblaciones más vulnerables, se observa que los materiales de construcción no son accesibles en su totalidad y la falta de caminos pavimentados evidencian el olvido del estado por estas poblaciones. Por lo general, construyen sus hogares con materiales poco resistentes y de baja calidad, utilizan las trochas para transportarse y transportar sus productos, lo que hace ineficiente su cadena productiva y que sea más larga en transporte y la conectividad entre los pueblos, se alarguen más las brechas sociales, por ello se propone estudiar el comportamiento de geopolímeros basados en residuos mineros y termoeléctricos en presencia de eflorescencia, evaluando sus propiedades, para que estos obtengan propiedades para su uso como pavimento lo que permitiría hacer uso de la economía circular tomando materiales como los relaves mineros cupríferos que son abundantes para su posterior reutilización, lo que podría ahorrar costos en la pavimentación de las regiones rurales campesinas mejorando la vida de los campesinos tacneños.

1.3.2. Justificación económica

Actualmente el desarrollo industrial minero y energético a nivel mundial está en auge las materias primas han aumentado su valor debido a su constante uso en componentes electrónicos y de energía, por lo que la extracción de metales industriales como el cobre son de gran necesidad para nuestra civilización y desarrollo económico social, sin embargo para extraer estos metales industriales valiosos como el cobre, es necesario remover inmensas cantidades de tierras generando también inmensas cantidades de material estéril como es el relave, cabe decir que estos relaves ya han sido procesados y reducidos de tamaño lo que abre una oportunidad para la valorización de estos relaves proponiendo que los relaves sean partes de la economía circular tratándolos para el uso como material de construcción y pavimentos, teniéndose en cuenta que en nuestro país muchas poblaciones olvidadas y segregadas por la falta de materiales accesibles vías de acceso que no permite la conectividad entre estas poblaciones y las ciudades.

1.3.3. Justificación técnica-ambiental

Este presente trabajo de investigación sienta sus bases en la economía circular y la sustentabilidad, en el aprovechamiento de materiales anteriormente tratados como desechos; como lo son los relaves mineros y cenizas volantes, que por su tamaño de partícula y composición química son muy difusivos en el ambiente (Bautista-Ruiz et al., 2021; Mabroum et al., 2020), lo que puede generar contaminación de cuencas y de la atmósfera formando compuestos nocivos para la salud humana y el ambiente, estos son de los mayores problemas ambientales debido a la gran producción de estos por la industria minera y termoeléctrica que en un mundo cada vez más industrializado alineado con la tecnología (Caribe, 2021). El geopolímero basado en estos residuos mineros y termoeléctricos son una alternativa sostenible y sustentable para su uso como material cementante, sin embargo, este material es susceptible a la eflorescencia que degrada las propiedades mecánicas de este material haciendo ineficiente su uso, por lo que es de importancia estudiar las propiedades y mecanismos para desarrollar un

material más resistente apto para su uso en la industria como material sustentable.

1.3.4. Justificación académica

En la actualidad en el Perú se desarrollan actividades mineras a gran escala de la mano con la generación eléctrica necesaria para el funcionamiento de las plantas metalúrgicas y de uso común, siendo el Perú uno de los países más reconocidos por su producción de cobre y metales preciosos a nivel mundial, sin embargo son pocos los trabajos de investigación que abordan la problemática ambiental y la sustentabilidad basado en sus residuos industriales como son sus relaves mineros y cenizas volantes. Estos residuos al presentar una granulometría y composición química adversa son difíciles de tratar por lo que en muchos casos estos materiales son desechados en rellenos hidráulicos sellados con cemento, sin embargo se ha demostrado que por la composición química oxidativa alta en fierro y sulfuros de los relaves mineros y cenizas volantes estos son muy propensos a generar aguas ácidas, por lo que es una necesidad investigar metodologías vanguardistas para su mejor tratamiento, como es el proceso de geopolimerización que es una alternativa sustentable para el tratamiento de estos residuos industriales, sin embargo al ser un proceso vanguardista es de vital importancia estudiar sus propiedades fisicoquímicas y patologías para su uso como material sustentable.

1.3.5. Importancia de la investigación

La importancia de este proyecto de investigación radica en fomentar el uso de materiales sustentables al mejorar sus propiedades mecánicas, reutilizando contaminantes como son los residuos mineros y termoeléctricos en la economía circular estudiando las propiedades de este material para la síntesis de un material geopolímero que puede ser usado como material de construcción o pavimento valorando un recurso que anteriormente era desechado y generaba problemas de contención y contaminación.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo general

Determinar la influencia de la eflorescencia en las propiedades físicas y mecánicas de los morteros basados en desechos mineros de provenientes del embalse de relaves de quebrada Honda y desechos termoeléctricos provenientes de la planta termoeléctrica de ENGIE mediante el proceso de geopolimerización

1.4.2. Objetivos específicos

- 1) Determinar la molaridad óptima del activador alcalino para la formación de morteros basados en desechos mineros de provenientes del embalse de relaves de quebrada Honda y desechos termoeléctricos provenientes de la planta termoeléctrica de ENGIE mediante el proceso de geopolimerización.
- 2) Determinar la granulometría para la formación óptima de morteros basados en desechos mineros de provenientes del embalse de relaves de quebrada Honda y desechos termoeléctricos provenientes de la planta termoeléctrica de ENGIE mediante el proceso de geopolimerización.

1.5. HIPÓTESIS

1.5.1. Hipótesis general

La presencia de eflorescencia en los morteros basados en desechos mineros de provenientes del embalse de relaves de quebrada Honda y desechos termoeléctricos provenientes de la planta termoeléctrica de ENGIE mediante el proceso de geopolimerización afecta negativamente a las propiedades físicas y mecánicas del mortero.

1.5.2. Hipótesis específicas

- 1) La molaridad elevada en el activador alcalino afecta positivamente en las propiedades físicas y mecánicas de los morteros basados en desechos

mineros de provenientes del embalse de relaves de quebrada Honda y desechos termoeléctricos provenientes de la planta termoeléctrica de ENGIE mediante el proceso de geopolimerización.

- 2) La granulometría reducida afecta positivamente en la formación de los morteros basados en desechos mineros de provenientes del embalse de relaves de quebrada Honda y desechos termoeléctricos provenientes de la planta termoeléctrica de ENGIE mediante el proceso de geopolimerización.

1.6. VARIABLES

1.6.1. Identificación de las variables

VI: Independiente

Definición conceptual: La eflorescencia es un comportamiento espontáneo en un geopolímero a base de Na, que involucra la migración de álcalis solubles. Los álcalis se disuelven en agua y se difunden a la superficie del material a través de poros nocivos, y luego reaccionar con CO₂ para producir productos de carbonato blanco En los materiales de geopolímero se presenta como concentraciones más altas de metales alcalinos solubles (Lv et al., 2020a).

Definición operacional: Composición de los cristales de sal.

VD: Variable dependiente

Definición conceptual: Mezcla endurecida de relave minero ceniza volante y activantes alcalinos como aglutinante.

Definición operacional: Resistencia mecánica Mpa

1.6.2. Caracterización (o definición conceptual) de las variables

La operacionalización de las variables de este estudio se muestra en la Tabla 1

Tabla 1*Operacionalización de las variables*

Variables	Dimensión	Indicador
VI Eflorescencia	<ul style="list-style-type: none"> • Molaridad de la solución activante. • Granulometría del relave minero y las cenizas volantes. 	Mol Micrones
VD Mortero de relave	<ul style="list-style-type: none"> • Molaridad de solución Activante • Resistencia Mecánica 	Mol MPa

1.6.3. Definición operacional de las variables**Tabla 2***Definición operacional de las variables*

Variables	Definición conceptual	Definición operacional
VI Eflorescencia	La eflorescencia es un comportamiento espontáneo en un geopolímero a base de Na, que involucra la migración de álcalis solubles. Los álcalis se disuelven en agua y se difunden a la superficie del material a través de poros nocivos, y luego reaccionar con CO ₂ para producir productos de carbonato blanco En los materiales de geopolímero se presenta como concentraciones más altas de metales alcalinos solubles (Lv et al., 2020a).	Composición de los cristales de sal.
VD Mortero de relave	Mezcla endurecida de relave minero ceniza volante y activantes alcalinos como aglutinante.	Resistencia mecánica Mpa

1.6.4. Operacionalización de las variables

VI: Eflorescencia: Composición de los cristales de sal.

VD: Mortero de relave: Resistencia mecánica (Mpa)

1.7. LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN

Limitaciones espacio temporal:

Se precisa ejecutar este proyecto de investigación en los laboratorios de Mineralurgia y de ensayos destructivos de la Universidad Nacional Jorge Basadre Ghromann.

Limitaciones de clima

Se tomará una temperatura promedio de 17.5 grados anuales y una humedad promedio anual de 83 %.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES DEL ESTUDIO

(Amin et al., 2022), en su trabajo de investigación titulado “Behavior evaluation of sustainable high strength geopolymer concrete based on fly ash, metakaolin, and slag. Case Studies in Construction Materials”, estudia la utilización de desechos industriales como cenizas volantes, metacaolín y escoria granulada de alto horno como base para el hormigón geopolimérico de alta resistencia (HSGC). Se produjeron cuatro mezclas de hormigón de alta resistencia (HSC) con cemento Portland para compararlas con quince mezclas de hormigón de geopolímero diferentes. Todas las mezclas fueron curadas y evaluadas mediante ensayos mecánicos. Las mezclas fueron curadas durante los 3, 7, 28 y 91 días, realizándose las pruebas de resistencia a la compresión, resistencia a la tracción por división, la resistencia a la flexión y el módulo de elasticidad también se midieron y analizaron como propiedades mecánicas. Propiedades de durabilidad como coeficiente de permeabilidad al agua, contracción por secado a 3, 7, 14, 21, 28, 56 y 91 días y se investigaron estudios de temperatura de 100 °C a 700 °C. Se realizaron análisis de microscopía electrónica de barrido (SEM) y espectroscopía de rayos X de energía dispersiva (EDX) de mezclas de cemento y geopolímero. En cuanto a las propiedades mecánicas los resultados mostraron que el geopolímero a base de escoria con 500 kg/m³ presentó un revenimiento de 225 mm, mientras que, en las propiedades endurecidas, la mezcla que contenía 200 kg de metacaolín con 300 kg de escoria presentó la mayor resistencia a compresión tanto en edad temprana como tardía de 63,3 y 82,6 MPa, respectivamente, también tuvieron la mayor resistencia a la tracción por división 6,2 MPa, la resistencia a la flexión alcanzó 9,2 MPa y el módulo de elasticidad fue 37,68 GPa. Además, el coeficiente de permeabilidad disminuye a medida que aumenta la escoria granulada de alto horno. Los aditivos minerales contribuyeron a reducir la

retracción en seco del hormigón geopolimérico. Las imágenes SEM mostraron que la matriz de geopolímero contenía poros de tamaño pequeño más dispersos, lo que indica una resistencia a la compresión más alta que otras mezclas experimentales.

(Qaidi et al., 2022), en su estudio titulado: “Recycling of mine tailings for the geopolymers production: A systematic review. Case Studies in Construction Materials”, desarrolla el potencial de los relaves mineros para la producción de materiales sustentables, expresando que los geopolímeros pueden ser opciones atractivas para recuperar residuos industriales y generar materiales de construcción sostenibles, como desechos industriales de mineros para la inmovilización de elementos peligrosos, según la investigación. Esta estrategia no solo proporciona una reducción de la huella de carbono asociada con los materiales cementosos típicos, sino que también evita la contaminación ecológica sustancial producida por la acumulación de los residuos industriales.

Varios aspectos impactan positivamente con los residuos industriales como relaves mineros lográndose un impacto sinérgico entre algunos de ellos (como la mineralogía, la virtud y la distribución de elementos) debe abordarse para obtener la mayor ventaja posible del empleo de relaves mineros. El sector minero genera una cantidad considerable de desechos pétreos y relaves, los cuales constituyen un peligro sustancial para la ecología. El método más frecuente de eliminación de estos desechos industriales es el vertido, lo que se suma al deterioro del suelo y la contaminación del agua y también ocupa terrenos valiosos. Afortunadamente, se puede reciclar de varias maneras, incluida la prometedora técnica de geopolimerización, que convierte los desechos en valor, centrándose en los siguientes aspectos: Perspectiva económica y productiva; consecuencias ambientales y eliminación de residuos; propiedades físicas y químicas; propiedades mecánicas; propiedades de durabilidad; propiedades de la microestructura; propiedades termales; y aplicaciones potenciales de la geopolimerización en relaves mineros.

(de Oliveira et al., 2022), en su trabajo de investigación titulado: "Durability of geopolymers with industrial waste. Case Studies in Construction Materials", estudia los principales subproductos industriales como (residuos de desulfuración de gases de combustión FGC, cenizas volantes, escorias de alto horno y desechos de vidrio) con potencial para ser utilizados en la producción de geopolímeros, las diferencias entre los materiales activados alcalinamente y los geopolímeros, los principales productos obtenidos en la reacción de activación alcalina y los factores que interfieren en la cinética de las reacciones. Posteriormente, se evalúa la durabilidad de materiales geopoliméricos con residuos industriales, expuestos a carbonatación, corrosión ácida, solución de sulfatos, penetración de cloruros, temperatura de calor, congelación y descongelación, secado y humectación y choque térmico. Finalmente, se realizaron algunas inferencias y análisis futuros sobre la durabilidad de los alkali-activated materials AAM, como la penetración de cloruros, temperatura del calor, congelación y descongelación, secado y humectación y choque térmico. Finalmente, se realizaron algunas inferencias y análisis futuros sobre la durabilidad de AAM, concluyendo que estos residuos industriales activados alcalinamente poseen propiedades fisicoquímicas adecuadas para su uso como material.

(Paiva et al., 2019) En su trabajo de investigación titulado "Mine Tailings Geopolymers as a Waste Management Solution for A More Sustainable Habitat. Sustainability", se ha enfocado en el desarrollo y procesamiento de geopolímeros que incorporan como agregado fino un desecho minero con alto contenido en sulfuro (relaves de mina), un desecho difícil de procesar. El análisis de reología se aplicó como un paso importante para comprender no solo el comportamiento de los geopolímeros, sino también su transición del estado fresco al endurecido siendo afectado según el tipo de aglutinante precursor (metacaolín o escoria de alto horno), Se estudió el contenido de relaves de la mina y también el efecto de la temperatura y las condiciones de curado de diferentes formulaciones. Se concluyó que, aunque este relave minero en particular no es un precursor de aglomerante de geopolímero, puede incorporarse como un agregado fino

alternativo en productos de construcción. Además, la reología podría usarse para seguir el proceso de activación alcalina del geopolímero e incluso para configurar las condiciones de curado y el contenido de los componentes adecuados para optimizar la resistencia mecánica final de este material como una solución de gestión de residuos. Las propiedades finales de estas composiciones de geopolímeros fueron adecuadas después de 28 días de curado, estos geopolímeros exhiben una resistencia química significativa bajo condiciones de prueba severas.

(Mazumder & Prasad M., 2021), En su trabajo de investigación titulado “Effect of Quantity of Industrial Waste on Eco-Friendly Geopolymer Concrete “, desarrolla materiales geopoliméricos GEO-C basados en residuos industriales utilizando una mezcla de escoria de alto horno granulada molida (GGSG) y cenizas volantes de clase F, y el reemplazo varía de 0 % a 100 % de material aglutinante, para encontrar la dosis óptima de material aglutinante. Se usó como agente activador para el proceso de polimerización de geopolímeros Hidróxido de Sodio (NaOH) y Silicato de Sodio (Na_2SiO_3) que son de naturaleza alcalina. Los experimentos se realizaron en muestras fijando la concentración de NaOH en 14M para una resistencia óptima y la proporción de activador alcalino se fija en uno. Las propiedades mecánicas de GEO-C, como la resistencia a la compresión, el módulo de ruptura (es decir, la resistencia a la flexión) y la resistencia a la tracción dividida, se evaluaron a las edades de 7, 14 y 28 días de los resultados se observa que con la adición de GGSG en la mezcla aumentan las resistencias a la compresión, flexión y tensión, pero hay una reducción drástica en la trabajabilidad de la mezcla.

(Simão et al., 2021). En su trabajo de investigación titulado: “Controlling efflorescence in geopolymers: A new approach. Case Studies in Construction Materials”, expresa que la eflorescencia excesiva en los geopolímeros puede reducir su durabilidad debido a la reducción de la resistencia a la compresión y a la tracción, además de un problema estético. Se utilizó un nuevo enfoque centrado en el ajuste composicional para preservar las propiedades mecánicas

sin desarrollo de eflorescencias en los geopolímeros a base de metacaolín (MK-G), ceniza de biomasa (BA-G) y residuos de corte de piedra (SW-G). En las muestras de MK-G, la formación de eflorescencias se controló disminuyendo la relación molar $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ de 1,10 a 0,90, sin comprometer la resistencia a la compresión (~16 MPa en MK-G0.9). En las muestras ensayadas con BA-G se observó un aumento de la resistencia a la compresión. De manera similar, para las muestras SW-G, la reducción de la relación $\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (1.4 a 1.0) también impidió la eflorescencia, así como también denotó una disminución en los valores de sodio y alcalinidad en el extracto lixiviado. Además de los ajustes de composición, los cambios de procesamiento con la cura en agua sumergida han demostrado ser una alternativa eficiente para prevenir el desarrollo de eflorescencias. La comprensión de este fenómeno y las estrategias para reducir el potencial de formación de eflorescencias pueden evitar problemas de durabilidad en el uso de geopolímeros en la construcción de edificios.

(Longhi et al., 2022), en su trabajo de investigación titulado: “Kaolin mining waste to produce geopolymers: Physicomechanical properties and susceptibility to efflorescence formation”, expresa que la eflorescencia en los geopolímeros resulta de la movilidad del exceso de álcali y la consiguiente cristalización de los carbonatos alcalinos. El potencial de eflorescencia de varios geopolímeros se ha informado anteriormente, pero el conocimiento sobre el efecto de la eflorescencia en la microestructura y las propiedades mecánicas de los geopolímeros sigue siendo limitado. Para lo que se desarrolló los geopolímeros a base de metacaolín, los cuales se curaron al aire, se sumergieron parcialmente en agua y se sumergieron por completo para simular diferentes procesos involucrados en la formación de eflorescencias. Las propiedades mecánicas se evaluaron mediante la resistencia a la compresión, la tracción por división y la flexión, y la deformación lineal. Las características microestructurales se investigaron mediante SEM, sincrotrón XRD, MAS NMR multinuclear, MIP y microtomografía de rayos X sincrotrón. La elevada eflorescencia presenta como resultado una reducción de la resistencia mecánica y cambios en la nanoestructura y la microestructura, lo que es diferente de las

observaciones para los materiales a base de cemento Portland, donde la eflorescencia generalmente se considera un problema superficial o estético. La comprensión de la relación entre la formación de eflorescencias, la síntesis y las condiciones de exposición proporciona información importante sobre las condiciones de fabricación y aplicación de materiales relacionados con geopolímeros.

(Zhou et al., 2020), en su Investigación titulado: "Relationship between Moisture Transportation, Efflorescence and Structure Degradation in Fly Ash/Slag Geopolymer. Materials", investigó la relación entre el transporte de humedad y la eflorescencia en geopolímeros de ceniza volante/escoria activados con hidróxido de sodio o silicato de sodio. Los resultados muestran que los productos de la eflorescencia son hidratos de carbonato de sodio, compuestos principalmente por natrón, heptahidrato, trona y carbonato de sodio. La eflorescencia induce la pérdida de resistencia a la compresión, aumenta la absorción de agua y la degradación de la estructura de poros en el geopolímero. Cuando la superficie curva de un cilindro de geopolímero se cubre con una película de plástico, el transporte de humedad impulsa los álcalis libres hacia la superficie superior para iniciar la eflorescencia. En comparación, la eflorescencia que se produce en la superficie curva de un cilindro de geopolímero descubierto da como resultado una pérdida de alcalinidad más intensa. Para los geopolímeros descubiertos preparados con activador de hidróxido de sodio, se forman depósitos de eflorescencia en la mitad inferior del cilindro. Una baja capacidad de absorción capilar desarrollada en la estructura porosa solo puede conducir la humedad hacia el centro del cilindro, que se enfrenta con el frente de secado. Se forman más productos de eflorescencia en la mitad superior del cilindro de geopolímero descubierto preparado con activador de silicato de sodio. Una estructura de poros más compacta presenta una capacidad de absorción capilar relativamente mayor, que transporta la humedad desde el fondo hasta la parte superior del cilindro, por lo que no se observa ninguna línea de secado en el cilindro. Se forman más productos de eflorescencia en la mitad

superior del cilindro de geopolímero descubierto preparado con activador de silicato de sodio.

(Srinivasamurthy et al., 2022), en su trabajo de investigación titulado: “Mechanical property and microstructure development in alkali activated fly ash slag blends due to efflorescence. Construction and Building Materials”, evalúa la eflorescencia de los materiales activados por álcalis (AAM), que es causada por la lixiviación de álcalis y la precipitación de sales carbonatadas, que ocurre simultáneamente con la lixiviación y la carbonatación natural. La eflorescencia está impulsada específicamente por la variabilidad del precursor y del activador en los AAM frente a los cambios de fase, la microestructura y las propiedades mecánicas que no se comprenden bien. Por lo que se evaluaron los efectos de la eflorescencia a largo plazo (90 días) en AAM con ocho contenidos variados de calcio y activador y se correlaciona con las resistencias a la tracción de compresión y división. Las características microestructurales que incluyen NaSH/C, el cambio de gel de NaSH se analizan mediante espectroscopia infrarroja transformada de Fourier (FTIR), resonancia magnética nuclear giratoria de ángulo mágico (MAS-NMR) y análisis termogravimétrico (TGA). AAM con 9 % en peso de Na₂O y relación Ca/(Si + Al) de 0,0 a 0,25 muestran una mayor eflorescencia y desaluminación de Al [IV] en geles NaSH/C, NaSH, mayor movilidad de los iones Na⁺ y carbonatación natural. Por el contrario, los AAM con 5 % en peso de Na₂O y una relación Ca/(Si + Al) de 0,0 a 0,25 exhiben menor eflorescencia y mayor estabilidad. Bajo eflorescencia, el aglomerante con 5 % en peso de Na₂O y una proporción de Ca/(Si + Al) de 0,25 exhibió desaluminación y carbonatación, y los aglomerantes con 5 % en peso de Na₂O y Ca/(Si + Al) de 0,0 a 0,10 mostraron menos desaluminación y carbonatación. mayor concentración de Al[IV] en gel de aluminosilicato, indicativo de mayor estabilidad de fase.

(Yao et al., 2015), evidencia en su trabajo de investigación titulado: “Compressive strength development and shrinkage of alkali-activated fly ash–slag blends associated with efflorescence. Materials and Structures”, que la eflorescencia tiene una influencia negativa en la resistencia del geopolímero.

Cuando una pasta de geopolímero se coloca en condiciones de aceleración de la eflorescencia, el agua puede entrar en los poros de la matriz sólida por succión capilar y evaporarse de la superficie de la muestra. Los álcalis internos son capaces de difundir hacia la superficie, proporcionando Na^+ para la precipitación de carbonatos de sodio, hasta que se alcanza una condición de equilibrio (saturación) entre la solución del poro y los cristales. La concentración reducida de álcali en la matriz, debido a la difusión, afectará o suprimirá la activación posterior de los precursores residuales. Además, la presión de cristalización debido a la precipitación de carbonatos de sodio en los poros del aglutinante también puede introducir tensiones internas que, en consecuencia, afectan a las propiedades mecánicas de los geopolímeros.

(Waijarean et al., 2017), en su investigación titulada: “Synthesis and properties of geopolymers based on water treatment residue and their immobilization of some heavy metals”, estudia la activación alcalina de residuos de tratamiento de agua y un material de desecho que contenía aluminosilicatos y una concentración significativa de hierro en forma de un gel de óxido de nanopartículas férricas sintetizando geopolímeros, se encontró que la estructura característica del geopolímero incorpora metales pesados como el hierro, cromo y zinc, concluyendo que los geopolímeros son capaces de inmovilizar desechos que contienen estos metales pesados y poseen propiedades para su almacenamiento o eliminación.

(Manjarrez & Zhang, 2018), en su investigación titulada: “Utilization of Copper Mine Tailings as Road Base Construction Material through Geopolymerization”, desarrolló su investigación en la utilización de relaves de minas de cobre como material de construcción para carreteras mediante el proceso de geopolimerización, mezclando el relave minero con diferentes cantidades de solución de hidróxido de sodio (NaOH) a diversas concentraciones de 0 a 11 M, se compactó y luego se curó a 35 °C. Después de 7 días de curado, se realizaron pruebas de compresión no confinada en las muestras para determinar su resistencia a la compresión no confinada (UCS). El estudio ha investigado sistemáticamente el efecto de dos factores principales, la

concentración de NaOH y el contenido de humedad, sobre el comportamiento del relave minero geopolimerizado. Los resultados muestran que el peso unitario seco máximo del MT compactado está influenciado por la concentración de NaOH, con una concentración más alta de NaOH que conduce a un peso unitario seco máximo más grande. El comportamiento del relave minero geopolimerizado final depende en gran medida de la concentración de NaOH y del contenido de humedad del relave minero compactado inicial. Este estudio demuestra que, al seleccionar el contenido de humedad y la concentración de NaOH apropiados, el relave minero geopolimerizado puede cumplir con los requisitos de resistencia para la base de las carreteras estatales según la Administración Federal de Carreteras (FHWA) en los Estados Unidos. Sin embargo, antes de la aplicación de campo el relave minero en la construcción de bases de carreteras, se debe realizar un estudio exhaustivo de lixiviados para garantizar que el uso del relave minero sea seguro para el medio ambiente.

(Sangiorgi et al., 2016) en su trabajo de investigación titulado: “Reuse of mining waste into innovative alkali-activated-based materials for road pavement applications “, estudia el uso potencial de los agregados y rellenos de residuos de la mina Panasqueira en la producción de materiales de construcción para infraestructuras de transporte. Afirmando que el desarrollo de agregados artificiales a través de la activación con álcalis de residuos mineros se presenta como una solución técnica viable para competir con otros materiales comúnmente adoptados y puede conducir a la fabricación de agregados menos porosos y más duros para la producción de la mayor parte de la pavimentación de carreteras.

2.2. BASES TEÓRICAS

2.2.1. Geopolímeros

Los materiales conocidos como geopolímeros son aglomeraciones materiales cementantes que se sintetizan a partir de aluminosilicatos en solución alcalina, los cuales a ser conformados obtienen propiedades particulares como la alta resistencia mecánica y la inmovilización de elementos contaminantes con

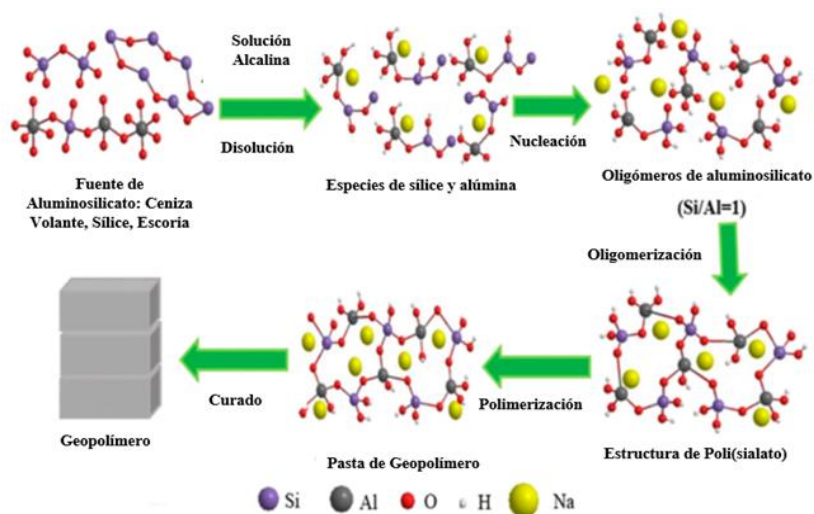
el tiempo y la temperatura (Škvára et al., 2009) (Chen et al., 2021), estos son materiales de gran interés, ya que presenta valores de propiedades mecánicas como resistencia y durabilidad comparables a materiales tradicionales como los cementos (Mabroum et al., 2020).

2.2.2. Proceso de Geopolimerización

El proceso de geopolimerización ocurre cuando materiales con elevado contenido en aluminosilicatos reaccionan con una solución altamente alcalina para formar polímeros amorfos de aluminosilicato semi-cristalinos definidos por (J. L. Provis & Bernal, 2014; Zhuang et al., 2016). La geopolimerización es un proceso de alta complejidad, que se divide en los siguientes pasos observados en la Figura 1: (1) la disolución de fases amorfas por solución alcalina; (2) el transporte, la orientación y la condensación de iones precursores en monómeros y (3) policondensación y polimerización de monómeros en polímeros de aluminosilicato amorfo a semi-cristalinos (J. Provis & Van Deventer, 2009) y (Davidovits, 2008). Los geopolímeros conformados poseen excelentes propiedades físicas químicas y mecánicas, además de poseer la propiedad de encapsular en inmovilizar elementos contaminantes en su matriz tetragonal (Morales Aranibar, 2019).

Figura 1

Proceso general de Geopolimerización,



Nota. Esquema de geopolimerización. Fuente: (Zhuang et al., 2016)

2.2.3. Variables que participan en la síntesis de geopolímeros

Las variables que más influyen en la formación del geopolímero son la composición y concentración de la solución activante, la relación entre silicatos y aluminatos, el contenido de agua, tiempo de reacción, la temperatura de curado, la granulometría de la materia prima afecta las velocidades de dilución el área de contacto y las propiedades mecánicas del geopolímero (Barrie et al., 2015; Komnitsas et al., 2008).

2.2.3.1. Contenido de agua

(Waijarean et al., 2017), demostró que la proporción de agua influye en la trabajabilidad del geopolímero basados en cenizas volantes y metacaolín relacionando su proporción de agua con la trabajabilidad y la resistencia final del geopolímero, a mayor contenido de agua mayor trabajabilidad, pero menor resistencia a la compresión debido a los intersticios en la superficie causados por la volatilización del agua impactando en las propiedades físicas finales del geopolímero (Longhi et al., 2022).

2.2.3.2. El curado del Geopolímero

El curado del geopolímero dependen de las variables sinérgicas temperatura y el tiempo debido a que puede ser operada a diferentes temperaturas y estas se relacionan con su tiempo de curado, (Davidovits, 2005) propone que a temperaturas inferiores a los 100 °C, sin embargo, esta puede variar incluso curarse a temperatura ambiente (GÜLTEKİN et al., 2022). Estas propiedades son importantes para la obtención de buenas propiedades mecánicas en los geopoliméricos, estas pueden variar desde 2 a 24 horas de curado en hornos, pero pueden ser curados a temperatura ambiente lo que hace que este proceso tarde en curar de 28 a 35 días (Qaidi et al., 2022)

2.2.3.3. Composición química

La composición química, en los geopolímeros son de relevancia especialmente en el contenido de aluminosilicatos presentes en el material que

fungirá como materia prima (Azad & Samarakoon, 2021), no existen composiciones estandarizadas para la formación del geopolimérico, la composición final de cada del geopolímero resultante depende de las propiedades iniciales de los materiales (Alves, 2019; Silva et al., 2012).

2.2.3.4. Solución Activante

La solución activante es de las variables más importantes debido a que esta es precursora del desarrollo de la reacción de geopolimerización, pueden utilizarse dos tipos: Silicatos disueltos en el activador básico e hidróxidos alcalinos (J. Provis, 2009). Los hidróxidos alcalinos, aportan el grupo OH- este afecta a la reacción como un catalizador, y el metal catiónico alcalino interviene como un elemento precursor de la estructura para equilibrar la carga negativa de la configuración del aluminio tetraédrico (Waijarean et al., 2017). Los silicatos en solución presentan mejores propiedades mecánicas, poseen una química más compleja que los activadores tipo hidróxidos alcalinos, lo que implica una mejor comprensión de las fases que se forman durante el proceso (Bellum et al., 2020).

2.2.3.5. Relaciones Molares para $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ y $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$

Normalmente, los silicatos que componen los geopolímeros comprenden una red de tetraedros de SiO_4 y AlO_4 conectados alternativamente con átomos de oxígeno. Las cavidades de la estructura albergan iones con carga positiva, como Na^+ , K^+ o Ca^{2+} , que son necesarios para contrarrestar la carga negativa de Al^{3+} . La fórmula empírica de los polisialatos es $\text{Mn}-(\text{SiO}_2)_z-\text{AlO}_2)_n\text{wH}_2\text{O}$, donde n es el grado de policondensación y z puede tomar valores entre 1 y 3. Los polisialatos son anillos o cadenas poliméricas con Si^{4+} y Al^{4+} en coordinación número IV con oxígeno. Se ha observado que las relaciones $\text{X}_2\text{O}/\text{SiO}_2$, $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{H}_2\text{O}/\text{X}_2\text{O}$ y $\text{X}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ donde X es (K, Na, Ca, Ba y Li) son importantes a tener en cuenta para generar productos geopoliméricos de alta resistencia, experimentalmente desarrollado por (Rodríguez et al., 2009) demostró que el aumento en la cantidad de silicatos solubles y concentración del ión alcalino, a través del aumento en las relaciones $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ y $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ respectivamente, afecta negativamente el comportamiento mecánico de los materiales

geopoliméricos encontrando que para su estudio relaciones de $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ de 3,0 y $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ de 0,25 expresaban las mejores resistencias mecánicas.

2.2.3.6. Granulometría de la materia prima

La granulometría es una de las variables más importantes debido a que proporciona una mayor área de contacto partículas más finas con la solución activante lo que influencia en la velocidad de la reacción para la formación del geopolímero (Pommer et al., 2021), El tamaño de partícula óptimo del geopolímero a base de ceniza volante es de malla 200 y a una temperatura de activación óptima de 700 °C. proporcionando características como alta resistencia a la compresión (Li et al., 2021).

2.2.3.7. La actividad minera y el origen del relave

Según (Ortiz-Hernández et al., 2018), la minería es una actividad que consiste en el beneficio de minerales obtenidos de la corteza terrestre mediante la extracción selectiva, por lo que comúnmente, se remueven grandes cantidades de materiales, para recuperar solo una pequeña parte del producto deseado. En el Perú existen diferentes explotaciones mineras como la de metales preciosos, minerales industriales y los materiales de construcción. (Cano & Kunz, 2022) expresa que en el procesamiento mineral se generan un gran volumen de relaves, que en muchos casos son más de dos tercios más grande que el material extraído, por lo que su disposición final actualmente es uno de los problemas ambientales de mayor preocupación de las instituciones y la población en general (Echave C. et al., 2009; Latorre & Tovar, 2017a).

2.2.3.8. La actividad termoeléctrica y las cenizas volantes

Según (Blanco & Peña, 2011), la actividad termoeléctrica, se basa en el uso de combustibles fósiles como carbón mineral que posteriormente al quemarlos generan calor, este calor generado elevará la temperatura de un fluido como el agua, hasta que este cambia de fase a vapor, este vapor generado activa una turbina, esta empieza a rotar y de esta manera la energía térmica se

convierte en cinética y esta energía es aprovechada para poder generar energía eléctrica.

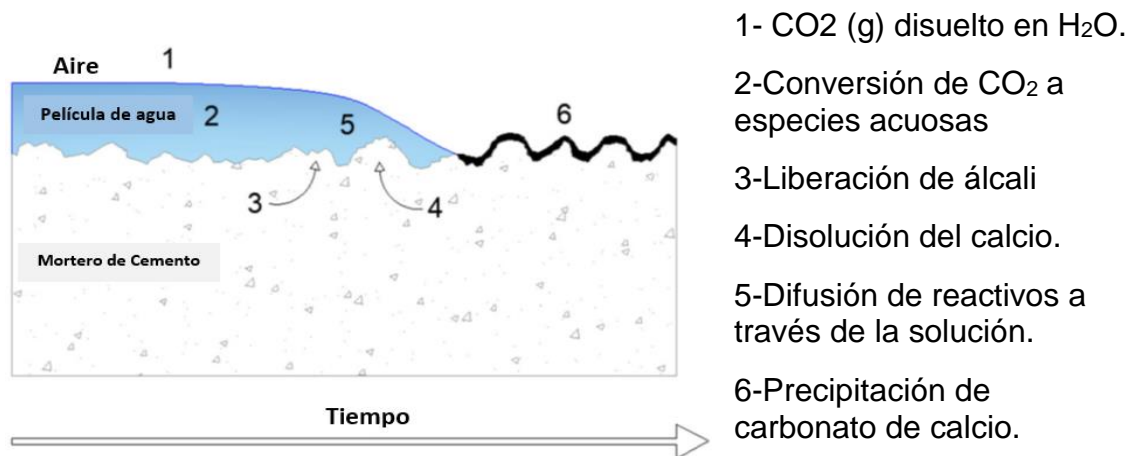
Las cenizas volantes son generadas por la combustión de carbón mineral en centrales térmicas generadoras de electricidad, es un contaminante ambiental conocido debido a su composición química, que además de comprender óxidos de hierro, silicio, aluminio y muchos más componentes vitales, también consisten en compuestos de metales pesados como mercurio, arsénico, plomo. etc., lo que representa una grave amenaza para la salud humana y demuestra ser igualmente peligroso para los animales terrestres y acuáticos (Naqvi et al., 2021). En la actualidad se producen grandes cantidades de cenizas volantes debido al creciente consumo de energía, que es una amenaza para el medio ambiente y por esto su elevado interés en introducir a la cadena de valor dentro de la economía circular (Vilakazi et al., 2022).

2.2.4. Eflorescencia en materiales tradicionales.

Tradicionalmente la mayoría de materiales de construcción y por ende más estudiados en sus propiedades como la eflorescencia son los materiales basados en cemento, los hormigones tienen una larga historia en la sociedad humana, la eflorescencia en materiales como el hormigón, la eflorescencia aparece como productos blanquecinos, descritos por (Dow & Glasser, 2003), según su modelo este presenta seis etapas en las cuales se forma la eflorescencia, disolución de CO_2 (g) en H_2O en la interfase aire-agua en la superficie de los productos, conversión de CO_2 en especies acuosas, liberación de álcali(s), disolución de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, difusión de reactivos a través de la solución y precipitación de carbonato de calcio, como se muestra en la Figura 2 .

Figura 2

Esquema del proceso de formación de eflorescencia



Nota: Adaptado de Dow y Glasser (2003).

Los estudios de (Dow & Glasser, 2003) expresan que, en la primera y segunda etapa, la existencia de otra fuente de álcali como NaOH o KOH puede aumentar la disolución de CO₂ y su absorción en la muestra. Está relacionado con la abundancia del grupo OH⁻ en una solución de pH alto, lo que aumenta la reacción para formar H₂CO₃. En contraste, el Ca (OH)₂ disuelto no puede aumentar la solubilidad, debido a la insolubilidad del CaCO₃. En la tercera y cuarta etapa se produce la lixiviación de los álcalis, cuya fuente principal es el propio cemento. El contenido de Ca (OH)₂ depende de otros factores como el tipo de cemento, así como el tiempo de curado. La porosidad es un factor importante, según (Z. Zhang et al., 2014b); mientras se procesa la reacción, las vías de transporte se alargan si la matriz se vuelve más porosa. La quinta etapa está relacionada con la difusión, que depende de factores como el pH de la solución de los poros, y la especiación del CO₂ se ajusta a un nuevo equilibrio entre (CO)₂ (acuoso), H₂CO₃ y CO₂₋₃ y luego es incorporado a las etapas 1 y 2, y especies de Ca⁺ disueltas. La etapa final está relacionada con la precipitación de especies de CaCO₃.

La eflorescencia se suele observar a simple vista, normalmente no es dañina, pero sí estéticamente indeseable (Baptista et al., 2017). Sin embargo, es necesario evaluar el efecto del proceso de lixiviación y la estructura porosa del material, ya que este proceso puede aumentar la porosidad y acelerar la lixiviación. Como la eflorescencia es un proceso natural, el material está expuesto a la evaporación. (Dow & Glasser, 2003) expresan que el ciclo de la eflorescencia puede interrumpirse por la pérdida de película líquida por evaporación, quizás combinada con la succión del material poroso. Durante la evaporación, la capacidad de almacenamiento de CO₂ del agua pura es suficientemente baja y la formación de eflorescencias por evaporación completa hace una contribución insignificante a la eflorescencia, en relación con el transporte en estado estacionario. Sin embargo, las concentraciones de NaOH o KOH pueden aumentar el almacenamiento de CO₂. Con ello, incluso con evaporación, el contenido de CO₂ puede aumentar durante los ciclos húmedo/seco. El ciclo de eflorescencia puede reiniciarse por el restablecimiento de una película de agua.

Los productos precipitados pueden, según la permeabilidad y el contenido de álcalis lixiviarles, afectar la cinética de la reacción. Por otro lado, la carbonatación interna también induce un efecto neutralizador del ambiente altamente alcalino proporcionado por la hidratación de PC (que en condiciones sanas/normales muestra un pH superior a 13 en la solución de los poros), aumentando así la vulnerabilidad del acero de refuerzo incrustado a la corrosión (D. Zhang et al., 2017). Internamente, el efecto es relativo al proceso de cristalización. (Šavija & Luković, 2016) expresan que hay dos tipos de proceso de carbonatación, (1) proceso pasivo cuando la carbonatación provoca cambios no deseados y no planificados en la capa superficial de una estructura de hormigón o un elemento cuando se expone al medio ambiente como caída de pH, cambios de porosidad, cambios mecánicos y agrietamiento. Sin embargo, (2) la carbonatación activa supone una exposición controlada.

2.2.5 Eflorescencia en los Geopolímeros

En la actualidad el estudio de la florescencia está en constante crecimiento debido a los posibles usos que se le puedan dar a la técnica, estudiados principalmente por (Yao et al., 2015; Z. Zhang et al., 2014b, 2018) denotan que el fenómeno de eflorescencia en geopolímeros es el resultado de una reacción química entre los álcalis lixiviados libres en estructura porosa con el CO₂ en forma acuosa, donde los álcalis son el resultado de un proceso de lixiviación física, es decir, esto solo ocurre cuando los álcalis están libres para transportarse. Con esto, la lixiviación alcalina es relativa a la cantidad de cationes libres y facilidad de movimiento dentro de la estructura porosa. Estos factores dependen de las condiciones de síntesis y de los productos reaccionados formados después de la activación con álcali.

2.2.6 Seguridad Minera

La seguridad para la manipulación y acarreo de las muestras de relave deben ser óptimas, por lo que la seguridad está basada en Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería Decreto Supremo D.S. N° 023-2017-EM (Ministerio de Energía y Minas del Perú, 2017). Implementando los Epps Mínimos para el muestreo y acarreo como en la Figura 3.

Figura 3

Implementos de Seguridad Para el Muestreo y Acarreo del Relave.



2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS

Geopolímero

(Davidovits, 2017), define al geopolímero como polímeros inorgánicos de tipo cerámico producidos a baja temperatura, generalmente por debajo de los 100 °C. Consisten en cadenas o redes de moléculas minerales unidas por enlaces covalentes. Las materias primas son principalmente minerales de origen geológico, de ahí el nombre de "geopolímero". Comprenden varias unidades moleculares, por ejemplo: sílico-óxido (Na, K)-(-Si-O-Si-O-) para (Na, K)-poli(silicato) o (Na, K)-poli(siloxonato) , silicoaluminato (Na, K)-(-Si-O-Al-O) para (Na, K)-poli(sialato), ferro-silicoaluminato (Na, K)-(-Fe-O-Si -O-Al-O-) o (Na, K)-poli(ferro-sialato), aluminio-fosfato (-Al-OPO-) por poli(aluminio-fosfato), formado en un proceso de geopolymerización. Nos centramos aquí en la reactividad de la caolinita calcinada, un óxido de aluminosilicato $Si_2O_5Al_2O_2$, metacaolín, que condujo al descubrimiento de los geopolímeros hace 40 años. Se distinguen dos vías de síntesis: Medio alcalino (Na⁺, K⁺, Li⁺, Ca⁺⁺, Cs⁺ y similares) y medio ácido (ácido fosfórico, ácidos carboxílicos orgánicos). La ruta alcalina es la más importante, hasta el momento como aglomeraciones materiales cementantes que se sintetizan a partir de aluminosilicatos en solución alcalina, los cuales a ser conformados obtienen propiedades particulares como la alta resistencia mecánica y la inmovilización de elementos contaminantes con el tiempo y la temperatura, los cuales a ser conformados obtienen propiedades particulares como la alta resistencia mecánica y la inmovilización de elementos contaminantes con el tiempo y la temperatura, estos son materiales de gran interés, ya que presentan valores de propiedades mecánicas como resistencia y durabilidad comparables a materiales tradicionales como los cementos (Kheimi et al., 2022).

Eflorescencia

La eflorescencia es un comportamiento espontáneo en un geopolímero a base de Na, que involucra la migración de álcalis solubles. Los álcalis se disuelven en agua y se difunden a la superficie del material a través de poros

nocivos, y luego reaccionar con CO₂ para producir productos de carbonato blanco. En los materiales de geopolímero se presenta como concentraciones más altas de metales alcalinos solubles (Lv et al., 2020a).

Ceniza Volante

(Peña Rodríguez, G., & Ortega Triana, L. R.) (2014), define a las cenizas volantes son subproductos generados en la producción energética basado en la quema de carbón mineral, estos tienen gran capacidad de difusión en el ambiente debido a los tamaños de partícula que presentan entre 1µm y 100 µm, estos poseen elevada cantidad de aluminosilicatos en su composición.

Relave Minero

(Rzymiski et al., 2017), define relave minero como un residuo sólido producto de operaciones mineras, el cual es proveniente de la concentración del metal valioso mediante el proceso de flotación de minerales. Durante esta operación extractiva, adicionando agua a partículas minerales que han sido previamente molidas se genera una pulpa o suspensión. Esta pulpa es procesada en celdas de flotación, en las cuales se aprovechan las propiedades superficiales de los minerales valiosos para separar los metales valiosos de la ganga, al potenciar su carácter hidrofílico o hidrofóbico. Las partículas hidrofílicas permanecen en suspensión en la pulpa, humedeciéndose hasta hundirse en la celda de flotación y formando el relave. Las partículas hidrofóbicas en cambio, se adhieren a burbujas de aire que son inyectadas al sistema de celdas de flotación, ascendiendo hasta las zonas superiores de las celdas y formando una espuma que constituye el concentrado (Martinez, 2018).

Las características del relave minero como el tamaño de partícula fina y homogénea debido a los procesos de molienda y flotación, presentan áreas superficiales expuestas a meteorización favoreciendo la generación de drenaje ácido minero, sobre todo si la mineralogía de ganga asociada incluye altos contenidos de pirita, se presentan tres etapas para la formación del drenaje ácido siendo un agente contaminante al medio ambiente y la salud humana (Ortiz-Hernández et al., 2018).

2.4. MARCO LEGAL

Ley N° 28271, Ley de la República del Perú que regula los pasivos ambientales de la actividad minera.

Ley que tiene por objeto regular la identificación de los pasivos ambientales de la actividad minera, la responsabilidad y el financiamiento para la remediación de las áreas afectadas por estos, destinados a su reducción y/o eliminación, con la finalidad de mitigar sus impactos negativos a la salud de la población, al ecosistema circundante y la propiedad. Que en sus disposiciones complementarias y finales en concordancia con el D.S. N° 059-2005-EM, Art. 12 expresa:

"Primera. - Disposición Complementaria y Final. - Obligaciones del Estado

Las obligaciones que asume el Estado en virtud del artículo 5 de la presente Ley, están limitadas únicamente a la remediación y cierre de los pasivos ambientales. El Ministerio de Energía y Minas promueve la participación de terceros en la identificación y remediación de los pasivos ambientales a través de otros mecanismos que considere conveniente, para cuyo fin podrá celebrar convenios con titulares mineros, así como emplear otras modalidades contenidas en el Reglamento de la presente Ley".

"Segunda. - Participación de los Gobiernos Regionales

El Gobierno Regional en coordinación con la entidad competente del Ministerio de Energía y Minas promoverá la participación de terceros y de la sociedad civil en la remediación de los pasivos ambientales mineros con arreglo a ley. Asimismo, fomenta la participación de la sociedad civil en acciones que coadyuven en el tratamiento de la remediación de los pasivos ambientales mineros"

Estándar global sobre relaves para la industria minera elaborado por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA).

Estándar global que tiene como objetivo final de cero daños en las personas y en el medioambiente, y tolerancia cero para fatalidades humanas. Exige a los operadores que asuman la responsabilidad y prioricen la seguridad de sus

instalaciones de relaves, a lo largo de todas las fases del ciclo de vida del proyecto, incluso cierre y post cierre. También exige la divulgación de la información pertinente como respaldo de la rendición de cuentas frente al público.

En su principio 3.- “Utilizar los elementos de la base de conocimientos - sociales, ambientales, de la economía local y técnicos - con el fin de informar las decisiones durante el ciclo de vida de la instalación de relaves, incluido su cierre”, expresa en sus requisitos:

Requisito 3.2.- “Para las nuevas instalaciones de relaves, el operador deberá utilizar la base de conocimientos y adoptar un análisis de alternativas multicriterio para todos los sitios de emplazamiento, tecnologías y estrategias factibles para su gestión. El objetivo de este análisis será: (i) Seleccionar una alternativa que minimice los riesgos a las personas y al ambiente durante todo el ciclo de vida de la instalación de relaves, y (ii) minimizar el volumen de relaves y agua colocados en instalaciones de relaves exteriores. Este análisis deberá ser revisado por la Comisión Independiente de Revisión de Relaves (CIRR) o por un revisor técnico senior independiente”.

Requisito 3.4.- “Actualizar la evaluación de los impactos sociales, ambientales y en la economía local con el fin de reflejar cualquier cambio importante en la instalación de relaves o en el contexto social, ambiental o de la economía local. Si los datos nuevos indican que los impactos producidos por la instalación de relaves han cambiado de manera importante, incluso como resultado del conocimiento sobre el cambio climático o de impactos a largo plazo, el operador deberá actualizar el manejo de la instalación de relaves para reflejar que se están usando los nuevos datos, aplicando las mejores prácticas de gestión adaptativa”.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. TIPO Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

Este proyecto se basa en un diseño experimental realizado a nivel de laboratorio porque se está utilizando conceptos de ciencias de los materiales, el cual se enmarca dentro del concepto dado por (Hernández Sampieri, 2018) que manifiesta “Una definición técnica de un experimento , hace alusión a un estudio en el que intencionalmente se manipulan una o más variables independientes, para analizar las consecuencias que esta deliberada manipulación tiene sobre una o más variables dependientes o efectos dentro de una de una estructura controlada para el investigador”.

3.2. POBLACIÓN Y MUESTRA DE ESTUDIO

Población: Relaves cupríferos de quebrada honda y Cenizas Volantes de la planta Termoeléctrica de Engie -llo.

Muestra:1000 kg de relave cuprífero tomado de los canales de relaves a quebrada honda.

3.3. METODOLOGÍA

El presente estudio se realizó en dos fases, la primera fase de caracterización física y química de las materias primas mediante ensayos y análisis como el análisis granulométrico mediante tamizado, gravedad específica, humedad análisis TCLP, DRX y de microscopia Anexo 1.

La segunda fase donde se elaboran las mezclas basadas en relave minero ceniza volante y metacaolín, activadas mediante soluciones activantes de 1M, 5 M, 10M Y 15M de NaOH curadas durante 28 y 35 días estas con una relación sólido líquido de 1 a 5, estas luego pasan por ensayos mecánicos y análisis instrumentales como DRX, TCLP y microscopia de barrido, con la data obtenida

se analiza los datos mediante análisis estadístico para modelar el comportamiento de la eflorescencia y la resistencia mecánica.

3.3.1. Caracterización física de los relaves y Ceniza Volante.

Con las muestras de relave minero y Ceniza Volante se procederá a hacer la caracterización física de los relaves mineros y Ceniza Volante.

3.3.2. Caracterización Granulométrica

Los relaves recolectados estarán en forma semilíquida por lo que se secará la muestra de relave, luego esta pasará a ser cuarteada para tomar una muestra significativa de los relaves y esta muestra significativa pasará por análisis granulométrico por tamizaje para caracterizar el tamaño de partícula promedio de los relaves este procedimiento esta referenciado bajo normativa ASTM D 422-63, estas muestras se estudiarán a la par por un laboratorio especializado para contrastar los datos obtenidos.

3.3.3. Caracterización de la Gravedad específica.

Las muestras pasarán a ser estudiadas por el método del picnómetro bajo la normativa ASTM D 854-10 y así conocer su gravedad específica se tomará una muestra para ser estudiada a la par por un laboratorio especializado.

3.3.4. Caracterización de la Humedad

Se caracterizará la muestra bajo la normativa ASTM D-2216, MTC E 108-2000 en la cual se tomará la semiseca y seca de los relaves para caracterizar la humedad de la muestra de relave.

3.3.5. Caracterización mediante Análisis EDAX

La muestra representativa previamente secada cuarteada es analizada mediante análisis EDAX para conocer los porcentajes de elementos presentes en la muestra de relave.

3.3.6. Caracterización Mediante Análisis TCLP

Las muestras representativas suelo inoculado previamente secado y cuarteado caracterizará mediante análisis de lixiviados TCLP MA1089 EPA 1311, esta muestra debe ser enviada a un laboratorio especializado para contrastar los datos obtenidos.

3.3.7. Caracterización Mediante DRX

Se caracterizará la muestra representativa del relave previamente secado y cuarteado, mediante difractor de rayos x para evaluar las fases mineralógicas de los suelos

3.3.8. Caracterización morfológica mediante microscopia (MEB)

Se caracterizará la muestra representativa del relave previamente secado y cuarteado, mediante microscopio electrónico de barrido (MEB) conocer la morfología del relave.

3.3.9. Elaboración de los Morteros

Se elaboran mezclas están compuestas por relaves y un activador NaOH, serán compactadas en moldes de 10x10 cm, estos serán curados durante 28 y 35 días con la finalidad de comparar los tratamientos.

3.3.10. Relaciones Molares para $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3\text{-NaO/SiO}_2\text{-NaO/Al}_2\text{O}_3$

Con la información recabada de los análisis instrumentales se puede conocer la composición química de los relaves y cenizas volantes esta data se trata mediante sus relaciones molares para calcular el sodio libre.

3.3.11. Ensayo de resistencia a la compresión

Luego de curado el material sintetizado pasará a ser analizado mediante ensayos destructivos de los morteros basados en relaves mineros bajo la normativa ISO 1920-4.

3.3.12. Pesado de la Efluorescencia

Las sales presentes en los morteros serán pesadas para evaluar su relación entre peso y resistencia del material.

3.3.13. Caracterización de la Densidad

Se calculará la densidad relativa teniendo el peso de los morteros y el volumen definido de los morteros.

3.3.14. Caracterización de la Humedad

Se caracterizará la muestra tomando en cuenta la normativa ASTM D-2216.

3.3.15. Caracterización Organoléptica

Se caracterizará organolépticamente el color el olor y la textura de los morteros basados en relaves mineros.

3.3.16. Caracterización Mediante Análisis TCLP

Los restos de los mejores tratamientos de suelos frente a los ensayos de resistencia a la compresión se analizarán mediante análisis TCLP (Toxicity characteristic leaching procedure) (MA1089 EPA 1311), esta muestra debe ser enviada a un laboratorio especializado para contrastar los datos obtenidos.

3.3.17. Caracterización morfológica mediante microscopio electrónico de barrido (MEB)

Los restos de los mejores tratamientos de suelos frente a los ensayos de resistencia a la compresión se analizarán mediante microscopía electrónica de barrido (MEB) para poder observar los cristales de geopolímero.

3.3.18. Caracterización Mediante DRX

Los restos de los mejores tratamientos de relaves frente a los ensayos de resistencia a la compresión se analizarán mediante análisis difracción de rayos x para conocer las fases mineralógicas del geopolímero formado en base a relaves mineros.

3.3.19. Ensayos mecánicos y caracterización del geopolímero

Se realizarán los ensayos destructivos de los morteros basados en relaves mineros bajo la normativa ISO 1920-4 y NTP 399.602.

3.4. MATERIALES E INSTRUMENTOS

- ✓ Lampas 4 unidades.
- ✓ Guantes de cuero 4 pares.
- ✓ Guantes de látex 1 caja.
- ✓ Bandejas de metal medianas 5 unidades.
- ✓ Bandeja de metal grandes 2 unidades.
- ✓ Hidróxido de sodio.
- ✓ Moldes para probetas.
- ✓ Respirador 2 unidades.
- ✓ Paquete de mascarillas faciales 4 cajas.
- ✓ Hidróxido de potasio.
- ✓ Mandiles de laboratorio 6 unidades.
- ✓ Mamelucos 3.
- ✓ Zapatos de seguridad.
- ✓ Baldes grandes.
- ✓ Baldes pequeños.
- ✓ Carretillas.
- ✓ Sogas.
- ✓ Envases de plástico con tapa.
- ✓ Alcohol.
- ✓ Fiola 100 mL.
- ✓ Fiola 250 mL.
- ✓ Fiola 1000 mL.
- ✓ Probeta 1000 mL.
- ✓ Probeta 250 mL.
- ✓ Probeta 100 mL.
- ✓ Vaso precipitado 50, 100 y 600 mL.
- ✓ Pipeta 5 mL.
- ✓ Pipeta 10 mL.
- ✓ Bagueta.
- ✓ Matraz Erlenmeyer 100, 250 y 600 mL.

- ✓ Mortero.
- ✓ Cascos.
- ✓ Botas de caucho.
- ✓ Lentes de seguridad.
- ✓ Mantas plásticas.
- ✓ Cuadernos.
- ✓ Paquete de hojas.
- ✓ Caja de plumones, lapiceros, lápices y correctores.
- ✓ Archivadores.
- ✓ Paquete de fólderes.
- ✓ Agendas.

3.5. TRATAMIENTO DE DATOS

Una vez concluida la caracterización física, química morfológica y mineralógica de los relaves mineros se elaborará una base de datos la cual nos permitirá realizar un diseño experimental para la elaboración de morteros en base a los relaves mineros.

Prueba ANOVA

Es una herramienta fundamental para examinar cómo uno o más factores, cada uno con dos o más niveles, afectan la media de una variable, Por lo tanto, si se desea comparar las medias de dos o más grupos, debe utilizar esta prueba estadística. Este método puede aplicarse de manera más amplia para investigar las posibles influencias en la varianza de una variable.

La hipótesis nula en la que se basan los distintos tipos de ANOVA sostiene que la mediana de la variable estudiada es la misma en todos los grupos, frente a la hipótesis alternativa de que al menos dos medianas difieren significativamente. ANOVA permite múltiples comparaciones de medianas, pero lo hace analizando las varianzas.

Calcular el promedio de cada grupo en el proceso fundamental de ANOVA implica comparar la varianza de estos promedios (varianza explicada por la

variable de grupo, intervarianza) con la varianza promedio dentro de los grupos (la que no se explica por la variable de grupo, intravarianza). La varianza ponderada entre grupos será igual a la varianza promedio dentro del grupo bajo la hipótesis nula, que establece que todas las observaciones en los distintos grupos se extraen de la misma población y tienen la misma media y varianza. La variación entre las medias crecerá y dejará de ser igual a la varianza media dentro de los grupos a medida que las medias de los grupos se vuelvan más diferentes entre sí.

Prueba de comparación de múltiples medias

Las comparaciones múltiples de las medias permiten examinar cuáles medias son diferentes y estimar el grado de diferencia. Se evaluará la significancia estadística de las diferencias entre las medias usando un conjunto de intervalos de confianza, un conjunto de pruebas de hipótesis o ambos. Los intervalos de confianza permiten evaluar la significancia práctica de las diferencias entre las medias, además de la significancia estadística. Como es habitual, la hipótesis nula de no diferencia entre medias se rechaza si y solo si el intervalo de confianza no contiene el cero.

Regresión Lineal Múltiple

El método estadístico llamado regresión lineal se usa para investigar las causas de los eventos o las teorías principales detrás de ciertos fenómenos. A partir de este método se puede determinar:

- Determinar si las variables independientes (explicativas) contribuyen a la explicación de una variable dependiente (resultado).
- Contrastar y examinar modelos explicativos.
- Predecir valores de una variable, o predecir aproximadamente un comportamiento o estado basado en atributos específicos.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

4.1. RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN DE LOS RELAVES

Inicialmente los relaves muestreados presentan propiedades semiacuosas debido a que la muestra se tomó in situ de los canales de relaves que se dirigen a quebrada Honda por lo que sus propiedades iniciales se escriben en la Tabla 3.

Tabla 3

Propiedades físicas iniciales en los relaves mineros

Característica	Unidad
Densidad de la pulpa en los relaves.	1,59 g/cm ³
% sólidos en peso	57,88 %
Dilución	0,73

Se observa una alta disolución por lo que se secó al aire libre para poder manipularlo mejor.

4.2. RESULTADOS DE LA HUMEDAD EN RELAVES MINEROS Y CENIZAS VOLANTES

Se puede ver los resultados de la humedad de los relaves mineros y cenizas volantes en la Tabla 4.

Tabla 4

Resultados de la humedad en relaves mineros y cenizas volantes.

Muestra	Humedad %
Relaves mineros (MT)	11,19 %
Cenizas volantes (FA)	16,20 %

Estos parámetros de humedad en zonas costeras del sur del Perú como Tacna, que fue un lugar de experimentación, muestran altos porcentajes de humedad con normalidad.

4.3. Resultados del Análisis Granulométrico de los Relaves Mineros y Cenizas Volantes

Resultados del Análisis Granulométrico de los Relaves Mineros: El análisis granulométrico descrito en la Figura 4 muestra que los relaves tienen un tamaño de partícula fina que está por debajo de la abertura de 106 μm , para las cenizas volantes se observa un tamaño de partícula por debajo de 60 μm . se observa en la figura 4.

Figura 4

Análisis granulométrico de relaves mineros.

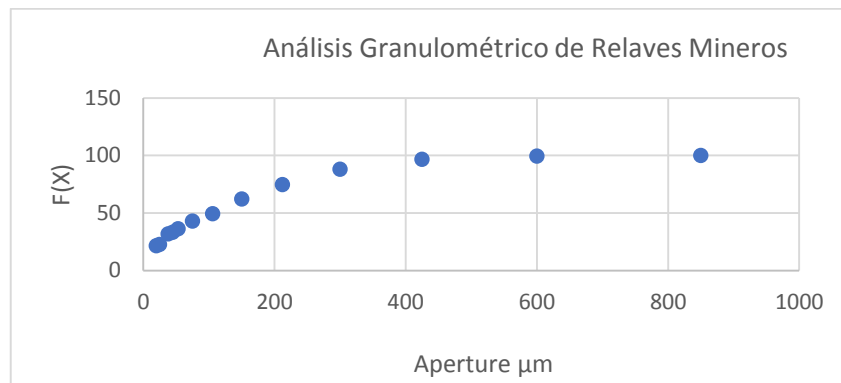
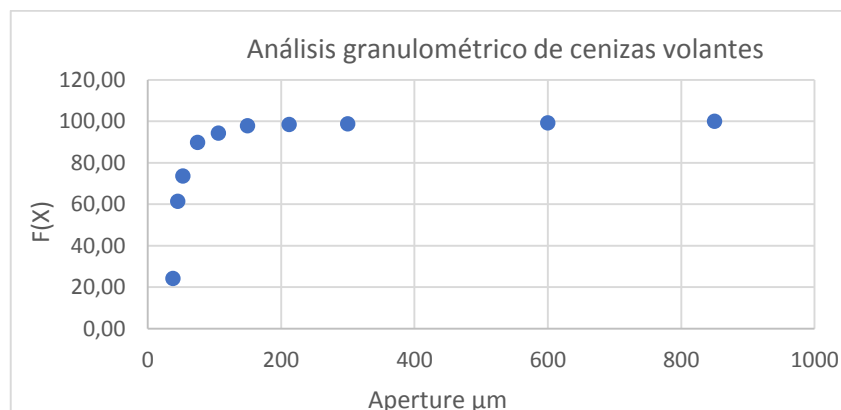


Figura 5

Análisis granulométrico para cenizas volantes.



4.4. RESULTADOS DEL ANÁLISIS EDAX PARA RELAVES Y CENIZAS VOLANTES

El Análisis EDAX para relaves mineros y cenizas volantes demuestra la alta presencia de aluminosilicatos con un 53,39 % de dióxido de silicio y 20,44 % de alúmina para la formación de geopolímeros que se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5

Resultados del análisis EDAX para relaves y cenizas volantes

Muestra	Composición %	Fórmula
Relaves mineros (MT)	2,05	MgO
	20,44	Al ₂ O ₃
	53,39	SiO ₂
	8,81	SO ₃
	6,97	K ₂ O
	2,71	CaO
	5,63	FeO
Cenizas volantes (FA)	5,25	Na ₂ O
	1,53	MgO
	22,11	Al ₂ O ₃
	51,76	SiO ₂
	2,58	SO ₃
	2,67	K ₂ O
	4,63	CaO
	9,47	FeO

4.5. RESULTADOS MICROSCOPIA (MEB)

Los resultados del análisis micrográfico para la muestra de ceniza volante se muestran a 100 x y 1500 x aumentos, observándose estructuras globulares propias de las cenizas volantes como se observa en la Figura 6.

Los resultados del análisis micrográfico para la muestra de relave mineros se muestran a 100 x y 1500x aumentos, observándose estructuras tetragonales de base triangular propia de los silicatos presentes en el relave minero como se observa en la Figura 7.

Figura 6

Cenizas volantes a 100 x y 1500 x

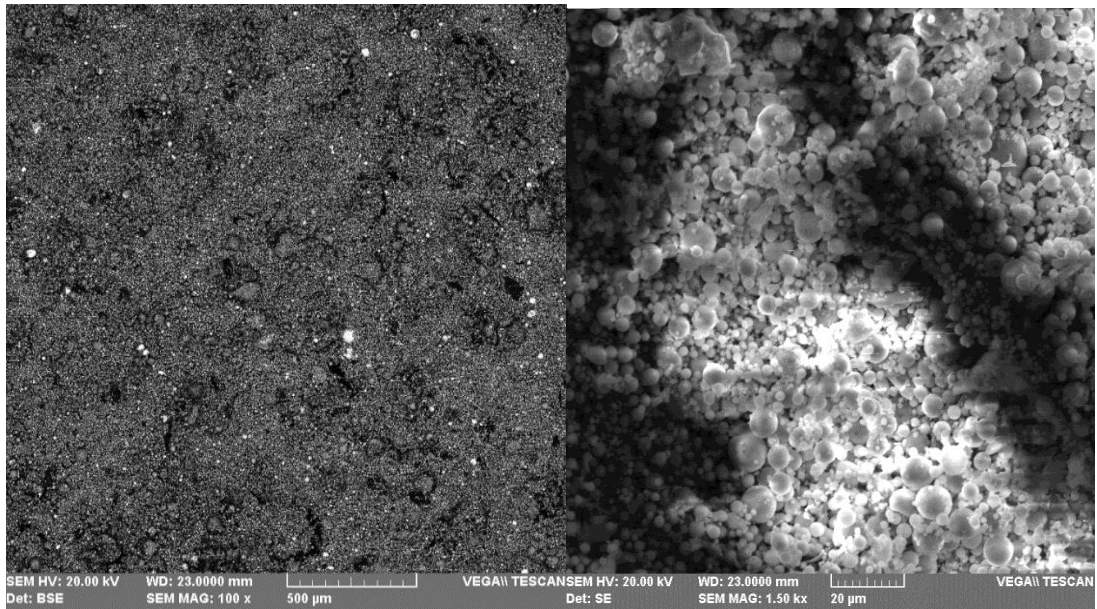
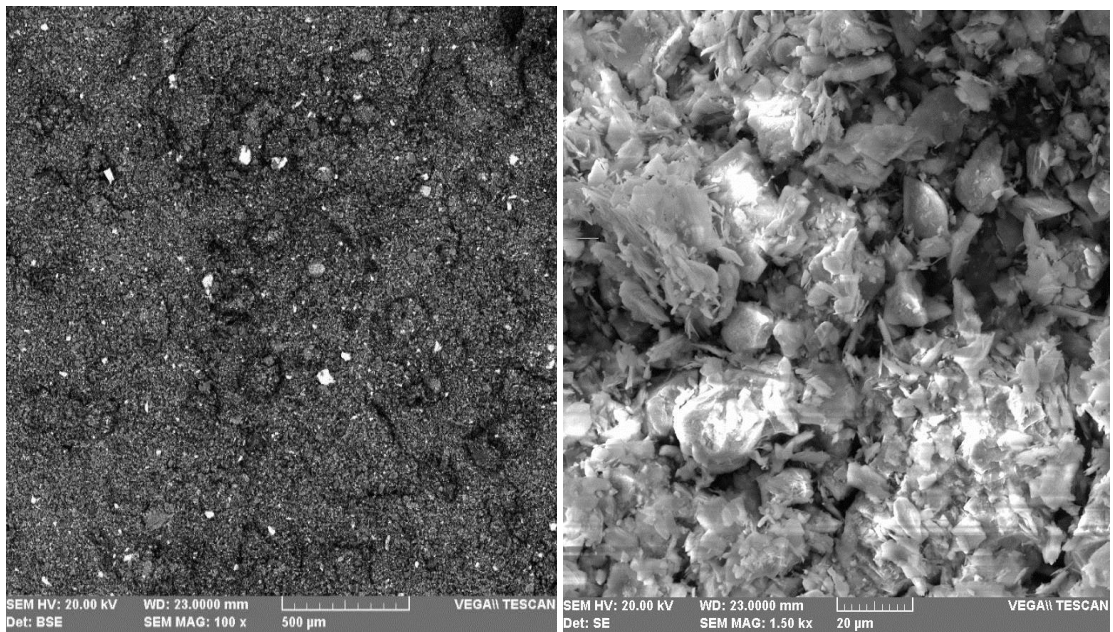


Figura 7

Relave minero a 100 x y 1500 x



4.6. ANÁLISIS DE DIFRACTÓMETRO DE RAYOS X (XRD)

El análisis de difracción de rayos X denota las fases mineralógicas presentes en los relaves mineros, cenizas volantes y muestras de eflorescencias denotadas en la Tabla 6.

Tabla 6

Resultados del análisis (XRD) para relaves mineros, cenizas volantes y eflorescencias.

Muestra	Nombre del mineral	Fórmula general	% aproximado
Relaves mineros	Óxido de silicio	SiO ₂	61
	Moscovita	K Si ₃ Al ₃ O ₁₂	37
	Clorita	Mg _{9,17} Fe _{1,02} Al _{3,46} Si _{6,35} O ₃₆	2
Cenizas volantes	Óxido de silicio	SiO ₂	81
	Óxido de magnesio Hierro	Fe _{1.8966} Mg _{0.1331} O ₃	5
	Óxido de silicio aluminio	Al ₂ (SiO ₄)O	14
Eflorescencia	Óxido de silicio	SiO ₂	28,5
	Thenardita	Na ₂ SO ₄	27,8
	Moscovita	K _{2,40} Na _{1,48} Al _{11,20} Ti _{0,08} Fe _{0,40} Mg _{0,16} Si _{12,16} O _{48,0}	43,7

Difractograma correspondiente a las fases mineralógicas presentes en la Eflorescencia. El análisis en difracción de rayos X denota alto contenido de silicato y alúmina estructural en las muestras de Relaves Mineros y Cenizas Volantes, evidenciando fases de Moscovita y clorita para los relaves mineros, para las cenizas volantes hay una presencia elevada de Óxido de Magnesio Hierro y Óxido de Silicio Aluminio, las fases estructurales mineralógicas en la Eflorescencia se denotan en la Tabla 6 y Figura 8, evidenciando como componentes principales el moscovita y la thenardita.

Figura 8

Difractograma correspondiente a las fases mineralógicas presentes en la Eflorescencia.

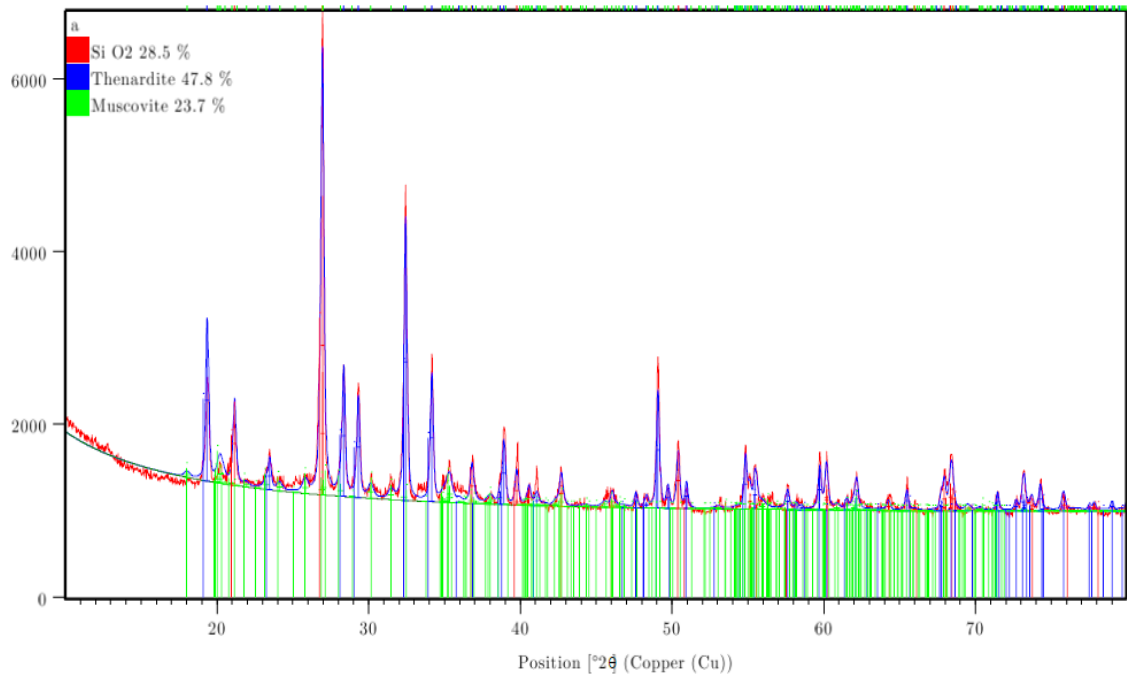


Tabla 7

Resultados relaciones molares para $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3\text{-NaO}/\text{SiO}_2\text{-NaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$

Mezcla	RELAVE	CENIZA	METACAOLIN	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	SiO ₂ /Al ₂ O ₃	Na ₂ O/SiO ₂
#	%	%	%	%	%	%		
M1	70	30	0	53,50	21,83	1,49	3,94	0,074
M2	40	60	0	53,73	21,81	2,51	3,96	0,074
M3	60	30	10	56,27	19,64	1,44	4,61	0,082
M4	30	60	10	56,51	19,62	2,47	4,63	0,082
M5	60	37,5	2,5	54,25	21,28	1,73	4,10	0,076
M6	45	52,5	2,5	54,37	21,27	2,24	4,11	0,075
M7	55	37,5	7,5	55,64	20,19	1,71	4,43	0,080
M8	40	52,5	7,5	55,75	20,17	2,21	4,45	0,081
M9	55	45	0	53,62	21,82	1,20	3,95	0,074
M10	65	30	5	54,89	20,74	1,46	4,26	0,078
M11	35	60	5	55,12	20,72	2,49	4,28	0,078
M12	45	45	10	56,39	19,63	1,95	4,62	0,082
M13	50	45	5	55,00	20,73	1,98	4,27	0,078
M14	30	70	0	53,81	21,80	2,85	3,97	0,074

4.7 RESULTADOS RELACIONES MOLARES PARA $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3\text{-NaO/SiO}_2$

La Tabla 7 evidencia las relaciones molares basados en los resultados del análisis EDAX los cuales demuestran la cantidad en porcentaje de sodio muestra rangos para $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ de 3,94 a 4,63 y para NaO/SiO_2 de entre 0,074 a 0,082, encontrándose las relaciones molares para la mejor resistencia la muestra M7 compuesta por 55 % de Relave Minero ,37.5 % Cenizas Volantes y 7.5 % de Metacaolín relaciones Molares de 4,43 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ y 0,080 para NaO/SiO_2 .

4.8. ENSAYOS DE RESISTENCIA MECÁNICA DEL GEOPOLÍMERO FORMADO

Para realizar los ensayos de resistencia mecánica y análisis instrumentales primero se formuló las mezclas entre el relave minero las cenizas volantes y el metacaolín, expresados en la Tabla 8, estas mezclas fueron activadas a diferentes molaridades (1 M, 5 M,10 M y 15 M) de NaOH y curadas a 28 días a temperatura ambiente anexo 2,3,4,5 y 6, posteriormente se curaron a 35 días y a 10 M el mejor grupo para optimizar el rendimiento de resistencia y peso de eflorescencia.

Se evidencia en la Figura 9 y Tabla 9 la presencia Eflorescencia en mezclas activadas a 1 M, las cuales en peso son elevadas presentando valores entre 20 g y 15 g de sales esto afectando gravemente al material presentando resistencias mecánicas muy bajas de entre 1,07 Mpa y 3,18 Mpa.

Se evidencia en la Figura 10 y Tabla 9 la presencia de eflorescencia en mezclas activadas a 5 M, las cuales en peso son elevadas presentando pesos de eflorescencia de entre 12,05 g y 17,10 g, presentando resistencias mecánicas de entre 1,87 Mpa y 5,57 Mpa.

Se evidencia en la Figura 11 y Tabla 9 la presencia de eflorescencia en mezclas activadas a 10 M, las cuales en peso presenta rangos de entre 1.95 g y 8.50 g de eflorescencia mejorando en las propiedades mecánicas, las cuales presentan rangos de entre 7,74 Mpa y 14,08 Mpa.

Se evidencia en la Figura 12 y Tabla 9 la presencia de eflorescencia en mezclas activadas a 15 M las cuales en peso presenta rangos de entre 2,9 g y 7,55 g de eflorescencia mejorando en las propiedades mecánicas las cuales presentan rangos de entre 3,73 Mpa y 13,52 Mpa. Luego se optimizó la mejor corrida a 10 M durante 35 días evidenciándose en la Figura 13 y Tabla 9 la presencia de eflorescencia en mezclas activadas a 10 M, las cuales en peso presenta rangos de entre 0,005 g y 1.5 g de eflorescencia mejorando en las propiedades mecánicas las cuales presentan rangos de entre 7,67 Mpa y 24,6 Mpa.

Tabla 8

Mezclas formuladas entre Relave, Ceniza Volante y Metacaolín

Mezclas	Relave (%)	Ceniza Volante (%)	Metacaolín (%)
M-1	0,700	0,300	0,000
M-2	0,400	0,600	0,000
M-3	0,600	0,300	0,100
M-4	0,300	0,600	0,000
M-5	0,600	0,375	0,025
M-6	0,450	0,525	0,025
M-7	0,550	0,375	0,075
M-8	0,400	0,525	0,075
M-9	0,550	0,450	0,000
M-10	0,650	0,300	0,005
M-11	0,350	0,600	0,005
M-12	0,450	0,450	0,010
M-13	0,500	0,450	0,005
M-14	0,300	0,700	0,000

Figura 9

Eflorescencia presente en el mortero geopolimérico activado a 1 M curado a 28 días.



Figura 10

Eflorescencia presente en el mortero geopolimérico activado a 5 M curado a 28 días.



Figura 11

Eflorescencia presente en el mortero geopolimérico activado a 10 M curado a 28 días.



Figura 12

Eflorescencia presente en el mortero geopolimérico activado a 15 M curado a 28 días.



Figura 13

Eflorescencia presente en el mortero geopolimérico activado a 10 M curado a 35 días.



Tabla 9

Resistencia mecánica del geopolímero Formado en morteros a los 28 y 35 días de curado / Presencia de eflorescencia.

Mezclas	R-1M (MPa)	P.E. (g) 1M	R -5M (MPa)	P.E. (g) 5M	R -10 M (MPa)	P.E. (g) 10 M	R-15M (MPa)	P.E.(g) 15M	R-10 M-35 Días (MPa)	P.E.(g) R-10 M-35 Días
M-1	1,45	17	2,9	15,2	10,58	5,20	7,33	6,8	12,8	1,3
M-2	1,16	19,5	1,98	16,57	6,19	7,25	5,67	7,55	10,34	1,9
M-3	1,07	20,4	4,42	14,8	13,42	2,55	12,99	2,55	23,62	0,01
M-4	1,24	18	1,9	17,2	7,74	7,25	6,85	7,2	11,52	1,5
M-5	2,73	15,85	5,08	12,25	12,3	3,55	13,52	2,25	21,43	0,06
M-6	2,29	16,57	3,83	15,35	11,57	4,20	11,7	3,1	21,02	0,08
M-7	2,82	16	5,57	12,05	14,08	1,95	12,87	2,7	24,6	0,005
M-8	2,21	16,86	3,72	15,80	11,74	4,00	11,88	3,8	19,2	0,2
M-9	1,61	16,35	3,76	15,81	12,23	3,70	12,37	2,9	14,26	0,5
M-10	3,18	15	4,68	13,25	13,56	2,35	12,63	2,8	23,06	0,03
M-11	1,47	17,25	3,48	15,55	9,68	6,10	9,79	5,2	18,4	0,1
M-12	1,32	17,85	3,72	15,35	11,54	3,90	11,67	3,05	23,42	0,01
M-13	2,64	16,65	3,43	15,65	11,71	3,70	11,25	3,4	19,44	0,1
M-14	1,11	20	1,87	17,10	4,19	8,50	3,73	8,9	7,67	2,5

4.9. RESULTADOS ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA COMPARACIÓN DE LAS MUESTRAS PARA LOS PESOS DE EFLORESCENCIA

La Tabla 9 representa el resultado de la resistencia mecánica para cada mezcla del geopolímero expresado en MPa y la Eflorescencia en peso en g donde:

PE: Peso de la sal de eflorescencia

R-1M-28: Resistencia del geopolímero activado en solución de 1M de NaOH, curado a 28 días.

R -5M-28 Días: Resistencia del geopolímero activado en solución de 5 M de NaOH, curado a 28 días.

R -10 M-28 Días: Resistencia del geopolímero activado en solución de 10 M de NaOH, curado a 28 días.

R-15 M-28 Días: Resistencia del geopolímero activado en solución de 15 M de NaOH, curado a 28 días.

R-10 M-35: Días Resistencia del geopolímero activado en solución de 10 M de NaOH, curado a 35 días.

Muestra 1: PE 1 M

Muestra 2: PE 5 M

Muestra 3: PE 10 M

Muestra 4: PE 15 M

Muestra 5: PE 10 M 35D

Muestra 1: 14 valores en el rango de 15,0 a 20,4

Muestra 2: 14 valores en el rango de 12,05 a 17,2

Muestra 3: 14 valores en el rango de 1,95 a 8,5

Muestra 4: 14 valores en el rango de 2,25 a 8,9

Muestra 5: 14 valores en el rango de 0 a 2,5

Tabla 10

Resumen Estadístico PE

	Recuento	Promedio	Desviación Estándar	Coefficiente de Variación	Mínimo	Máximo
PE 1M	14	17,3771	1,60948	9,26207%	15,0	20,4
PE 5 M	14	15,1379	1,59621	10,5445%	12,05	17,2
PE 10 M	14	4,58571	1,99773	43,5643%	1,95	8,5
PE 15 M	14	4,44286	2,23614	50,3312%	2,25	8,9
PE10 M a 35D	14	0,592143	0,841804	142,162%	0	2,5
Total	70	8,42714	6,84514	81,2273%	0	20,4

La Tabla 10 muestra varios estadísticos para cada una de las 5 columnas de datos que representan los datos de pesos de la eflorescencia para probar diferencias significativas entre las medias de las columnas.

Tabla 11

ANOVA para PE

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	3040,16	4	760,041	256,11	0,0000
Intra grupos	192,897	65	2,96764		
Total (Corr.)	3233,06	69			

La Tabla 11 muestra el análisis de ANOVA, puesto que el valor-P de la prueba-F es menor que 0.05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las 5 variables con un nivel del 95.0 % de confianza.

Tabla 12

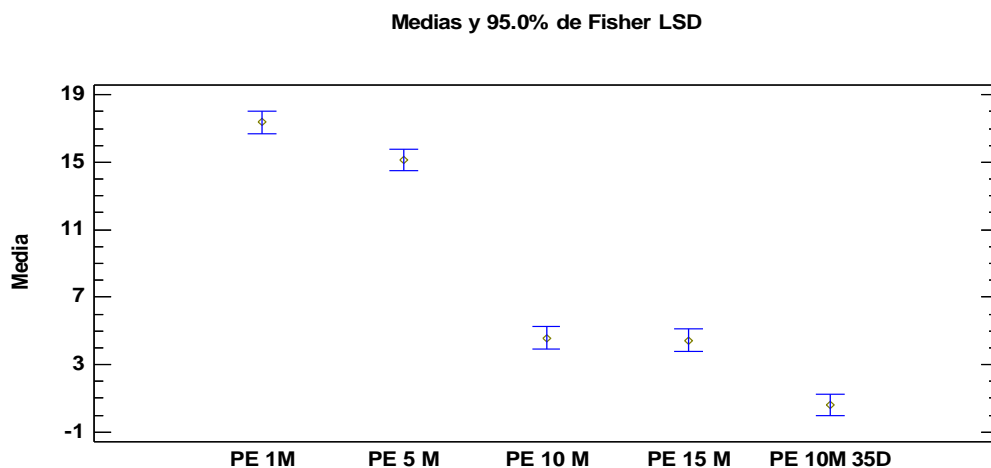
Medias con intervalos de confianza del 95,0 %

	Casos	Media	Error Est. (s agrupada)	Límite Inferior	Límite Superior
PE 1 M	14	17,3771	0,460407	16,727	18,0273
PE 5 M	14	15,1379	0,460407	14,4877	15,788
PE 10 M	14	4,58571	0,460407	3,93553	5,2359
PE 15 M	14	4,44286	0,460407	3,79267	5,09304
PE 10 M 35D	14	0,592143	0,460407	-0,0580403	1,24233
Total	70	8,42714			

La tabla 12 muestra la media para cada columna de datos, también muestra el error estándar de cada media, el cual es una medida de la variabilidad de su muestreo. La tabla también muestra un intervalo alrededor de cada media. Los intervalos mostrados actualmente están basados en el procedimiento de la diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher observados en la Figura 14.

Figura 14

Gráfico de medias y 95% de Fisher LSD



El método LSD de Fisher utiliza la tasa de error individual y varias comparaciones para calcular el nivel de confianza simultáneo para todos los intervalos de confianza. Este nivel de confianza simultáneo es la probabilidad de

que todos los intervalos de confianza contengan la diferencia verdadera, por lo que se observa niveles diferenciados en la formación de eflorescencia en base de la molaridad de la solución activante, el cual junto con la prueba de Kruskal-Wallis evalúa la hipótesis nula de que las medianas dentro de cada una de las 5 columnas es la misma. Puesto que el valor-P es menor que 0,05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95.0 % de confianza observándose en la Tabla 13 y la Figura 15.

Tabla 13

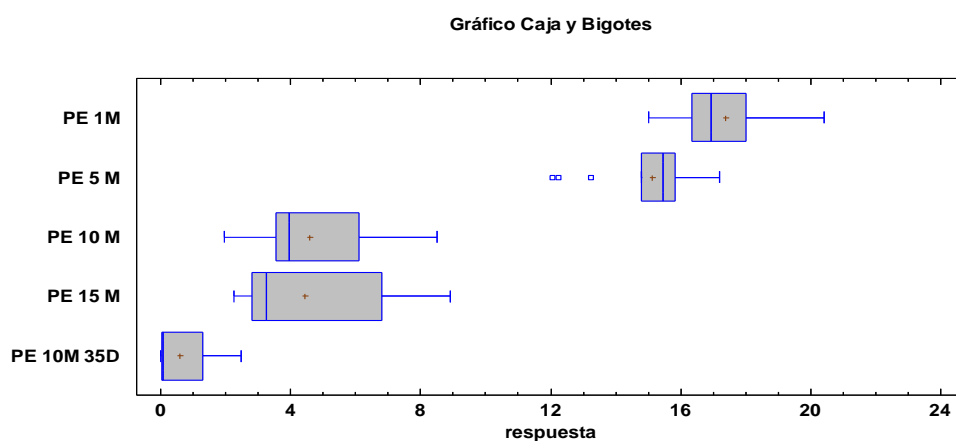
Prueba de Kruskal-Wallis

	Tamaño de Muestra	Rango Promedio
PE 1 M	14	61,5357
PE 5 M	14	51,4643
PE 10 M	14	29,2143
PE 15 M	14	27,5714
PE 10 M 35D	14	7,71429

Estadístico = 61,0948 Valor-P = 1,70763E-12

Figura 15

Gráfico de cajas y bigotes para PE



4.10. RESULTADOS ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA COMPARACIÓN DE LAS MUESTRAS PARA LA RESISTENCIA DEL GEOPOLÍMERO

Comparación de Varias Muestras

Muestra 1: R-1M-28D

Muestra 2: R-5M-28D

Muestra 3: R-10 M-28D

Muestra 4: R-15 M-28D

Muestra 5: R-10 M-35D

Muestra 1: 14 valores en el rango de 1,07 a 3,18

Muestra 2: 14 valores en el rango de 1,87 a 5,57

Muestra 3: 14 valores en el rango de 4,19 a 14,08

Muestra 4: 14 valores en el rango de 3,73 a 13,52

Muestra 5: 14 valores en el rango de 7,67 a 24,6

Tabla 14

Resumen Estadístico

	Recuento	Promedio	Desviación Estándar	Coficiente de Variación	Mínimo	Máximo
R-1M-28D	14	1,87857	0,737312	39,2485%	1,07	3,18
R-5M-28D	14	3,59571	1,14548	31,8569%	1,87	5,57
R-10M-28D	14	10,7521	2,88185	26,8026%	4,19	14,08
R-15M-28D	14	10,3036	3,12243	30,3043%	3,73	13,52
R-10 M-35D	14	17,9129	5,56762	31,0817%	7,67	24,6
Total	70	8,88857	6,54832	73,6713%	1,07	24,6

La Tabla 14 muestra varios estadísticos para cada una de las 5 columnas de datos que representan los datos de las resistencias para probar diferencias significativas entre las medias de las columnas.

Tabla 15

ANOVA para la resistencia del geopolímero.

Fuente	Suma de Cuadrados	de Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	2296,94	4	574,236	56,40	0,0000
Intra grupos	661,815	65	10,1818		
Total (Corr.)	2958,76	69			

La Tabla 15 muestra el análisis de ANOVA, denotando la razón-F, que en este caso es igual a 56,3984, es el cociente entre el estimado entre - grupos y el estimado dentro-de-grupos. Puesto que el valor-P de la prueba-F es menor que 0,05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las 5 variables con un nivel del 95.0 % de confianza.

Tabla 16

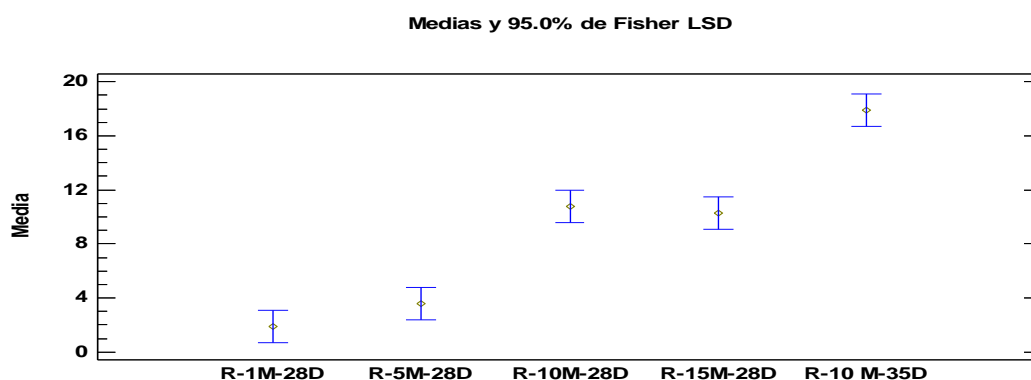
Tabla de Medias con intervalos de confianza del 95.0 %

	Casos	Media	Error Est. (s agrupada)	Límite Inferior	Límite Superior
R-1 M-28D	14	1,87857	0,852801	0,674253	3,08289
R-5 M-28D	14	3,59571	0,852801	2,3914	4,80003
R-10 M-28D	14	10,7521	0,852801	9,54782	11,9565
R-15 M-28D	14	10,3036	0,852801	9,09925	11,5079
R-10 M-35D	14	17,9129	0,852801	16,7085	19,1172
Total	70	8,88857			

La Tabla 16 muestra la media para cada columna de datos, también muestra el error estándar de cada media, el cual es una medida de la variabilidad de su muestreo. La tabla también muestra un intervalo alrededor de cada media. Los intervalos mostrados actualmente están basados en el procedimiento de la diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher observados en la Figura 16.

Figura 16

Gráfico de medias y 95% de Fisher LSD



El método LSD de Fisher utiliza la tasa de error individual y varias comparaciones para calcular el nivel de confianza simultáneo para todos los intervalos de confianza, por lo que se observa niveles diferenciados en la resistencia del geopolímero en base de la molaridad de la solución activante, el cual junto con la prueba de Kruskal-Wallis evalúa la hipótesis nula. Puesto que el valor-P es menor que 0,05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medianas con un nivel del 95,0 % de confianza observándose en la Tabla 17 y la Figura 17.

Tabla 17

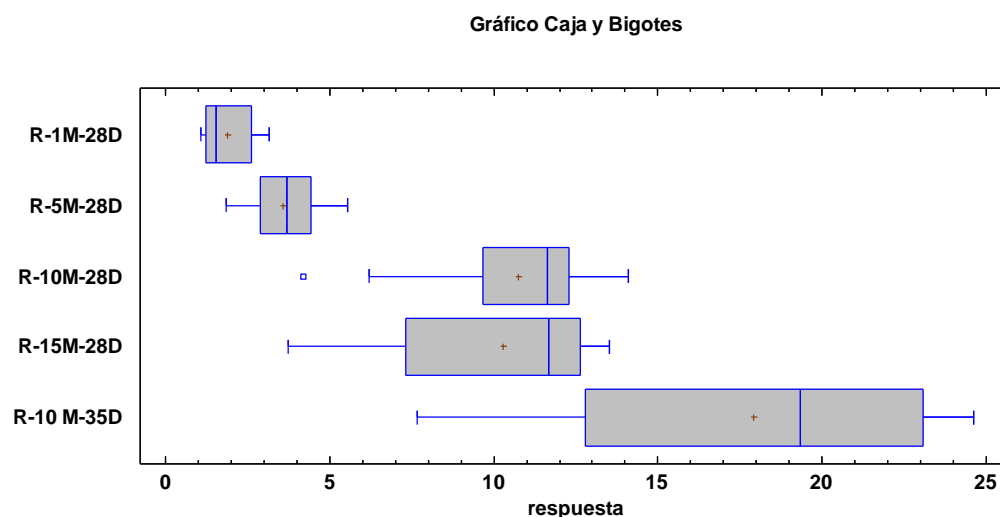
Prueba de Kruskal-Wallis

	Tamaño de Muestra	Rango Promedio
R-1M-28D	14	8,85714
R-5M-28D	14	20,8571
R-10M-28D	14	45,0
R-15M-28D	14	43,8571
R-10 M-35D	14	58,9286

Estadístico = 55,2092 Valor-P = 2.93698E-11

Figura 17

Gráfico de cajas y bigotes para resistencia del geopolímero



4.11. COMPARACIÓN DE LÍNEAS DE REGRESIÓN RESISTENCIA – EFLORESCENCIA (R-10 M-35D vs. PE 10 M 35D)

Variable dependiente: R-10 M-35D

Variable independiente: PE 10 M 35D

Códigos de Nivel: MEZCLAS

Número de casos completos: 14

Número de líneas de regresión: 14

Tabla 18

Análisis de Regresión Múltiple

Parámetro	Estimado	Error Estadístico		
		Estándar	T	Valor-P
CONSTANTE	21,5685	0,687924	31,3531	0,0000
PE 10 M 35D	-6,17364	0,684967	-9,01304	0,0000

El análisis de regresión múltiple permite entender la relación entre dos o más variables. Implica una variable explicada – la variable dependiente – y variables adicionales (las variables independientes) que se estiman producen o están asociadas con cambios de la variable dependiente, en la Tabla 18 y Tabla 19 se observa el p valor menor a 0,05 por lo que es estadísticamente significativo.

Tabla 19

Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	351,113	1	351,113	81,23	0,0000
Residuo	51,8664	12	4,3222		
Total (Corr.)	402,979	13			

R-Cuadrada = 87,1293 por ciento

R-Cuadrada (ajustada por g.l.) = 86,0567 por ciento

Error estándar del est. = 2,07899

Estadístico Durbin-Watson = 2,77058 (P=0,9334)

Autocorrelación residual de retardo 1 = -0,413338

La salida muestra el resultado de ajustar un modelo de regresión lineal para describir la relación entre R-10 M-35D, PE 10 M 35D y MEZCLAS. La ecuación del modelo ajustado es:

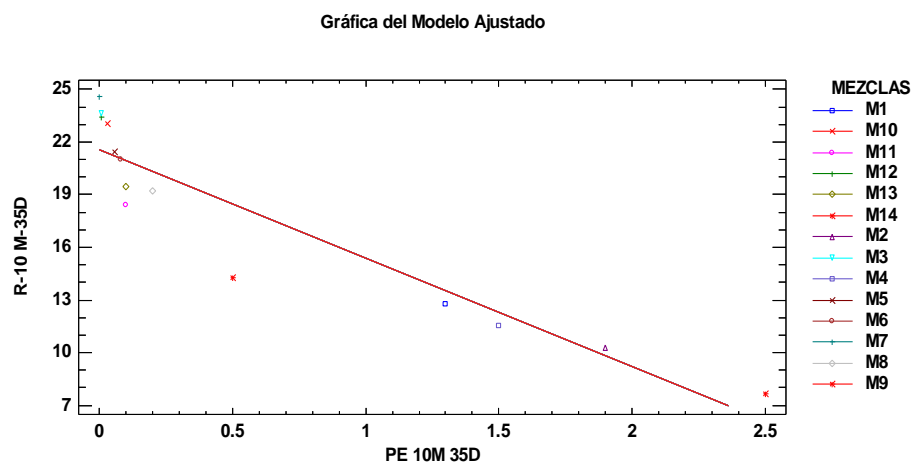
$$R-10 M-35D = 21,5685 - 6,17364 * PE 10 M 35D$$

Se observa en la Tabla 16 el valor-P de la tabla ANOVA es menor que 0.05, por lo que existe una relación estadísticamente significativa entre las variables, con un nivel de confianza del 95.0 %.

El estadístico R-Cuadrada ajustada indica que el modelo, así ajustado, explica 86,0567 % de la variabilidad en la resistencia del geopolímero a 35 días de curado a una molaridad de 10 M (R-10 M-35D). El estadístico de Durbin-Watson (DW) prueba los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en que se presentaron en su archivo de datos. Dado que el valor-P es mayor o igual que 0,05, no hay indicación de una posible correlación serial con un nivel de confianza del 95,0 %.

Figura 16

Gráfico del Modelo Ajustado.



La Figura 18 muestra el modelo ajustado, denotando la relación entre resistencia del geopolímero curado en solución activante de 10M a 35 días e

curado 10M (R- 10 M- 35 D) y el peso de eflorescencia PE, observándose una importante reducción de la resistencia del geopolímero a mayor formación en peso de eflorescencia.

4.12. RESULTADOS ANÁLISIS TCLP

Se evidencia en el anexo 7 que la muestra 1 y 2 compuestos por la mezcla M7 sin activar y activada con solución de NaOH a 10M durante 35 días de curado reducción significativa de contaminantes como Al, Ba, Ca, Pb, Ca y Cu.

CAPÍTULO V

DISCUSIÓN

La eflorescencia es un fenómeno natural del geopolímero causado por activadores basados en Na (Lv et al., 2020b), la formación de eflorescencias se observa de forma natural, esto mismo ocurre por el transporte de álcalis solubles, que son reactivos a la solubilización de agua en ella, estos álcalis son transportados por los poros formados reaccionando con el ambiente estos poros están relacionados con la cantidad de agua y la granulometría de los componentes (Najafi Kani et al., 2012; Z. Zhang et al., 2014a). Las condiciones iniciales donde se realizó el estudio donde se realizó el estudio presenta alta humedad, debido a las condiciones atmosféricas de la ciudad de Tacna Perú, teniendo en cuenta que los minerales de relaves mineros y cenizas volantes presentan una granulometría y entre $60\ \mu\text{m}$ y $106\ \mu\text{m}$, que no influye significativamente en la formación de poros (Z. Zhang et al., 2014a).

Las relaciones Molares presentes en las mezclas propuestas presentan valores de 4,43 para $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ y 0.080 para NaO/SiO_2 que comparándolos con el estudio de (Rodríguez et al., 2009) $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ de 3,0 y $\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$ de 0,25 presentan diferencias significativas, los cuales se van a ver reflejados por la diferencia de materiales como es el relave minero que presenta alta proporción de silicatos solubles, esto es uno de los principales factores de formación de eflorescencia debido a que al haber silicato soluble en abundancia este va a tender a reaccionar menos efectivamente en soluciones con baja molaridad presentando elevados pesos de eflorescencia y baja resistencia mecánica por lo que experimentalmente y estadísticamente mediante la comparación de medias y el modelamiento estadístico mediante regresión lineal múltiple se demostró que estos geopolímeros reaccionan mejor a tratamientos de 10 M.

Se ha encontrado que la eflorescencia está compuesta por el 28 % Óxido de silicio, 27,8 % Thenardita y 43 % Moscovita, minerales formados por las propiedades químicas iniciales de las materias primas, debido a la presencia de

sulfuros en el relave y sodio del activador se forma la thenardita y la Moscovita, esto influye en la alta formación de eflorescencia en soluciones de 1 M, 5 M y 15 M debido a que las mezclas a 1 M y 5 M por la elevada presencia de silicatos mucho de estos quedan sin reaccionar en forma de eflorescencia y en el caso de las mezclas de 15 molar la elevada cantidad de Na en la solución activadora hace que el material forme eflorescencia cuando se forma el geopolímero, estos datos son contrastados por (Z. Zhang et al., 2013, 2018).

Los geopolímeros son sensibles a las altas temperaturas de curado lo que disminuye la eflorescencia evitando la lixiviación del Na y silicatos (Škvára et al., 2009), en comparación este geopolímero se curó a temperatura ambiente durante 28 días y 35 días diferenciándose con (Vizureanu et al., 2021) que trabajan con una temperatura de curado de 85 °C durante 24 horas permitiendo obtener mayor resistencia mecánica de 70 Mpa en comparación este presente trabajo de investigación que obtuvo 24,6 Mpa.

La comparación de muestras a nivel estadístico expresa que las mejores resistencias mecánicas se encuentran cuando las mezclas son activadas en solución de 10 M evidenciándose por el análisis ANOVA, gráfico de medias y 95 % de Fisher LSD que muestran diferencias significativas en los tratamientos en relación al peso de eflorescencia y resistencia mecánica, detallándose en el modelamiento de regresión múltiple con un R^2 de 87,1293 % que expresa la relación antagonista entre aumento de resistencia y peso de eflorescencia.

La prueba TCLP evidencia reducción significativa de elemento contaminante como Al, Ba, Ca, Pb, Ca y Cu, para la muestra de mayor resistencia mecánica, denotando que el material geopolimérico basado en relaves mineros y termoeléctricos puede utilizarse como material de construcción sostenible.

CONCLUSIONES

1. Se determinó la relación antagónica entre la presencia de eflorescencia en los morteros basados en desechos mineros termoeléctricos mediante modelamiento estadístico, encontrando la mejor resistencia mecánica en la mezcla compuesta por 55 % de relave minero, 37,5 de ceniza volante y 7,5 de metacaolín presentando resistencia mecánica de 24,6 Mpa y un peso de eflorescencia de 0.005 g.
2. Mediante la comparación de muestras a nivel estadístico se pudo evidenciar la molaridad óptima del activador alcalino para evitar la eflorescencia presentando un valor de 10 M durante un tiempo de curado de 35 días, caracterizando la eflorescencia la cual está compuesta por 28 % Óxido de silicio, 27,8 % Thenardita y 43 % Moscovita.
3. La granulometría para las mezclas entre presenta valores entre 60 μm y 106 μm , lo que no afecta significativamente a la formación de eflorescencia, sin embargo, al presentar este tamaño de partícula es muy susceptible al activador que en molaridades bajas o muy altas tienden a formar eflorescencia.

RECOMENDACIONES

1. Para mejorar las propiedades del mortero basado en relaves mineros y termoeléctricos es recomendable aislar el mortero geopolimérico con una lámina plástica para evitar la interacción entre el mortero geopolimérico y el ambiente lo que permite reducir los efectos de la eflorescencia.
2. Para evitar la contaminación por los relaves mineros y cenizas volantes es necesario el uso de equipos de protección personal adecuados debido al tamaño de partícula fino es muy difusivo en el ambiente.
3. Es necesario realizar más convenios entre la universidad, la empresa privada y el estado peruano enfocados en la sustentabilidad y el tratamiento de residuos peligrosos como el relave minero y ceniza volante utilizando técnicas vanguardistas para su inclusión en la economía circular.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alves, L. (2019). A Quick Overview on Geopolymer Chemistry and General Properties. *Research & Development in Material Science*, 12. <https://doi.org/10.31031/RDMS.2019.12.000781>
- Amin, M., Elsakhawy, Y., Abu el-hassan, K., & Abdelsalam, B. A. (2022). Behavior evaluation of sustainable high strength geopolymer concrete based on fly ash, metakaolin, and slag. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e00976. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00976>
- Araya, N., Kraslawski, A., & Cisternas, L. A. (2020). Towards mine tailings valorization: Recovery of critical materials from Chilean mine tailings. *Journal of Cleaner Production*, 263, 121555. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121555>
- Azad, N. M., & Samarakoon, S. M. S. M. K. (2021). Utilization of Industrial By-Products/Waste to Manufacture Geopolymer Cement/Concrete. *Sustainability*, 13(2), 873. <https://doi.org/10.3390/su13020873>
- Baptista, A., Carneiro, A., & Parsekian, G. (2017). *ESTUDO SOBRE METODOLOGIAS PARA ENSAIO DE POTENCIAL DE EFLORESCENCIA*. <https://doi.org/10.17648/tecsic-2017-72134>
- Barrie, E., Cappuyns, V., Vassilieva, E., Adriaens, R., Hollanders, S., Garcés, D., Paredes, C., Pontikes, Y., Elsen, J., & Machiels, L. (2015). Potential of inorganic polymers (geopolymers) made of halloysite and volcanic glass for the immobilisation of tailings from gold extraction in Ecuador. *Applied*

Clay Science, 109–110, 95–106.
<https://doi.org/10.1016/j.clay.2015.02.025>

Bautista-Ruiz, W., Ortiz-Godoy, N., Agredo Diaz, D. G., & Ortiz, C. (2021). Caracterización de partículas metálicas extraídas de cenizas volantes de una planta termoeléctrica de Boyacá-Colombia. *Revista UIS Ingenierías*, 20. <https://doi.org/10.18273/revuin.v20n3-2021015>

Bellum, R. R., Muniraj, K., & Madduru, S. R. (2020). Influence of Activator Solution on Microstructural and Mechanical Properties of Geopolymer Concrete. *Materialia*, 10, 100659. <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2020.100659>

Blanco, J. M., & Peña, F. (2011). Incremento de la Eficiencia en Centrales Termoeléctricas por Aprovechamiento de los Gases de la Combustión. *Información Tecnológica*, 22(4), 15–22. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642011000400003>

Cano, Á., & Kunz, N. (2022). Large-scale and small-scale mining in Peru: Exploring the interface. *Resources Policy*, 76, 102530. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2021.102530>

Caribe, C. E. para A. L. y el. (2021). *Cambios en la demanda de minerales: Análisis de los mercados del cobre y el litio, y sus implicaciones para los países de la región andina*. CEPAL. <https://www.cepal.org/es/publicaciones/47136-cambios-la-demanda-minerales-analisis-mercados-cobre-litio-sus-implicaciones>

Chen, K., Wu, D., Xia, L., Cai, Q., & Zhang, Z. (2021). Geopolymer concrete durability subjected to aggressive environments – A review of influence

factors and comparison with ordinary Portland cement. *Construction and Building Materials*, 279, 122496. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122496>

Cristelo, N., Coelho, J., Oliveira, M., Cesar Consoli, N., Palomo, Á., & Fernández-Jiménez, A. (2020). Recycling and Application of Mine Tailings in Alkali-Activated Cements and Mortars—Strength Development and Environmental Assessment. *Applied Sciences*, 10(6), 2084. <https://doi.org/10.3390/app10062084>

Davidovits, J. (2005). Geopolymer chemistry and sustainable development. In *Proceedings of the World Congress Geopolymer* (p. 15).

Davidovits, J. (2008). *Geopolymer Chemistry and Applications*. Geopolymer Institute.

Davidovits, J. (2017). Geopolymers: Ceramic-like inorganic polymers. *Journal of Ceramic Science and Technology*, 8, 335–350. <https://doi.org/10.4416/JCST2017-00038>

de Oliveira, L. B., de Azevedo, A. R. G., Marvila, M. T., Pereira, E. C., Fediuk, R., & Vieira, C. M. F. (2022). Durability of geopolymers with industrial waste. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e00839. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00839>

Donoso Muñoz, M. J. (2013). El mercado del cobre a nivel mundial: Evolución, riesgos, características y potencialidades futuras. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, 21(2), 248–261. <https://doi.org/10.4067/S0718-33052013000200008>

- Dow, C., & Glasser, F. (2003). Calcium carbonate efflorescence on Portland cement and building materials. *Cement and Concrete Research*, 33, 147–154. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00937-7](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00937-7)
- Echave C., J. de, Instituto de Estudios Peruanos, Centro de Investigación y Promoción del Campesinado (Peru), Centro de Estudios Regionales Andinos “Bartolomé de Las Casas,” & Consorcio de Investigación Económica y Social (Peru) (Eds.). (2009). *Minería y conflicto social* (1. ed). Instituto de Estudios Peruanos ; Centro de Investigación y Promoción del Campesinado ; Centro Bartolomé de las Casas ; Consorcio de Investigación Económica y Social.
- Gültekin, A., Hosseinnezhad, H., & Ramyar, K. (2022). The Effect of Aggregate Type on Geopolymer Concrete High Temperature Resistance. *Journal of Polytechnic*. <https://doi.org/10.2339/politeknik.949657>
- Hernández Sampieri, R. (2018). *Metodología de la investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta* (McGRAW-HILL INTERAMERICANA, Vol. 1–Primera edición).
- Kheimi, M., Aziz, I. H., Abdullah, M. M. A. B., Almadani, M., & Abd Razak, R. (2022). Waste Material via Geopolymerization for Heavy-Duty Application: A Review. *Materials*, 15(9), 3205. <https://doi.org/10.3390/ma15093205>
- Komnitsas, K., Zaharaki, D., & Perdikatsis, V. (2008). Effect of Synthesis Parameters on the Compressive Strength of Low-Calcium Ferronickel Slag Inorganic Polymers. *Journal of Hazardous Materials*, 161, 760–768. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.04.055>
- Latorre, Á. M. L. R., & Tovar, M. H. T. (2017a). Explotación minera y sus impactos ambientales y en salud. El caso de Potosí en Bogotá. *Saúde Em Debate*, 41(112), 77–91. <https://doi.org/10.1590/0103-1104201711207>

- Latorre, Á. M. L. R., & Tovar, M. H. T. (2017b). Mining and its health and environmental impacts. The case of Potosí in Bogotá. *Saúde Em Debate*, 41(112), 77–91. <https://doi.org/10.1590/0103-1104201711207>
- Li, Z., Gao, Y., Zhang, J., Zhang, C., Chen, J., & Liu, C. (2021). Effect of particle size and thermal activation on the coal gangue based geopolymer. *Materials Chemistry and Physics*, 267, 124657. <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2021.124657>
- Longhi, M. A., Rodríguez, E. D., Zhang, Z., Torres, S. M., Barata, M. S., & Kirchheim, A. P. (2022). Kaolin mining waste to produce geopolymers: Physicomechanical properties and susceptibility to efflorescence formation. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e00846. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00846>
- Lv, X., Qin, Y., Lin, Z., Tian, Z., & Cui, X. (2020a). Inhibition of Efflorescence in Na-Based Geopolymer Inorganic Coating. *ACS Omega*, 5(24), 14822–14830. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c01919>
- Lv, X., Qin, Y., Lin, Z., Tian, Z., & Cui, X. (2020b). Inhibition of Efflorescence in Na-Based Geopolymer Inorganic Coating. *ACS Omega*, 5(24), 14822–14830. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c01919>
- Mabroum, S., Moukannaa, S., El Machi, A., Taha, Y., Benzaazoua, M., & Hakkou, R. (2020). Mine wastes based geopolymers: A critical review. *Cleaner Engineering and Technology*, 1, 100014. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2020.100014>

- Manjarrez, L., & Zhang, L. (2018). Utilization of Copper Mine Tailings as Road Base Construction Material through Geopolymerization. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0002397](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002397)
- Martinez, P. (2018). *Protocolo de Caracterización para la Predicción de Drenaje Ácido en Depósitos de Relaves Mineros*.
- Mazumder, E., & Prasad M., L. V. (2021). Effect of Quantity of Industrial Waste on Eco-Friendly Geopolymer Concrete. *Materials Science Forum*, 1019, 102–109. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1019.102>
- Ministerio de Energía y Minas del Perú. (2017). *Reglamento de Seguridad y Salud Ocupacional en Minería DS 024-2016-EM*. Ministerio de Energía y Minas del Perú. https://minem.gob.pe/minem/archivos/file/Mineria/LEGISLACION/2016/RSSO_2017.pdf
- Morales Aranibar, C. G. (2019). Inmovilización de relaves de flotación de cobre en Tacna mediante el uso de Geopolímeros. *Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann*. <http://repositorio.unjbg.edu.pe/handle/UNJBG/3853>
- Najafi Kani, E., Allahverdi, A., & Provis, J. L. (2012). Efflorescence control in geopolymer binders based on natural pozzolan. *Cement and Concrete Composites*, 34(1), 25–33. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.07.007>
- Naqvi, S., Ramkumar, J., & Kar, K. (2021). *Functionalization of fly ash*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-817686-3.00012-8>

- Ortiz-Hernández, Ma. L., Mussali-Galante, P., Sánchez-Salinas, E., & Tovar-Sánchez, E. (2018). Mining and Mine Tailings. In M. S. Fuentes, V. L. Colin, & J. M. Saez (Eds.), *Strategies for Bioremediation of Organic and Inorganic Pollutants* (1st ed., pp. 190–214). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b22045-12>
- Paiva, H., Yliniemi, J., Illikainen, M., Rocha, F., & Ferreira, V. (2019). Mine Tailings Geopolymers as a Waste Management Solution for A More Sustainable Habitat. *Sustainability*, 11(4), 995. <https://doi.org/10.3390/su11040995>
- Pommer, V., Vejmelková, E., Koňáková, D., Scheinherrova, L., Keppert, M., & Kočí, V. (2021). Impact of precursor granulometry on mechanical properties of geopolymers activated by potassium silicate. In *AIP Conference Proceedings* (Vol. 2429). <https://doi.org/10.1063/5.0069630>
- Provis, J. (2009). Activating solution chemistry for geopolymers. In *Geopolymers: Structures, Processing, Properties and Industrial Applications* (pp. 50–71). <https://doi.org/10.1533/9781845696382.1.50>
- Provis, J. L., & Bernal, S. A. (2014). Geopolymers and Related Alkali-Activated Materials. *Annual Review of Materials Research*, 44(1), 299–327. <https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-070813-113515>
- Provis, J., & Van Deventer, J. (2009). *Geopolymers: Structures, processing, properties and industrial applications* (p. 454).
- Qaidi, S. M. A., Tayeh, B. A., Zeyad, A. M., de Azevedo, A. R. G., Ahmed, H. U., & Emad, W. (2022). Recycling of mine tailings for the geopolymers

production: A systematic review. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e00933. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00933>

Rodríguez, E., Mejía de Gutiérrez, R., Bernal, S., & Gordillo, M. (2009). Efecto de los módulos SiO₂/Al₂O₃ y Na₂O/SiO₂ en las propiedades de sistemas geopoliméricos basados en un metacaolín. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 30–41.

Rzymiski, P., Klimaszuk, P., Marszelewski, W., Borowiak, D., Mleczek, M., Nowiński, K., Pius, B., Niedzielski, P., & Poniedziałek, B. (2017). The chemistry and toxicity of discharge waters from copper mine tailing impoundment in the valley of the Apuseni Mountains in Romania. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(26), 21445–21458. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9782-y>

Sangiorgi, C., Lantieri, C., Tataranni, P., Castro-Gomes, J., & Gabriel, M. (2016). *Reuse of mining waste into innovative alkali-activated-based materials for road pavement applications*. <https://doi.org/10.1201/9781315643274-191>

Šavija, B., & Luković, M. (2016). Carbonation of cement paste: Understanding, challenges, and opportunities. *Construction and Building Materials*, 117, 285–301. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.138>

Silva, I., Castro-Gomes, J., & Albuquerque, A. (2012). Mineral Waste Geopolymeric Artificial Aggregates as Alternative Materials for Wastewater-Treatment Processes: Study of Structural Stability and pH Variation in Water. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 24(6), 623–628. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000429](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000429)

Simão, L., Fernandes, E., Hotza, D., Ribeiro, M. J., Montedo, O. R. K., & Raupp-Pereira, F. (2021). Controlling efflorescence in geopolymers: A new

approach. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00740.
<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00740>

Škvára, F., Kopecký, L., Myšková, L., Šmilauer, V., Alberovská, L., Vinšová, L., & Skvara, F. (2009). *ALUMINOSILICATE POLYMERS - INFLUENCE OF ELEVATED TEMPERATURES, EFFLORESCENCE*.

Srinivasamurthy, L., Chevali, V. S., Zhang, Z., Longhi, M. A., Loh, T. W., & Wang, H. (2022). Mechanical property and microstructure development in alkali activated fly ash slag blends due to efflorescence. *Construction and Building Materials*, 332, 127273.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127273>

Vilakazi, A. Q., Ndlovu, S., Chipise, L., & Shemi, A. (2022). The Recycling of Coal Fly Ash: A Review on Sustainable Developments and Economic Considerations. *Sustainability*, 14(4), 1958.
<https://doi.org/10.3390/su14041958>

Vizureanu, P., Doru Burduhos Nergis, D., Victor Sandu, A., Petronela Burduhos Nergis, D., & Simona Baltatu, M. (2021). The Physical and Mechanical Characteristics of Geopolymers Using Mine Tailings as Precursors. In P. Vizureanu & P. Krivenko (Eds.), *Advances in Geopolymer-Zeolite Composites—Synthesis and Characterization*. IntechOpen.
<https://doi.org/10.5772/intechopen.97807>

Waijarean, N., Mackenzie, K., Asavapisit, S., Piyapanuwat, R., & Jameson, G. (2017). Synthesis and properties of geopolymers based on water treatment residue and their immobilization of some heavy metals. *Journal of Materials Science*, 52. <https://doi.org/10.1007/s10853-017-0970-4>

- Yao, X., Yang, T., & Zhang, Z. (2015). Compressive strength development and shrinkage of alkali-activated fly ash–slag blends associated with efflorescence. *Materials and Structures*, 49. <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0694-3>
- Zhang, D., Ghouleh, Z., & Shao, Y. (2017). Review on carbonation curing of cement-based materials. *Journal of CO2 Utilization*, 21, 119–131. <https://doi.org/10.1016/j.jcou.2017.07.003>
- Zhang, Z., Provis, J. L., Ma, X., Reid, A., & Wang, H. (2018). Efflorescence and subflorescence induced microstructural and mechanical evolution in fly ash-based geopolymers. *Cement and Concrete Composites*, 92, 165–177. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.06.010>
- Zhang, Z., Provis, J. L., Reid, A., & Wang, H. (2014a). Fly ash-based geopolymers: The relationship between composition, pore structure and efflorescence. *Cement and Concrete Research*, 64, 30–41. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.06.004>
- Zhang, Z., Provis, J., Reid, A., & Wang, H. (2014b). Fly ash-based geopolymers: The relationship between composition, pore structure and efflorescence. *Cement and Concrete Research*, 64, 30–41. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.06.004>
- Zhang, Z., Wang, H., Provis, J. L., & Reid, A. (2013). Efflorescence: A critical challenge for geopolymer applications? In V. Dao & P. Dux (Eds.), *Concrete Institute of Australia's Biennial National Conference 2013* (pp. 1–10). Concrete Institute of Australia. <http://www.concrete2013.com.au/technical-program/>

Zhou, S., Zhou, S., Zhang, J., Tan, X., & Chen, D. (2020). Relationship between Moisture Transportation, Efflorescence and Structure Degradation in Fly Ash/Slag Geopolymer. *Materials*, 13(23), 5550. <https://doi.org/10.3390/ma13235550>

Zhuang, X., Chen, L., Komarneni, S., Zhou, C., Tong, D., Yang, H., Yu, W., & Wang, H. (2016). Fly Ash-based Geopolymer: Clean Production, Properties and Applications. *Journal of Cleaner Production*, 125. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.019>

ANEXOS

ANEXO 1

ÁLBUM FOTOGRÁFICO DE LA METODOLOGÍA

TOMA DE MUESTRAS



Secado de las muestras



Caracterización de la materia prima



Proceso de elaboración de los morteros







Ensayo mecánico de los morteros geopoliméricos



Análisis instrumental



ANEXO 2

Resultados ensayos de compresión a 1M curado durante 28 días



UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS Y CONCRETO



ESTUDIO : INMOVILIZACIÓN DE RELAVES DE FLOTACIÓN DE COBRE EN TACNA MEDIANTE EL USO DE GEOPOLÍMEROS
SOLICITANTE : CARLOS MORALES
FECHA : MARZO DE 2019

ENSAYO DE COMPRESION DE CUBOS DE CONCRETO

Nº de cubo	DESCRIPCION	Fecha de Rotura	largo cm	ancho cm	AREA cm ²	Lectura Kg-F	RESISTENCIA Kg/cm ²
A1	GRUPO A	05/03/2019	4.8	4.5	21.60	319.9	14.81
A2	GRUPO A	05/03/2019	4.6	4.6	21.16	249.9	11.81
A3	GRUPO A	05/03/2019	4.8	4.5	21.60	236.7	10.96
A4	GRUPO A	05/03/2019	4.6	4.8	22.08	280.0	12.68
A5	GRUPO A	05/03/2019	4.5	4.6	20.70	576.3	27.84
A6	GRUPO A	05/03/2019	4.8	4.6	22.08	516.7	23.40
A7	GRUPO A	05/03/2019	4.5	4.7	21.15	607.2	28.71
A8	GRUPO A	05/03/2019	4.8	4.5	21.60	486.0	22.50
A9	GRUPO A	05/03/2019	4.5	4.6	20.70	340.1	16.43
A10	GRUPO A	05/03/2019	4.4	4.7	20.68	670.9	32.44
A11	GRUPO A	05/03/2019	4.5	4.6	20.70	310.1	14.98
A12	GRUPO A	05/03/2019	4.3	4.5	19.35	260.1	13.44
A13	GRUPO A	05/03/2019	4.6	4.7	21.62	582.7	26.95
A14	GRUPO A	05/03/2019	4.4	4.6	20.24	229.9	11.36



 EDGAR CHRISTIAN J. TISNADO VALDIVIA
 ING. GEÓLOGO GEOTÉCNICO
 Reg. CIP 156993

Responsable de Laboratorio



 Dr. Jorge Segura Davila
 Jefe de Laboratorio CIP N° 38274



ANEXO 3

Resultados ensayos de compresión a 5M curado durante 28 días




UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS Y CONCRETO



ESTUDIO : INMOVILIZACIÓN DE RELAVES DE FLOTACIÓN DE COBRE EN TACNA MEDIANTE EL USO DE GEOPOLÍMEROS
SOLICITANTE : CARLOS MORALES
FECHA : MARZO DE 2019

ENSAYO DE COMPRESION DE CUBOS DE CONCRETO

Nº de cubo	DESCRIPCION	Fecha de Rotura	largo cm	ancho cm	AREA cm ²	Lectura Kg-F	RESISTENCIA Kg/cm ²
B1	GRUPO B	05/03/2019	4.9	4.8	23.52	695.7	29.58
B2	GRUPO B	05/03/2019	4.2	4.7	19.74	398.9	20.21
B3	GRUPO B	05/03/2019	4.5	4.7	21.15	953.0	45.06
B4	GRUPO B	05/03/2019	5	4.8	24.00	463.9	19.33
B5	GRUPO B	05/03/2019	4.5	4.5	20.25	1050.0	51.85
B6	GRUPO B	05/03/2019	4.8	4.7	22.56	881.2	39.06
B7	GRUPO B	05/03/2019	4.3	4.7	20.21	1148.3	56.82
B8	GRUPO B	05/03/2019	4.7	5	23.50	892.5	37.98
B9	GRUPO B	05/03/2019	5.2	4.5	23.40	896.0	38.29
B10	GRUPO B	05/03/2019	4.8	4.5	21.60	1031.6	47.76
B11	GRUPO B	05/03/2019	5	4.4	22.00	779.9	35.45
B12	GRUPO B	05/03/2019	4.6	4.8	22.08	837.5	37.93
B13	GRUPO B	05/03/2019	5	4.8	24.00	839.0	34.96
B14	GRUPO B	05/03/2019	5	4.5	22.50	430.0	19.11


 EDGAR CHRISTIAN J. TISNADO VALDIVIA
 ING. GEÓLOGO GEOTÉCNICO
 Reg. CIP 156993

Responsable de Laboratorio


 Dr. Jorge Segura Davila
 Jefe de Laboratorio CIP N° 38274



ANEXO 4

Resultados ensayos de compresión a 10 M curado durante 28 días




UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS Y CONCRETO




ESTUDIO : INMOVILIZACIÓN DE RELAVES DE FLOTACIÓN DE COBRE EN TACNA MEDIANTE EL USO DE GEOPOLÍMEROS
SOLICITANTE : CARLOS MORALES
FECHA : MARZO DE 2019

ENSAYO DE COMPRESION DE CUBOS DE CONCRETO

Nº de cubo	DESCRIPCION	Fecha de Rotura	largo cm	ancho cm	AREA cm ²	Lectura Kg-F	RESISTENCIA Kg/cm ²
C1	GRUPO C	05/03/2019	4.2	4.4	18.48	1993.1	107.85
C2	GRUPO C	05/03/2019	4.6	4.7	21.62	1363.8	63.08
C3	GRUPO C	05/03/2019	4.5	4.4	19.80	2710.4	136.89
C4	GRUPO C	05/03/2019	4.6	4.8	22.08	1742.3	78.91
C5	GRUPO C	05/03/2019	4.7	4.7	22.09	2771.2	125.45
C6	GRUPO C	05/03/2019	4.8	4.7	22.56	2661.6	117.98
C7	GRUPO C	05/03/2019	4.4	4.7	20.68	2970.1	143.62
C8	GRUPO C	05/03/2019	4.5	4.9	22.05	2640.7	119.76
C9	GRUPO C	05/03/2019	4.6	4.6	21.16	2639.9	124.76
C10	GRUPO C	05/03/2019	4.6	5.2	23.92	3306.9	138.25
C11	GRUPO C	05/03/2019	4.6	5	23.00	2270.1	98.70
C12	GRUPO C	05/03/2019	5	4.7	23.50	2766.4	117.72
C13	GRUPO C	05/03/2019	4.6	4.8	22.08	2635.7	119.37
C14	GRUPO C	05/03/2019	4	4.8	19.20	820.4	42.73


 EDGAR CHRISTIAN J. TISNADO VALDIVIA
 ING. GEÓLOGO GEOTÉCNICO
 Reg. CIP 156993

Responsable de Laboratorio


 Dr. Jorge Segura Davila
 Jefe de Laboratorio CIP N° 38274



ANEXO 5

Resultados ensayos de compresión a 10 M curado durante 35 días




UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS Y CONCRETO



ESTUDIO : INMOVILIZACIÓN DE RELAVES DE FLOTACIÓN DE COBRE EN TACNA MEDIANTE
EL USO DE GEOPOLÍMEROS
SOLICITANTE : CARLOS MORALES
FECHA : MARZO DE 2019

ENSAYO DE COMPRESION DE CUBOS DE CONCRETO

Nº de cubo	DESCRIPCION	Fecha de Rotura	largo cm	ancho cm	AREA cm ²	Lectura Kg-F	RESISTENCIA Kg/cm ²
G1	GRUPO G	06/03/2019	5	4.5	22.50	1760	78.22
G2	GRUPO G	06/03/2019	5	4.9	24.50	3000	122.45
G3	GRUPO G	06/03/2019	4.7	5	23.50	3450	146.81
G4	GRUPO G	06/03/2019	5	4.8	24.00	2100	87.50
G5	GRUPO G	06/03/2019	4.9	4.8	23.52	2200	93.54
G6	GRUPO G	06/03/2019	5	5	25.00	2460	98.40
G7	GRUPO G	06/03/2019	4.8	4.7	22.56	5660	250.89
G8	GRUPO G	06/03/2019	4.5	4.8	21.60	2630	121.76
G9	GRUPO G	06/03/2019	5	5.1	25.50	3530	138.43
G10	GRUPO G	06/03/2019	5	4.5	22.50	1420	63.11
G11	GRUPO G	06/03/2019	5	4.7	23.50	1590	67.66
G12	GRUPO G	06/03/2019	5	5	25.00	2570	102.80
G13	GRUPO G	06/03/2019	5	4.8	24.00	2910	121.25
G14	GRUPO G	06/03/2019	4.7	5	23.50	2610	111.06


EDGAR CHRISTIAN J. TISNADO VALDIVIA
ING. GEÓLOGO GEOTÉCNICO
Reg. CIP 156993

Responsable de Laboratorio


Dr. Jorge Segura Davila
Jefe de Laboratorio CIP N° 38274



ANEXO 6

Resultados ensayos de compresión a 15 M curado durante 28 días




UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA DE MINAS
LABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS Y CONCRETO



ESTUDIO : INMOVILIZACIÓN DE RELAVES DE FLOTACIÓN DE COBRE EN TACNA MEDIANTE
 EL USO DE GEOPOLÍMEROS
 SOLICITANTE : CARLOS MORALES
 FECHA : MARZO DE 2019

ENSAYO DE COMPRESION DE CUBOS DE CONCRETO

Nº de cubo	DESCRIPCION	Fecha de Rotura	largo cm	ancho cm	AREA cm ²	Lectura Kg-F	RESISTENCIA Kg/cm ²
D1	GRUPO D	05/03/2019	4.6	4.9	22.54	1685.8145	74.79
D2	GRUPO D	05/03/2019	4.8	5.3	25.44	1470.1459	57.79
D3	GRUPO D	05/03/2019	5	4.8	24.00	3178.2737	132.43
D4	GRUPO D	05/03/2019	4.8	4.7	22.56	1574.6117	69.80
D5	GRUPO D	05/03/2019	4.5	5.2	23.40	3225.9131	137.86
D6	GRUPO D	05/03/2019	4.9	4.5	22.05	2630.6885	119.31
D7	GRUPO D	05/03/2019	4.5	4.5	20.25	2657.4822	131.23
D8	GRUPO D	05/03/2019	4.5	5	22.50	2724.876	121.11
D9	GRUPO D	05/03/2019	4.8	4.5	21.60	2725.0945	126.16
D10	GRUPO D	05/03/2019	4.5	5	22.50	2897.0642	128.76
D11	GRUPO D	05/03/2019	5	5.2	26.00	2595.0333	99.81
D12	GRUPO D	05/03/2019	4.4	4.5	19.80	2357.0451	119.04
D13	GRUPO D	05/03/2019	5	4.5	22.50	2581.0024	114.71
D14	GRUPO D	05/03/2019	4.6	5	23.00	873.66397	37.99



 EDGAR CHRISTIAN J. TISNADO VALDIVIA
 ING. GEÓLOGO GEOTÉCNICO
 Reg. CIP 156993

 Responsable de Laboratorio



 Dr. Jorge Segura Davila
 Jefe de Laboratorio CIP N° 38274



ANEXO 7 PRUEBA TCLP



Página 1 de 7

INFORME DE ENSAYO N° ABR1020.R19

SOLICITANTE :	UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE G.
DOMICILIO LEGAL :	Av. Miraflores N° S/N Cercado Tacna, Tacna
SOLICITADO POR :	Carlos Morales
SOLICITUD DE SERVICIO AMBIENTAL:	Cadena de Custodia N° 567-19/CERTIMIN Southern Perú Copper Corporation Ilabaya / Jorge Basadre / Tacna
REFERENCIA :	Inmovilización de Relaves de Flotación de Cobre en Tacna mediante el uso de Geopolímeros
FECHA DE MUESTREO :	--
MUESTRA TOMADA POR :	EL CLIENTE
PROTOCOLO :	
TIPO DE MUESTRA:	Muestras Ambientales
NÚMERO DE MUESTRAS :	2
PRESENTACIÓN DE LAS MUESTRAS :	Frascos de polietileno sellados.
CONDICIÓN DE LAS MUESTRAS : RECEPCIONADAS	Muestras en buenas condiciones para los análisis solicitados.
FECHA DE RECEPCIÓN :	domingo, 24 de marzo de 2019
IDENTIFICACIÓN DE LAS MUESTRAS :	Segun se indica
FECHA DE EJECUCIÓN DE ENSAYO :	2019-03-24 al 2019-04-09
FECHA DE REPORTE :	martes, 09 de abril de 2019
PERIODO DE CUSTODIA :	Hasta un mes. De acuerdo a las recomendaciones de la metodología o norma empleada.

EDGAR NINA VELÁSQUEZ
Jefe Ambiental
CQP. 729
Lima, 9 de abril de 2019

Prohibida la reproducción total o parcial de este informe, sin la autorización escrita de CERTIMIN S.A.
"Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produjo". Los resultados corresponden a las muestras indicadas.
El laboratorio no es responsable de la información proporcionada por el cliente.
Los resultados se aplican a la muestra cómo se recibió por parte del cliente.



**INFORME DE ENSAYO
N° ABR1020.R19**

RESULTADOS

Muestras		Elementos																			
N°	Código de Servicio Elemento Unidad Límite de Detección ID	MA0122 Ag(t) mg/L 0.002	MA0122 Al(t) mg/L 0.02	MA0122 As(t) mg/L 0.008	MA0122 B(t) mg/L 0.003	MA0122 Ba(t) mg/L 0.001	MA0122 Be(t) mg/L 0.0003	MA0122 Bi(t) mg/L 0.02	MA0122 Ca(t) mg/L 0.05	MA0122 Cd(t) mg/L 0.001	MA0122 Ce(t) mg/L 0.02	MA0122 Co(t) mg/L 0.002	MA0122 Cr(t) mg/L 0.004	MA0122 Cu(t) mg/L 0.003	MA0122 Fe(t) mg/L 0.01	MA0122 K(t) mg/L 0.01	MA0122 Li(t) mg/L 0.004	MA0122 Mn(t) mg/L 0.02	MA0122 Mo(t) mg/L 0.001		
1	Muestra1 Relave	<0.002	4.17	<0.008	3.122	0.307	0.0086	<0.02	498.42	<0.001	<0.02	<0.002	<0.004	0.469	1.12	9.89	<0.004	16.21	1.277		
2	Muestra2 Relave	<0.002	0.91	0.478	2.243	0.199	<0.0003	<0.02	220.77	<0.001	<0.02	<0.002	<0.004	0.005	0.33	60.50	0.639	9.79	0.012		

El código de servicio MA1068 corresponde a: Prueba TCLP (Toxicity characteristic leaching procedure) que incluye todos los parámetros analizados

LD: Límite de Detección (Límite Reportable) que es tomado en base al Límite de Cuantificación del Método LCM.

*Prohibida la reproducción total o parcial de este informe, sin la autorización escrita de CERTIMIN S.A. *

**Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce*. Los resultados corresponden a las muestras indicadas



INFORME DE ENSAYO
N° ABR1020.R19

N°	Muestras	Elementos															
		MA0122 Mo (t) mg/L 0.004	MA0122 Na (t) mg/L 0.01	MA0122 Ni (t) mg/L 0.002	MA0122 P (t) mg/L 0.06	MA0122 Pb (t) mg/L 0.01	MA0122 Sb (t) mg/L 0.008	MA0122 Se (t) mg/L 0.02	MA0122 SiO2 (t) mg/L 0.02	MA0122 Sn (t) mg/L 0.007	MA0122 Sr (t) mg/L 0.0007	MA0122 Tl (t) mg/L 0.01	MA0122 Tl (t) mg/L 0.05	MA0122 V (t) mg/L 0.003	MA0122 Zn (t) mg/L 0.003		
1	Muestra1	<0.004	2080.05	<0.002	<0.06	0.20	<0.008	<0.02	132.55	<0.007	4.3157	0.05	<0.05	0.045	0.279		
2	Muestra2	0.483	2610.02	<0.002	2.08	<0.01	<0.008	1.76	99.87	<0.007	2.3054	0.03	<0.05	0.713	0.016		

*Prohibida la reproducción total o parcial de este informe, sin la autorización escrita de CERTIMIN S.A.
 **Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce*. Los resultados corresponden a las muestras indicadas



INFORME DE ENSAYO
N° ABR1020.R19

CONTROL DE CALIDAD

N°	Codigo de Servicio Elemento Unidad Limite de Detección (µ)	Elementos													
		MA0122 Al (t) mg/L 0.02	MA0122 As (t) mg/L 0.008	MA0122 B (t) mg/L 0.003	MA0122 Ba (t) mg/L 0.001	MA0122 Be (t) mg/L 0.0003	MA0122 Bi (t) mg/L 0.02	MA0122 Ca (t) mg/L 0.05	MA0122 Cd (t) mg/L 0.001	MA0122 Ce (t) mg/L 0.02	MA0122 Co (t) mg/L 0.002	MA0122 Cr (t) mg/L 0.004	MA0122 Cu (t) mg/L 0.003	MA0122 Fe (t) mg/L 0.01	
1	Adición (% Recup.)	98.9	104.2	98.4	100.6	95.2	98.0	100.7	95.0	102.0	96.8	96.0	101.8	95.0	
2	Adición Rango (%)	85.0 - 115.0	85.0 - 115.0	85.0 - 115.0	85.0 - 115.0	85.0 - 115.0	85.0 - 115.0	85.0 - 115.0	85.0 - 115.0	85.0 - 115.0	85.0 - 115.0	85.0 - 115.0	85.0 - 115.0	85.0 - 115.0	
3	STD - Recuperación Obtenido (%)	97.6	97.4	98.4	98.8	98.2	96.0	97.5	99.2	106.0	98.4	93.0	97.4	100.0	
4	STD - Rango (%)	85.0-115.0	85.0-115.0	85.0-115.0	85.0-115.0	85.0-115.0	85.0-115.0	85.0-115.0	85.0-115.0	85.0-115.0	85.0-115.0	85.0-115.0	85.0-115.0	85.0-115.0	
5	Muestras (Original)	<0.002	0.91	2.243	0.188	<0.0003	<0.02	228.77	<0.001	<0.02	<0.002	<0.004	0.005	0.33	
6	Muestras (Dup)	<0.002	0.93	2.318	0.193	<0.0003	<0.02	233.75	<0.001	<0.02	<0.002	<0.004	0.005	0.35	
7	Blanco	<0.002	<0.008	<0.003	<0.001	<0.0003	<0.02	<0.05	<0.001	<0.02	<0.002	<0.004	<0.003	<0.01	

*Prohibida la reproducción total o parcial de este informe, sin la autorización escrita de CERTIMIN S.A.
Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. Los resultados corresponden a las muestras indicadas



**INFORME DE ENSAYO
N° ABR1020.R19**

Muestras QC		Elementos													
N°	Código de Servicio Elemento Unidad Limite de Detección ID	MA0122 Li (C) mg/L 0.004	MA0122 Rb (C) mg/L 0.001	MA0122 Sr (C) mg/L 0.004	MA0122 Ni (C) mg/L 0.001	MA0122 Mo (C) mg/L 0.004	MA0122 Na (C) mg/L 0.01	MA0122 Ni (C) mg/L 0.002	MA0122 P (C) mg/L 0.06	MA0122 Pb (C) mg/L 0.01	MA0122 Sb (C) mg/L 0.008	MA0122 Se (C) mg/L 0.02	MA0122 SiO2 (C) mg/L 0.02	MA0122 Sn (C) mg/L 0.007	MA0122 Sr (C) mg/L 0.0007
1	Adición (% Recup.)	103.1	101.8	111.4	105.6	88.5	98.8	114.0	94.0	101.0	92.0	88.4	97.2	108.9	
2	Adición Rango (%)	85.0 - 115.0	85.0 - 115.0	85.0 - 115.0	85.0 - 115.0	85.0 - 115.0	85.0 - 115.0	85.0 - 115.0	85.0 - 115.0	85.0 - 115.0	85.0 - 115.0	85.0 - 115.0	85.0 - 115.0	85.0 - 115.0	85.0 - 115.0
3	STD - Recuperación Obtenido (%)	98.5	97.6	96.5	97.4	98.2	94.8	100.8	102.0	93.0	86.0	96.4	88.2	99.0	
4	STD - Rango (%)	85.0 - 115.0	85.0 - 115.0	85.0 - 115.0	85.0 - 115.0	85.0 - 115.0	85.0 - 115.0	85.0 - 115.0	85.0 - 115.0	85.0 - 115.0	85.0 - 115.0	85.0 - 115.0	85.0 - 115.0	85.0 - 115.0	85.0 - 115.0
5	Muestras (Original)	68.80	6.338	8.79	0.012	0.483	2518.02	<0.002	2.08	<0.01	<0.008	1.75	86.67	<0.007	2.3064
6	Muestras (Dup)	70.23	0.664	10.03	0.013	0.491	2696.84	<0.002	2.03	<0.01	<0.008	1.74	92.78	<0.007	2.4215
7	Blanco	<0.01	<0.004	<0.001	<0.004	<0.01	<0.002	<0.06	<0.01	<0.008	<0.02	<0.02	<0.007	<0.0007	<0.0007

*Prohibida la reproducción total o parcial de este informe, sin la autorización escrita de CERTIMIN S.A.
 **Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce*. Los resultados corresponden a las muestras indicadas



INFORME DE ENSAYO
N° ABR1020.R19

Muestras QC		Elementos			
N°	Código de Servicio Elemento Unidad Limite de Detección ID	MA0122 Ti (t) mg/L 0.01	MA0122 Ti (t) mg/L 0.05	MA0122 V (t) mg/L 0.003	MA0122 Zn (t) mg/L 0.005
1	Adición (% Recup.)	98.0	98.0	98.2	90.8
2	Adición Rango (%)	85.0 - 115.0	85.0 - 115.0	85.0 - 115.0	85.0 - 115.0
3	STD - Recuperación (klientido) (%)	100.0	92.0	99.2	100.2
4	STD - Rango (%)	85.0-115.0	85.0-115.0	85.0-115.0	85.0-115.0
5	Muestras (Original)	0.03	<0.05	0.713	0.016
6	Muestras (Dup)	0.03	<0.05	0.748	0.017
7	Blanco	<0.01	<0.05	<0.003	<0.005

*Prohibida la reproducción total o parcial de este informe, sin la autorización escrita de CERTIMIN S.A.
 Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce. Los resultados corresponden a las muestras indicadas



**INFORME DE ENSAYO
N° ABR1020.R19**

METODOS DE ENSAYO Y CODIGOS DE SERVICIO

N°	Actividad	Identificación	Código de Servicio	Descripción
1	prueba TCLP	prueba TCLP	MA1069	EPA 1311 Toxicity characteristic leaching procedure
2	Metales Totales Por ICP OES	Metales Totales Por ICP OES	MA0122	EPA. Method 200.7. Revision 4.4 1984. Determination of metals and trace elements in water and wastes by Inductively Coupled Plasma- Atomic Emission Spectrometry.

(1) SMEWW: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.
 APHA: American Public Health Association.
 AWWA: American Water Works Association.
 WEF: Water Environment Federation.
 EPA: Environmental Protection Agency.
 ASTM: American Society for Testing and Materials.
 ISO: International Organization for Standardization.
 NTP: Norma Técnica Peruana.
 NIOSH: The National Institute for Occupational Safety and Health.

"Prohibida la reproducción total o parcial de este informe, sin la autorización escrita de CERTIMIN S.A."
 "Los resultados de los ensayos no deben ser utilizados como una certificación de conformidad con normas de producto o como certificado del sistema de calidad de la entidad que lo produce". Los resultados corresponden a las muestras indicadas