

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN - TACNA

Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales

INMOVILIZACIÓN DE RELAVES DE FLOTACIÓN
DE COBRE EN TACNA MEDIANTE EL USO
DE GEOPOLÍMEROS

TESIS

Presentada por:

Bach. Carlos Genaro Morales Aranibar

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO METALURGISTA

TACNA - PERÚ

2019

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN – TACNA


Facultad de Ingeniería


Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales

**INMOVILIZACIÓN DE RELAVES DE FLOTACIÓN
DE COBRE EN TACNA MEDIANTE EL USO DE
GEOPOLÍMEROS**


JURADO CALIFICADOR

Tesis sustentada por el Bach. Carlos Genaro Morales Aranibar, aprobado el 10 de octubre de 2019, siendo el jurado calificador integrado por:

PRESIDENTE : 
MSc. Edgardo Teófilo Valdez Cortijo

SECRETARIO : 
Dr. Luis Fortunato Caso Palpa

VOCAL : 
Ing. Julián Nieto Quispe

ASESOR : 
Dr. Nataniel Mario Linares Gutiérrez

DEDICATORIA

A la luz de mis ojos, mi madre
Purificación Miriam Aranibar Condori.

La esperanza hecha vida, amiga,
maestra y guía.

Forjadora de mi camino.

Palabras no existen para expresar tu
inmenso amor.

AGRADECIMIENTO

A mis padres y hermanos Joaquín, Luis e Isabel por su apoyo, dedicación, abnegación y apoyo incondicional.

Al ingeniero Nataniel Linares Gutiérrez padre, amigo y maestro.

A los ingenieros Medina y Gamarra y al equipo de investigación “Estudio de la aplicación de la nanotecnología para la purificación del agua con arsénico en la región Tacna” amigos científicos.

A los profesores de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales de la UNJBG por su labor en mi formación.

CONTENIDO

DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTO	iv
CONTENIDO	v
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE TABLAS	xi
RESUMEN	xv
INTRODUCCIÓN	xvii
CAPÍTULO I	2
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	2
1.1. Descripción del problema	2
1.2. Antecedentes del problema	2
1.2.1. Realidad minera en el Perú	2
1.2.2. Realidad minera en Tacna	4
1.3. Problemática de la investigación	6
1.4. Formulación del problema	8
1.4.1. Problema principal	8
1.4.2. Problemas específicos	8
1.5. Justificación e importancia de la investigación	9
1.6. Alcances y limitaciones	9
1.6.1. Alcances de la investigación	9
1.6.2. Limitaciones	9
1.7. Objetivos	10

1.7.1. Objetivo principal	10
1.7.2. Objetivos específicos	10
1.8. Hipótesis	11
1.8.1. Hipótesis general	11
1.8.2. Hipótesis específicas	11
CAPÍTULO II	12
MARCO TEÓRICO	
2. Antecedentes del problema	12
2.1.1. Geopolimerización	15
2.1.2. Reacción de geopolimerización	16
2.1.2.2. Reacción de geopolimerización	19
2.2. Variables que intervienen en la síntesis de materiales geopoliméricos	22
2.2.1. Efecto del contenido de agua	22
2.2.2. Temperatura y tiempo de curado	23
2.2.3. Composición química del material	24
2.2.4. Concentración del medio alcalino (solución activante)	25
2.2.5. Tamaño de partícula de la materia prima	27
2.3. La actividad minera y el origen del relave	27
2.3.1. Relaves de flotación de sulfuros de cobre	28
2.4. Definición de términos	28
2.4.1. Geopolímero	28
2.4.2. Inmovilización	29
2.4.3. Flotación de minerales sulfuros de cobre	29
2.4.4. Relaves	30

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO	31
3. Tipo y diseño de la investigación	31
3.1. Tipo de investigación	31
3.2. Diseño de la investigación	32
3.3. Población y muestra	33
3.3.1 Población	33
3.3.2 Muestra	34
3.4. Operacionalización de variables	35
3.5. Técnica de recolección y análisis de datos	36
3.5.1. Toma de muestra de relave	36
3.5.2. Muestra de ceniza volante	37
3.5.3. Técnica de análisis de datos	38
3.6. Materiales y equipos	38
3.7. Desarrollo experimental	39
3.7.1. Fabricación de las probetas	39
3.7.2. Procedimiento para la formación de los geopolímeros	40
3.7.3. Análisis del geopolímero conformado en base de relaves	41
3.7.3.1. Ensayo de resistencia a la compresión	41
3.7.3.2. Determinación de la densidad	42
3.8. Determinación del nivel de toxicidad del geopolímero	42

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN	43
4. Descripción de las materias primas	43
4.1. Análisis granulométrico para el relave	43
4.2. Análisis granulométrico de las cenizas volantes	44

4.3. Análisis de la gravedad específica relave	45
4.4. Análisis de la gravedad específica para la ceniza volante	45
4.5. Características del relave y cenizas volantes húmedas.	46
4.6. Humedad del relave y de la ceniza volante	46
4.7. Análisis por difracción de rayos X	47
4.7.1. Análisis de difracción de rayos X para el relave	47
4.7.2. Resultado de análisis de difracción de rayos X para la ceniza volante	50
4.7.3. Análisis de difracción de rayos X del metacaolín	52
4.8. Análisis de composición química EDAX	54
4.8.1. Resultados del análisis químico EDAX del relave	54
4.8.2. Resultados del análisis de composición química EDAX para la ceniza volante	55
4.9. Análisis morfológico	56
4.9.1. Resultados del análisis morfológico para el relave	56
4.9.2. Análisis morfológico de la ceniza volante	57
4.10. Resultados de los ensayos a las probetas	58
4.10.1 Resultados de propiedades organolépticas	58
4.11. Resultado de análisis de difracción de rayos X para las formaciones cristalinas en forma de eflorescencia.	59
4.12. Relaciones molares para $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3\text{-NaO}/\text{SiO}_2\text{-NaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$	62
4.13. Resultado de resistencia a la compresión	63
4.13.1. Resistencia para el geopolímero a 1 M	63
4.13.2. Resistencia para el geopolímero a 5 M	64
4.13.3. Resistencia para el geopolímero a 10 M	65

4.13.3.1. Humedad de las probetas de 10 M a 28 días de curado	66
4.13.4. Resistencia para el geopolímero a 10 M a 35 días de curado	67
4.13.5. Resistencia para el geopolímero a 15 M	68
4.14. Resultado prueba TCLP y metales pesados por ICP OES	69
4.15. Resultados del análisis de diseño de mezclas	71
4.15.1 Resultados de la definición de variables	71
4.15.2. Definición del diseño	71
4.15.2. Efectos estimados del modelo completo para el modelo 10M a 28 días de curado	72
4.16. Resultados del análisis elemental y micrográfico para las probetas más resistentes	84
4.17. Discusión	86
4.18. Contratación de hipótesis	88
4.19. Propuesta de aplicación del estudio	90
CONCLUSIONES	92
RECOMENDACIONES	93
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	94
ANEXOS	100

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ranking (o) y participación (%) de los principales países en el nivel de producción mundial de metales, 2015	4
Figura 2. Exportaciones por tipo y sector julio 2017- junio 2018	6
Figura 3. Tipos de polisialatos	17
Figura 4. Proceso de geopolimerización	20
Figura 5. Esquema del proceso experimental de inmovilización de relaves	33
Figura 6. Lugar donde se tomó la muestra de relave	36
Figura 7. Toma de muestra de relaves	37
Figura 8. Muestras de cenizas	37
Figura 9. Análisis granulométrico del relave	44
Figura 10. Análisis de las cenizas volantes	45
Figura 11. Dispersión de los componentes en el relave.	48
Figura 12. Difractograma mostrando las principales fases presentes en el relave	49
Figura 13. Dispersión de los componentes en la ceniza volante.	50
Figura 14. Difractograma mostrando las principales fases presentes en la ceniza volante	51
Figura 15. Dispersión de los componentes en la metacaolin.	52
Figura 16. Difractograma mostrando las principales fases presentes en el metacaolin	53
Figura 17. Principales elementos en el relave	54

Figura 18. Principales elementos la ceniza volante	55
Figura 19. Microfotografía del relave a 100 aumentos de resolución.	56
Figura 20. Microfotografía del relave 2000 aumentos de resolución.	56
Figura 21. Microfotografía de la ceniza volante a 100 aumentos de resolución	57
Figura 22. Microfotografía de la ceniza volante a 2000 aumentos de resolución	57
Figura 23. Probetas fabricadas (mezclas)	59
Figura 24. Imagen cristales en forma de eflorescencia	60
Figura 25. Difractograma mostrando las principales fases presentes en los cristales en forma de eflorescencia	61
Figura 26. Superficie de respuestas estimadas para el modelo 10 M a 28 días de curado	74
Figura 27. Contornos de la superficie respuesta, la resistencia a la compresión de las mezclas geopoliméricas a 10 M a 28 días de curado	74
Figura 28. Representación gráfica de trazas	75
Figura 29. Representación gráfica de residuos para la Resistencia (resistencia a la compresión)	77
Figura 30. Superficie respuesta estimada para el modelo 10 M a 35 días de curado	80
Figura 31. Contornos de la superficie respuesta para resistencia a 10 M a 35 días de curado	80
Figura 32. Representación gráfica de trazas para resistencia a 10 M, 35 días de curado	81
Figura 33. Gráfica de residuos para Resistencia (resistencia a la compresión)	83

Figura 34. Resultados del análisis elemental y micrográfico para la muestra 1	84
Figura 35. Resultados del análisis elemental y micrográfico para la muestra 2	85
Figura 36. Esquema de la inmovilización de relaves al cierre de la presa de relaves	85

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Indicadores estratégicos de la región Tacna-2017	35
Tabla 2. Rango de valores del diseño experimental utilizado	35
Tabla 3. Distribución del tamaño de partícula del relave	43
Tabla 4. Distribución del tamaño de partícula de las cenizas volantes	44
Tabla 5. Gravedad específica para el relave	45
Tabla 6. Gravedad específica para la ceniza volante	46
Tabla 7. Características del relave húmedo	46
Tabla 8. Resultados de humedad del relave secado al aire libre	47
Tabla 9. Resultados de humedad de la ceniza volante	47
Tabla 10. Resultados de análisis de difracción de rayos X para el relave	48
Tabla 11. Resultado de análisis de difracción de rayos X para la ceniza volante.	50
Tabla 12. Resultado de análisis de difracción de rayos X para el metacaolín	52
Tabla 13. Resultados del análisis de composición química EDAX para el relave	54
Tabla 14. Resultados del análisis de composición química EDAX para la ceniza volante	55
Tabla 15. Propiedades organolépticas para los elementos	58
Tabla 16. Presenta la composición de las formaciones cristalinas en forma de eflorescencia	59

Tabla 17. Resultados relaciones Molares para SiO ₂ /Al ₂ O ₃ -NaO/SiO ₂ -NaO/Al ₂ O ₃	62
Tabla 18. Resistencia del geopolímero a 1 M	64
Tabla 19. Resistencia del geopolímero a 5 M	65
Tabla 20. Resistencia del geopolímero a 10 M	66
Tabla 21. Reporte de humedades para las probetas de 10 M	67
Tabla 22. Resistencia del geopolímero a 10 M a 35 días de curado	68
Tabla 23. Resistencia del geopolímero a 15 M	69
Tabla 24. Resultado pruebas prueba TCLP	70
Tabla 25. Mezclas y número de pruebas	72
Tabla 26. Efectos estimados del modelo completo para el modelo 10 M a 28 días de secado	72
Tabla 27. Resultados del modelo completo 10 M a 28 días de curado	73
Tabla 28. Resultados ANOVA Completo modelo 10 M a 28 días de curado	73
Tabla 29. Matriz de correlación para los coeficientes estimados de las mezclas geopoliméricas a 10 M a 28 días de curado	75
Tabla 30. Resultados estimados para resistencia de las mezclas a 10 M a 28 días de curado	76
Tabla 31. Efectos estimados del modelo completo para resistencia (kg/cm ²) de las mezclas a 10 M a 35 días de curado	78
Tabla 32. Resultados del modelo completo de las mezclas a 10 M a 35 días de curado	78
Tabla 33. Resultados tabla ANOVA para resistencia mezclas a 10 M a 35 días de curado	78
Tabla 34. Resultados de ajuste de modelo para resistencia de las mezclas a 10 M a 35 días de curado.	79

Tabla 35. Matriz de correlación para los coeficientes estimados de las mezclas a 10 M a 35 días de curado 81

Tabla 36. Resultados estimados para resistencia de las mezclas a 10 M a 35 días de curado 82

RESUMEN

El presente trabajo de investigación denominado "Inmovilización de relaves de flotación de sulfuro de cobre en Tacna mediante el uso de geopolímeros", tiene como objetivo determinar y cuantificar las propiedades mecánicas óptimas de un geopolímero para la inmovilización de los relaves depositados en canchas de relaves. Para este propósito se ha utilizado el relave de las concentradoras de Cuajone y Toquepala donado por la empresa minera Southern Perú, tomado al ingreso a la relavera de Quebrada Honda, la ceniza volante donada por la empresa ENGIE (Antes ENERSUR ILO) y el metacaolín. Luego se caracterizó el relave, cenizas volantes y metacaolín mediante análisis físicos, químicos y microscópicos para determinar los componentes necesarios para la formación del geopolímero. Al ser mezclados en proporciones adecuadas se le adicionó la solución activadora 10 M de NaOH en una razón sólido a líquido de 5 a 1 entre los relaves secos y la solución activadora. Esta mezcla debidamente homogenizada se moldeó en probetas de forma cilíndrica y cúbica, las cuales se sometieron a un proceso de curado entre 28 y 35 días. La probeta de 55 % relave, 37,5 % Ceniza Volante y 7,5 % Metacaolín arrojó una resistencia a la compresión máxima de 14,08 MPa a 28 días y de 24,60

MPa a 35 días de curado, por tanto, aceptable. Sin embargo, se observó que para el geopolímero al 100 % de composición en relave arrojó una resistencia de 22,68 MPa en solución de 10 M de NaOH, y a solución de 15 M de NaOH arrojó una resistencia de 19,26 MPa.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, las actividades industriales minero-metalúrgicas desarrolladas a nivel mundial, nacional y particularmente en la región Tacna, han sido y son de gran interés económico potencial para los agentes estratégicos como la universidad, estado y empresa privada, teniendo en cuenta el volumen de material que se procesa en las industrias mineras y la cantidad de residuos provenientes de estas actividades son de preocupación para la sociedad en general, teniendo en cuenta los diferentes conflictos sociales que se producen por el temor a la contaminación ambiental, y siendo el Perú un país costumbrista es un deber de la academia con los diferentes agentes estratégicos, buscar alternativas e innovar los procesos minero-metalúrgicos, donde el presente trabajo de investigación busca de alguna manera innovar en la remediación ambiental para el tratamiento de relaves de flotación de cobre en Tacna, se demostró ser útiles para la conformación de geopolímeros logrando así obtener propiedades óptimas para la resistencia mecánica y estabilidad química óptima, es decir, inmoviliza todos los minerales con metales pesados.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción del problema

En el actual contexto socio-ambiental es necesario el desarrollo de técnicas modernas. Surge entonces, la necesidad de desarrollar nuevos métodos para la gestión de pasivos ambientales/relaves. La cantidad de relaves producidos por el proceso de flotación de minerales de cobre y otros sulfuros metálicos, según su composición, está comprometida, de alguna manera, con la alteración del medio ambiente, cuando su operación o diseño no son los adecuados. En el Perú hay aún un porcentaje de empresas que generan dichos pasivos al cierre de sus operaciones; pero otras cumplen la reglamentación estatal, las cuales como medidas de gestión también podrían mejorar su manejo de residuos sólidos mineros, en busca de soluciones socialmente equitativas, económicamente viables y ambientalmente seguras.

1.2. Antecedentes del problema

1.2.1. Realidad minera en el Perú

La minería en el Perú se ha desarrollado desde tiempos preincaicos hasta la actualidad, efectuándose de diferentes maneras a lo largo de la

historia, lo que hace a Perú un país minero por excelencia, la minería peruana representó el 80,1 % de las exportaciones tradicionales de la economía peruana en el 2015, mediante la extracción, producción y exportación de cobre, oro, plata, zinc, hierro, plomo, estaño y molibdeno, se ha impulsado el sólido crecimiento económico del Perú en las últimas décadas.

Lo que ha marcado un despegue de la minería hacia el mundo, el boom de las materias primas ha mejorado nuestra economía y la calidad de vida de la población peruana, el sector minero es importante también por el volumen de empleo que genera, tanto directo (empresas mineras y empresas contratistas) como indirecto (empresas proveedoras de servicios múltiples, etc.). En la Figura 1 se puede observar que la participación del empleo minero total (directo e indirecto) sobre el total de la población económicamente activa (PEA) ocupada ha tenido un importante crecimiento en estos últimos años, en relación al empleo indirecto, según el Instituto Peruano de Economía (2017), por cada trabajo que se crea en el sector minero, se generan nueve trabajos adicionales en el resto de la economía. Lo que significa un gran avance en desarrollo y nivel de vida para los peruanos, sin embargo, los conflictos sociales de parte de las comunidades o sectores de la sociedad, o el Estado hacia las empresas mineras han generado distintos tipos de posición en muchos casos por la

falta de conocimiento de la población acerca del desarrollo de nuevas tecnologías minero-metalúrgicas y el manejo sostenible que las empresas formales presentan en comparación a la minería que se practicaba hace decenas de años y la minería informal, lo que aun generan controversia entre los sectores de la población.

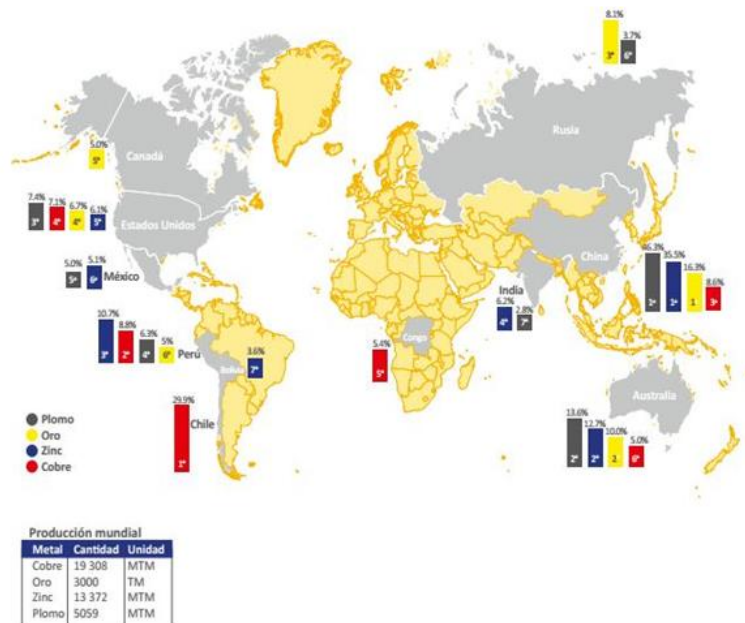


Figura 1. Ranking (o) y participación (%) de los principales países en el nivel de producción mundial de metales, 2015.

Fuente: Banco mundial y usos. elaboración: gpae-osinergmin

1.2.2. Realidad minera en Tacna

El sector minero de la región Tacna es un sector desarrollado y considerado una de las regiones mineras por excelencia por la presencia de importantes proyectos en ejecución, lo que ha traído desarrollo y progreso. En la actualidad, Tacna es una de las regiones más prósperas

del sur del país, pese a tener una economía y una población pequeña. La región concentra el 1,2 % de la producción del país, y alberga a poco más de 350 mil habitantes (1,1 % del país). Sin embargo, se han presentado de igual forma conflictos sociales por el uso y manejo de los recursos en materia ambiental, lo cual tuvo precedentes en años anteriores a la promulgación de las primeras regulaciones ambientales de 1993, ya que, no se contaba con las regulaciones ambientales fundamentales hasta ese tiempo, pero en la actualidad, la cooperación entre las empresas, estado, universidades y sociedad civil ha permitido una concertación que está siendo beneficiosa para la región Tacna, tal como se muestra en la Tabla 1 y la Figura 2.

Tabla 1

Indicadores estratégicos de la región Tacna-2017

Tacna: Indicadores Estratégicos de la Región 2017			
Variables	Unidad	Tacna	Perú
Superficie	Mil km ²	16	1 285
Población	Millones Hab.	0,4	32
Densidad Poblacional	Hab./Km ²	22	25
PBI Nominal	Millones US\$	2 493	215 384
PBI per Cápita	US\$	7 121	6 767
Exportaciones	Millones US\$	223	44 328
Tasa de Pobreza	%	13,3	21,7
Tasa de Pobreza Extrema	%	0,7	3,8
Tasas de Crecimiento			
Población	Cinco Años	0,6%	0,5%
PBI real	Cinco Años	3,5%	3,6%
Exportaciones	Cinco Años	-6,5%	-0,9%
Participación Región/País			
Superficie	%	1,3%	100%
Población	%	1,1%	100%
PBI Nominal	%	1,2%	100%
Exportaciones	%	0,5%	100%

Fuente: SUNAT / Elaboración: DDPI-MINCETUR.

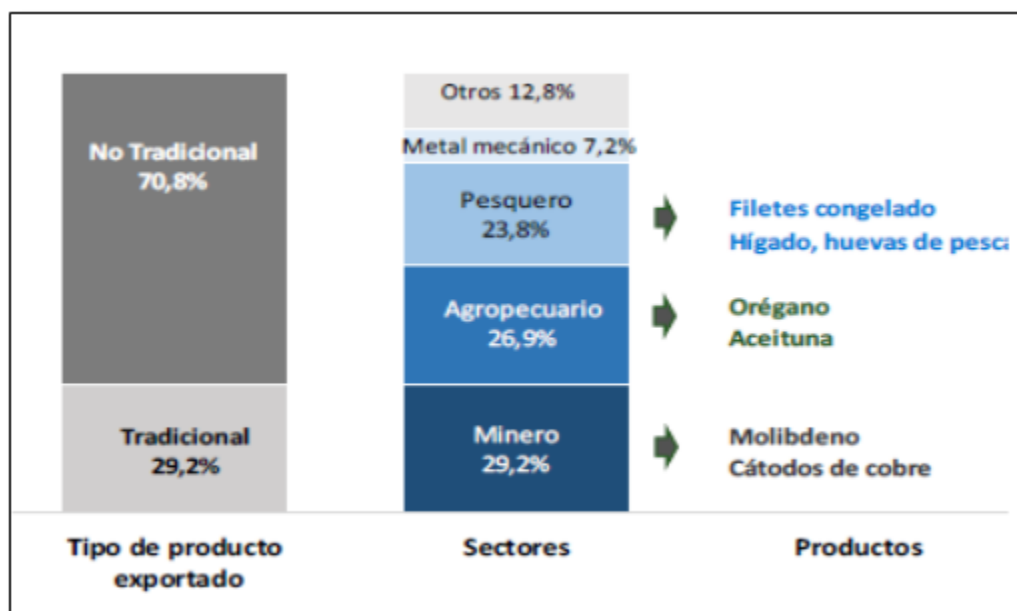


Figura 2. Exportaciones por tipo y sector julio 2017- junio 2018.

Fuente: SUNAT / Elaboración: DDPI-MINCETUR.

1.3. Problemática de la investigación:

La preocupación por la contaminación ambiental producto de la minería en el Perú ha dado como resultado la investigación más vehemente para el desarrollo de tecnologías de gestión y procesamiento de pasivos minero-metalúrgicos, el desarrollo de tecnologías sustentables, entre otras. Como resultado de esto, la introducción de tecnologías limpias en los procesos minero-metalúrgicos ha logrado disminuir las descargas de sustancias contaminantes al ambiente. En Tacna, la presencia de importantes operaciones mineras presenta índices de calidad acordes a las regulaciones estatales, cabe decir, que estos procesos aún se pueden

mejorar y desarrollar metodologías vanguardistas de gestión de pasivos ambientales, entre ellos, la disposición segura de relaves.

La contaminación por elementos metálicos pesados, son de las alteraciones ambientales más severas, además de gran dificultad de tratamiento por las cantidades de masa de tratamiento de los relaves. Los procesos extractivos minero-metalúrgicos por flotación de minerales sulfuro de cobre en Perú utilizan técnicas en las cuales se remueven enormes cantidades de material, el cual es procesado para extraer de estos una pequeña fracción de mineral valioso mediante el proceso flotación de espumas, este proceso descarga enormes cantidades de relaves los cuales son depositados en canchas de relaves previo tratamiento, sin embargo, muchos de algunos contaminantes metálicos, por las variaciones atmosférico-ambientales y condiciones naturales inherentes a la localidad, podrían reaccionar oxidándose o sulfatándose, originando de este modo, la formación de compuestos perjudiciales para el medio ambiente. Ello conlleva a la necesidad de encontrar nuevos métodos de inmovilización de pasivos ambientales a nivel físico y químico, aplicando técnicas ambientales vanguardistas, socialmente equitativas, económicamente viables y ambientalmente seguras.

En esa perspectiva, se propone inmovilizar los relaves de flotación de cobre mediante la formación de compuestos geopoliméricos, donde se

utiliza la composición inherente de éstos como los aluminosilicatos presentes tanto en los relaves producto de los procesos de flotación de cobre como en cenizas volantes que también son pasivos industriales, producto de procesos metalúrgicos o energéticos. Estos al aglomerarse en condiciones alcalinas, logran obtener propiedades mecánicas adecuadas y estabilidad química.

1.4. Formulación del problema

1.4.1. Problema principal

¿Cuál es el grado aceptable de inmovilización de relaves de la flotación de sulfuros de cobre mediante geopolimerización, para que este obtenga propiedades mecánicas adecuadas para la inmovilización?

1.4.2. Problemas específicos

¿Cuáles serán los aditivos a utilizar para acondicionar al relave de la flotación de sulfuros de cobre para que obtengan una inmovilización aceptable?

¿Cuál será el procedimiento para la formación de este geopolímero con relaves de flotación de sulfuros de cobre?

1.5. Justificación e importancia de la investigación

El presente estudio busca estabilizar relaves de flotación de sulfuros de cobre, utilizando el proceso de geopolimerización a fin de estabilizarlos y encapsular los minerales sulfuro que pueden generar aguas ácidas.

Su importancia radica en la innovación en el cierre de canchas de relaves y en el tratamiento de pasivos ambientales dejados por la explotación minera, de modo que sean socialmente equitativas, económicamente viables y ambientalmente seguras.

1.6. Alcances y limitaciones

1.6.1. Alcances de la investigación

Este estudio se realizó experimentalmente a nivel de laboratorio, con relave producto de la flotación de minerales sulfuros de cobre.

1.6.2. Limitaciones

➤ Limitación espacial

La investigación se desarrolló en los laboratorios de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales (ESME) de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann-Tacna (UNJBG).

➤ **Limitación temporal**

La investigación se desarrolló entre los meses de octubre de 2018 y agosto de 2019.

➤ **Delimitación legal**

La muestra empleada para este estudio fue tomada del ingreso de la cancha de relaves de Quebrada Honda, hecho que contó con el permiso de la empresa Southern Perú en concordancia con el convenio interinstitucional UNJBG-Southern Perú vigente, mediante la Resolución de CU N° 14464-2017-UN/JBG de fecha 27 de diciembre 2017. Debe quedar claro que, no es solicitado ni financiado por la Empresa Southern Perú, por lo tanto, no la obliga a tomar o no los resultados y propuesta aquí esbozados.

1.7. Objetivos

1.7.1. Objetivo principal

Inmovilizar los relaves de flotación de cobre (sulfuros de cobre) mediante geopolimerización en Tacna.

1.7.2. Objetivos específicos

1. Determinar los aditivos a utilizar para acondicionar al relave de la flotación de cobre (sulfuros de cobre), para que obtengan una inmovilización aceptable.
2. Determinar el procedimiento para la formación de los geopolímeros con relaves de flotación de sulfuros de cobre.

1.8. Hipótesis

1.8.1. Hipótesis general

La realización del proceso de geopolimerización tiene un grado aceptable de inmovilización de relaves de flotación de sulfuros de cobre.

1.8.2. Hipótesis específicas

Los aditivos determinados para la geopolimerización con relaves son los adecuados.

El desarrollo del proceso de geopolimerización permite proponer un procedimiento propio para la inmovilización de relaves de flotación de cobre.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2. Antecedentes del problema

Mackenzie, Waijarean, Asavapisit, Guy y Jameson (2017), en su artículo “Synthesis and properties of geopolymers based on water treatment residue and their immobilization of some heavy metals” publicado en la revista especializada Applied Clay Science, en el que sintetiza polímeros inorgánicos (geopolímeros) mediante la activación alcalina de residuos de tratamiento de agua, un material de desecho que contenía aluminosilicatos y una concentración significativa de hierro en forma de un gel de óxido de nanopartículas férricas. El efecto sobre las estructuras de estos geopolímeros de incorporar los metales pesados como cromo, zinc y hierro, como ocurre en las aguas residuales industriales, fue estudiado por su adición en la etapa de síntesis de geopolímeros, tanto como hidróxidos pre-preparados como soluciones de nitratos 1 M, concluyendo que los geopolímeros son potencialmente fuertes para soportar la manipulación y el transporte y son capaces de inmovilizar desechos que contienen estos metales pesados para su almacenamiento o eliminación.

Waijarean, Suwimol, y Kwannate (2014), en su artículo titulado “Strength and microstructure of water treatment residue-based geopolymers containing heavy metals” publicado en la revista especializada “Construction and Building Materials”, el cual investigó el uso de residuos de tratamiento de agua, (water treatment residue-based) (WTR), como material aluminosilíceo desde el cual se pueden sintetizar geopolímeros. Quien trata previamente el WTR con una relación inicial $\text{SiO}_2: \text{Al}_2\text{O}_3$ de 1,78 por calcinación a temperaturas de 600, 800 y 900 °C durante 1 h. Se hizo reaccionar NaOH con WTR a una relación $\text{Na}_2\text{O}:\text{SiO}_2$ de 0,25. Sin tratamiento térmico de la WTR, el análisis de difracción de rayos X (DRX), demostró que no se produjo deshidroxilación de la halloicita, por lo que no se obtuvo ninguna resistencia durante las primeras etapas. Las muestras preparadas a partir de WTR calcinadas a 800 °C presentaron la mayor resistencia a todos los tiempos de curado. Los espectros FTIR (infrarrojos por transformada de Fourier), revelaron que la banda de vibración asimétrica mayor se desplazó a 1000 cm^{-1} , correspondiente a los productos de hidratación. Cuando se añadió lodo de recubrimiento a 50 % en peso, la fuerza obtenida por la muestra después de 28 días fue de 34 % de la muestra de control preparada a partir de WTR calcinada a 800 °C.

Barrie y Cappuyns et al. (2017), en su artículo titulado “Potential of inorganic polymers (geopolymers) made of halloysite and volcanic glass for

the immobilisation of tailings from gold extraction in Ecuador” publicada en la revista especializada “Applied Clay Science”, indican que las pastas de relave basadas en geopolímeros se sintetizaron utilizando materias primas disponibles localmente (vidrio volcánico, meta-halloysita y un activador de silicato de sodio. El geopolímero es insoluble en agua y posee suficiente resistencia mecánica (30 MPa de resistencia a la compresión) para ser utilizado en un sitio minero, para rellenar la superficie de las represas de relave. La meta-halloysita fue el principal componente activo en los geopolímeros. La microestructura, microquímica y resistencia a la compresión del geopolímero están influenciadas por la cantidad y composición de la solución activadora utilizada, se obtienen propiedades más óptimas cuando se utilizan altas relaciones de materia prima a solución de activación. La geopolimerización influye en la lixiviación de metales pesados, pero no da lugar a un mayor grado de inmovilización en comparación con los relaves que no se geopolimerizaron. En el caso actual, el Pb y el Zn, presentes en altas concentraciones en los relaves, se inmovilizan efectivamente, mientras que las concentraciones lixiviadas de As y Cu exceden los límites para su uso en materiales de construcción y, por lo tanto, el uso debe restringirse al ámbito minero. En comparación con los relaves no polimerizados, la geopolimerización da como resultado un pH aumentado del material de colas. El comportamiento de lixiviación

dependiente del pH de metales pesados de geopolímeros es comparable al comportamiento de lixiviación en suelos, sedimentos y materiales de desecho, es decir, un aumento en la liberación de arsénico (como arseniatos) y Cu (como hidróxidos) y una disminución de la lixiviación de la mayoría de los metales pesados y Ca a medida que aumenta el pH.

2.1. Bases teóricas

2.1.1. Geopolimerización

Provis y Deventer (2009), definen que la geopolimerización se produce cuando materiales ricos en sílice y alúmina reaccionan con una solución altamente alcalina para formar polímeros amorfos de aluminosilicatos semi-cristalinos. De acuerdo con la literatura, geopolimerización es un proceso complejo, que se puede dividir en los siguientes pasos: (1) la disolución de fases amorfas por solución alcalina; (2) el transporte, la orientación y la condensación de iones precursores en monómeros; (3) policondensación y polimerización de monómeros en polímeros de aluminosilicato amorfo a semi-cristalinos. Los geopolímeros resultantes exhiben excelentes propiedades físicas y químicas y, se pueden usar en diversas aplicaciones, tales como material de aislamiento, material de cemento, y la fijación de residuos. Su composición química es similar a

la de los materiales zeolíticos naturales, pero son, por lo general amorfos en vez de cristalinos.

2.1.2. Reacción de geopolimerización

2.1.2.1. Estructura y química de los geopolímeros

El elemento básico de un geopolímero es una cadena tetraédrica de silicio y aluminio mediante un intercambio de átomos de oxígeno. La unidad básica monomérica se le conoce como sialato, este término es una abreviación de (silico-oxo-aluminato) con fórmula empírica $(Mn(-(\text{SiO}_2)_z - \text{AlO}_2) n - w\text{H}_2\text{O})$. Donde M es un catión monovalente como sodio o potasio, w es el número de moléculas de agua asociadas, n, el grado de policondensación y z toma valores de 1, 2, 3, dependiendo del número de átomos de silicio sustituidos por el aluminio, basados en esto, hay diferentes estructuras monoméricas que definen los geopolímeros. Davidovits (1991) los clasificó en polisialato (PS), polisialatosiloxo (PSS) y polisialatodisiloxo (PSDS). Las estructuras de los polisialatos se pueden ver en la Figura 3.

<p style="text-align: center;">PS Poli(sialato)</p>	$\begin{array}{c} (-) \\ \quad \\ (-\text{Si}-\text{O}-\text{Al}-\text{O}-) \\ \quad \\ \text{O} \quad \text{O} \\ \quad \end{array}$
<p style="text-align: center;">PSS Poli(sialato-siloxo)</p>	$\begin{array}{c} (-) \\ \quad \quad \\ (-\text{Si}-\text{O}-\text{Al}-\text{O}-\text{Si}-\text{O}-) \\ \quad \quad \\ \text{O} \quad \text{O} \quad \text{O} \\ \quad \quad \end{array}$
<p style="text-align: center;">PSDS Poli(sialato-disiloxo)</p>	$\begin{array}{c} (-) \\ \quad \quad \quad \\ (-\text{Si}-\text{O}-\text{Al}-\text{O}-\text{Si}-\text{O}-\text{Si}-\text{O}-) \\ \quad \quad \quad \\ \text{O} \quad \text{O} \quad \text{O} \quad \text{O} \\ \quad \quad \quad \end{array}$

Figura 3. Tipos de polisialatos.

Fuente: Davidovits, J., 1999.

La estructura presenta una carga negativa debido a la sustitución de Si^{4+} con Al^{3+} , este exceso de carga se ve compensado con la presencia del catión de metal alcalino (Na^+ o K^+). El proceso de geopolimerización es exotérmico y se lleva a cabo a través de oligómeros, que proporcionan las unidades para la formación de la estructura tridimensional macromolecular Davidovits (1999). La geopolimerización involucra la reacción química bajo condiciones altamente alcalinas de los materiales de partida ricos en Al y Si, produciendo enlaces poliméricos del tipo Si-O-Al-O, lo cual se representa esquemáticamente en las reacciones [1] y [2], definidas por Komnitsas y Zaharaki (2007):

se presente la policondensación de aluminosilicato, que ocurre generalmente en la superficie sólida debido a que la densidad del gel es mayor.

- b) Reestructuración. En la solución, los aluminosilicatos precursores son móviles y son capaces de orientarse parcialmente a un estado termodinámicamente más estable.
- c) Endurecimiento. La condición saturada es alcanzada cuando la concentración de la disolución es mayor que las concentraciones de las especies saturadas. En el punto de sobresaturación, la polimerización de Al^{3+} y Si^{4+} se produce de inmediato. Este paso también se caracteriza por la expulsión de agua molecular del gel geopolimérico, por lo tanto, suele verse acompañado de una contracción.

2.1.2.2. Reacción de geopolimerización

La reacción de geopolimerización se produce bajo condiciones altamente alcalinas del material, compuesto por aluminosilicatos y una solución activadora. Está basada en una mezcla de hidróxido de sodio y un silicato alcalino, pudiendo ser el sodio a condiciones ambientales. En muchas investigaciones suelen usar metacaolín o ceniza volante como material para la síntesis de geopolímeros. Provis y Deventer (2009) fueron quienes explicaron las etapas de geopolimerización. Ellos indican que el

modelo de geopolimerización no es lineal como se muestra en la Figura 4, si no que todas las etapas pueden ocurrir a la vez. Provis y Deventer (2009) en forma simple mencionan que la primera etapa involucra la disolución de los aluminosilicatos en monómeros. Posteriormente se forman dímeros, trímeros, tetrámeros, hasta llegar a la precipitación de un gel de aluminosilicatos. A este gel se le denomina gel 1 y es rico en Al. La siguiente etapa es la formación del gel 2, en donde el Si comienza a disolverse y se incorpora al gel ya presente. La reorganización que se lleva a cabo con la incorporación del silicio es la última etapa, y esta es importante para generar las propiedades mecánicas del material.

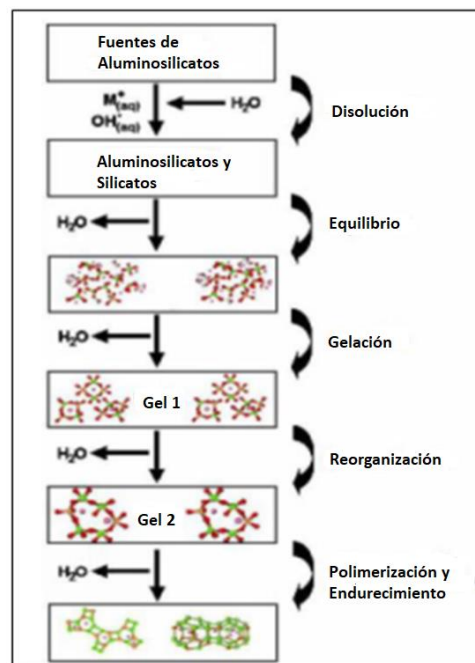


Figura 4. Proceso de geopolimerización.

Fuente: Provis, L., y Deventer J. (2009).

La cinética de cada una de estas etapas varía según el tipo de material de partida o fuente de aluminosilicatos, temperatura de curado, relación líquido/sólido, concentración de silicato alcalino, contenido de agua y la condición de reacción, de igual manera estas variables pueden definir las propiedades del geopolímero.

Para otros autores como Xu, Deventer y Lukey (2001), el proceso de geopolimerización involucra una serie de mecanismos de lixiviación, difusión, condensación y etapas de endurecimiento, en contraste a los procesos que ocurren en las zeolitas, que involucran prenucleación, nucleación y crecimiento de cristales. Estos procesos además ocurren a diferentes temperaturas.

Duxson, Fernández, Provis, Palomo y Deventer (2007) indican que la función de la disolución de los materiales de partida cumple un doble papel, en primer lugar, las especies que forman polisialato se liberan de los materiales de partida, en segundo lugar, contribuyen al aumento de resistencia mecánica final de la estructura.

Después de la geopolimerización, las partículas no disueltas quedan unidas a la matriz, de manera que la dureza de estos minerales está relacionada positivamente con la resistencia a la compresión final. En ocasiones se hace adición de solución de silicato de sodio para mejorar la

formación de precursores de geopolímeros al entrar en contacto con el mineral y la solución. La concentración de silicato de sodio utilizado en diferentes investigaciones oscila entre 0,72 a 3,96 M, tal como lo expresan Palomo, Grutzeck y Blanco (1999).

2.2. Variables que intervienen en la síntesis de materiales geopoliméricos

Komnitsas, Zaharaki, Perdikatsis, (2009) han encontrado que el contenido de agua, tiempo de reacción, la temperatura de curado, la composición y concentración del medio alcalino (solución activante), la relación $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ y el tamaño de partícula de la materia prima afectan las velocidades de dilución y precipitación de aluminosilicatos amorfos y el desempeño mecánico del geopolímero.

2.2.1. Efecto del contenido de agua

Hardjito, Wallah, Sumajouw y Rangan (2004) reportan que la presencia de un mayor contenido de agua aumenta la trabajabilidad en geopolímeros base metacaolín o cenizas volantes, además de la homogeneidad en las estructuras obtenidas. Sin embargo, el incremento de ésta disminuye la resistencia a la compresión tal como lo sostienen Barbosa, MacKenzie, y Thaumaturgo (2000), debido a que aumenta la porosidad causada por la evaporación del exceso de agua, impactando las

propiedades mecánicas del producto final. Adicionalmente, la segregación de los activadores alcalinos puede incrementarse con el aumento en la cantidad de agua, lo que genera heterogeneidad en el sistema. Debido a esto, una de las variables más críticas en la síntesis de geopolímeros es el contenido de agua.

2.2.2. Temperatura y tiempo de curado

Las condiciones reportadas de temperatura y tiempo de curado son ampliamente variadas, resultando en ocasiones contradictorias. Inicialmente en sus estudios Davidovits (1982), propuso temperaturas inferiores a los 373,15 K (100 °C), sin embargo, en estudios recientes la temperatura puede variar entre 313,15 K (40 °C), 333,15 K (60 °C) y 358,15 K (85 °C) (Yip, Lukey y Deventer 2003; Barbosa et al, 2000; Palomo y Grutzeck et al, 1999). Además de la temperatura, el tiempo de curado ha sido un factor importante en el desarrollo de buenas propiedades mecánicas en los sistemas geopoliméricos. En investigaciones recientes se ha encontrado que el tiempo varía desde 2 a 24 horas (Lee y Deventer, 2004; Cheng y Chiu, 2003).

Dependiendo del material utilizado en la síntesis de geopolímeros se puede emplear diferentes temperaturas de curado. El curado a temperatura ambiente ha sido llevado a cabo exitosamente cuando se utiliza como

material de partida productos calcinados de origen geológico puro como el metacaolín (Davidovits,1999) y también Palomo et al (1999) encontraron que la temperatura óptima varía entre 338,15 K (65 °C) y 358,15 K (85 °C), sin embargo, observaron que conforme se aumenta el tiempo de curado, las propiedades mecánicas pueden disminuir. Las temperaturas altas aceleran el proceso de geopolimerización, obteniéndose un conformado en un tiempo menor, que puede variar desde 2 a 24 horas.

2.2.3. Composición química del material

Según, Provis y Deventer (2009) indican que la composición del material de partida también afecta la velocidad de reacción, encontrándose que ante la falta de aluminio este se incorpora dentro de una solución para controlar la velocidad, la estequiometría y la prolongación de las fases reaccionantes. En estudios recientes, concluyen que no existen composiciones estandarizadas para cada sistema geopolimérico ya sean de metacaolín, cenizas volantes, mezcla de estos u otros precursores y la composición final de cada sistema en estudio depende de las propiedades iniciales de los materiales. Es así que, manejan las composiciones con respecto a la relación $\text{SiO}_2/\text{M}_2\text{O}$ (S/M), donde M puede ser Na o K.

De acuerdo con Rahier, Simons, Mele y Biesemans (1997) el efecto de incrementar la relación S/M hasta el límite que sea permitido por el material de partida implica:

- Incremento en la resistencia a la compresión.
- Retardamiento de los procesos de fraguado y endurecimiento.
- Incremento en la temperatura de transición vítrea, indicando que las propiedades térmicas se mejoran en los sistemas geopoliméricos.
- Incremento en el cambio de las bandas vibracionales de espectroscopía de infrarrojo (IR) y resonancia magnética nuclear de silicio (RMN Si) a campos de mayor energía, sugiriendo que los enlaces químicos y la estructura de corto alcance están más polimerizadas y con menor sustitución de aluminio.
- Disminución de la cristalinidad y aumento en la homogeneidad de los productos de reacción.

2.2.4. Concentración del medio alcalino (solución activante)

Una variable que incide muy fuertemente es la solución activante, la cual puede ser de dos tipos: hidróxidos alcalinos y silicatos disueltos en el activador básico. Dependiendo del tipo de activador alcalino se obtendrá una determinada composición del producto final y por consiguiente diferentes propiedades mecánicas. Una de estas propiedades es la

resistencia a la compresión, definida como una medida primaria de la utilidad de un material usado en diferentes aplicaciones en la industria de la construcción, porque es el esfuerzo máximo que puede soportar un material bajo una carga de aplastamiento. Los estudios reportan que la síntesis de un geopolímero con silicato en solución presenta mayor resistencia a la compresión, que cuando se utiliza una solución activante alcalina. Los silicatos disueltos en la solución activante tienen 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. En cuanto a las soluciones alcalinas, estas aportan el grupo ion OH^- que actúa como un catalizador de la reacción, y el metal catiónico alcalino interviene como un elemento formador de la estructura para balancear la carga negativa de la configuración del aluminio tetraédrico. Se ha demostrado que el NaOH posee una capacidad más alta que el KOH para liberar monómeros de silicato y aluminato de la fuente de aluminosilicatos. Como consecuencia, los cationes de sodio tienen mejores capacidades de zeolización en la formación de polímeros, posiblemente porque son más pequeños que los cationes potasio y por consiguiente migran más fácilmente a través de la red de gel húmeda. Se ha identificado que, para la obtención de productos geopoliméricos con elevada resistencia, es necesario considerar las relaciones $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$; $\text{M}_2\text{O}/\text{SiO}_2$; $\text{H}_2\text{O}/\text{M}_2\text{O}$ y

M_2O/Al_2O_3 , donde M representa los metales alcalinos presentes (K, Na, Ca, Ba y Li). Desde el punto de vista de la composición, la relación más conveniente entre óxidos para el procesamiento del geopolímero debe estar alrededor del 3,3 a 4,5 (SiO_2/Al_2O_3), 0,20-0,48 (Na_2O/SiO_2) y 0,80 – 1,60 (Na_2O/Al_2O_3) (Palomo y Alonso, 2001).

2.2.5. Tamaño de partícula de la materia prima

Es importante mencionar que la velocidad de la reacción de activación depende de la distribución del tamaño de partícula, ya que una activación mecánica (como una molienda más fina) se reflejará en una mejor activación química porque el medio alcalino entrará en contacto con mayor facilidad con los materiales aluminosilicatos (Montes, 2014).

2.3. La actividad minera y el origen del relave

La minería es una actividad extractiva que consiste en la obtención selectiva de minerales y otros materiales obtenidos de la corteza terrestre, la cual, en muchos casos, implica la extracción física de grandes cantidades de minerales, para recuperar sólo pequeños volúmenes del producto deseado. Existe una gran variedad de minerales explotados a lo largo del territorio nacional como los metales (oro, plata, cobre, hierro, etc.), los minerales industriales (potasio, azufre, cuarzo, etc.), los materiales de

construcción (arena, áridos, arcilla, grava, etc.), las gemas (diamantes, rubíes, zafiros y esmeraldas), y combustibles (carbón, lignito, turba, petróleo y gas). La Guía para el manejo de relaves mineros (MINEM, 1993) sostiene que el chancado y molienda de minerales genera un volumen de relaves que es aproximadamente dos tercios más grande que el volumen original del mineral “in situ”, es por ello que su disposición, procurando que sea económicamente factible, así como física y químicamente estable, es tal vez el mayor problema ambiental asociado con el desarrollo minero.

2.3.1. Relaves de flotación de sulfuros de cobre.

Los relaves procedentes del proceso de flotación son, por lo general, de naturaleza sulfurada con alto contenido de metales pesados como cobre, plomo, zinc, hierro, cadmio, arsénico. Por esta razón, los relaves tienen la potencialidad de ser grandes generadores de aguas acidas, cuando están en medios circundantes a fuentes de agua (MINEM, 1993).

2.4. Definición de términos

2.4.1. Geopolímero

Davidovits, J. (2011) define que el geopolímero representa a un amplio rango de materiales conformados en sí por cadenas o redes de moléculas inorgánicas. Estos materiales forman una matriz constituida por

una fuente de aluminosilicato (usualmente en forma de metacaolín, ceniza volante o escoria) activada por medio de una solución alcalina de silicato de sodio/potasio en temperatura ambiente o ligeramente elevadas (353,15 K – 373,15 K; o 80-100 °C).

2.4.2. Inmovilización

Wilson, Balkau, y Thurgood (2005), definen como un proceso donde los potenciales agentes contaminantes son inmovilizados con éxito en una estructura de residuos estabilizados o solidificados y aislados del medio ambiente, haciéndolos inadecuados para la lixiviación.

2.4.3 Flotación de minerales sulfuros de cobre

Wills y Finch (2016), definen que la flotación es un proceso de separación que aprovecha las diferencias naturales e inducidas en las propiedades de la superficie de los minerales, ya sea que la superficie se moje fácilmente con agua, es decir, que sea hidrofílica o que repele el agua, es decir, que sea hidrofóbica. Si es hidrofóbica, la partícula mineral puede adherirse a las burbujas de aire y flotar. El sistema es complejo, involucra tres fases (sólidos, agua y aire) y la interacción de variables químicas y físicas. Las variables químicas tienen como objetivo controlar la transición entre el estado hidrofílico e hidrofóbico. Las variables físicas incluyen las

que resultan de las propiedades del mineral, como el tamaño y la composición de las partículas (liberación), y los factores derivados de la máquina, como la tasa del aire y el tamaño de la burbuja. El mecanismo de recuperación del mineral de valor por flotación de la pulpa comprende tres mecanismos:

1. Adhesión selectiva a las burbujas de aire (o "flotación verdadera").
2. Arrastre en el agua que atraviesa la espuma.
3. Atrapamiento físico entre partículas en la espuma unida a burbujas de aire (a menudo denominado "agregación").

Las partículas minerales solo pueden unirse a las burbujas de aire si son, en cierta medida, hidrofóbicas. Habiendo alcanzado la superficie de la pulpa, las burbujas de aire solo continúan soportando las partículas minerales si pueden formar una espuma estable, de lo contrario se romperán y dejarán caer las partículas minerales. Para alcanzar estas condiciones, es necesario utilizar los numerosos compuestos químicos conocidos como reactivos de flotación.

2.4.4. Relaves

El MINEM (2017), lo define como el deshecho mineral sólido de tamaño entre arena y limo provenientes del proceso de concentración que son producidos, transportados o depositados en forma de lodo.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3. Tipo y diseño de la investigación

3.1. Tipo de investigación

La presente investigación es de orden experimental, según Arias (2012) indica que la investigación experimental es un proceso que consiste en someter a un objeto o grupo de individuos, a determinadas condiciones, estímulos o tratamiento (variable independiente), para observar los efectos o reacciones que se producen (variable dependiente). En cuanto al nivel, la investigación experimental es exploratoria y explicativa, cuyo propósito es demostrar que los cambios en la variable dependiente fueron causados por la variable independiente. Es decir, se pretende establecer con precisión una relación causa-efecto.

Según Hernández, Fernández y Baptista (2014), es exploratoria porque se realiza cuando el objetivo es examinar un tema o problema de investigación poco estudiado, del cual se tienen muchas dudas o no se ha abordado antes. Es decir, cuando la revisión de la literatura reveló que tan sólo hay guías no investigadas e ideas vagamente relacionadas con el

problema de estudio, o bien, si deseamos indagar sobre temas y áreas desde nuevas perspectivas, como lo es el presente estudio, y, es explicativa porque va más allá de la descripción de conceptos o fenómenos o del establecimiento de relaciones entre conceptos; es decir, están dirigidos a responder por las causas de los eventos y fenómenos físicos o sociales. Como su nombre lo indica, su interés se centra en explicar por qué ocurre un fenómeno y en qué condiciones se manifiesta o por qué se relacionan dos o más variables.

3.2. Diseño de la investigación

Hernández, Fernández y Baptista (2014) indican que el diseño de investigación es un plan o estrategia para obtener la información requerida, que de ser positiva, genera conocimiento.

Para llevar a cabo el desarrollo de este estudio se realizó diferentes pruebas o experimentos a nivel laboratorio con el fin de caracterizar los componentes actuantes y de búsqueda de la manera de inmovilizar los relaves de flotación. El diseño estadístico que se utilizó fue el de superficie respuesta. Montgomery (2005), define que la metodología de superficie respuesta es una colección de técnicas matemáticas y estadísticas útiles en el modelo y el análisis de problemas en los que una respuesta de interés recibe influencia de diversas variables y donde el objetivo es optimizar esta

respuesta. Obtenida esta respuesta se realizaron los análisis químicos y físicos para observar las propiedades del geopolímero logrado con relaves de flotación de sulfuros de cobre, tal como se muestra en la Figura 5.

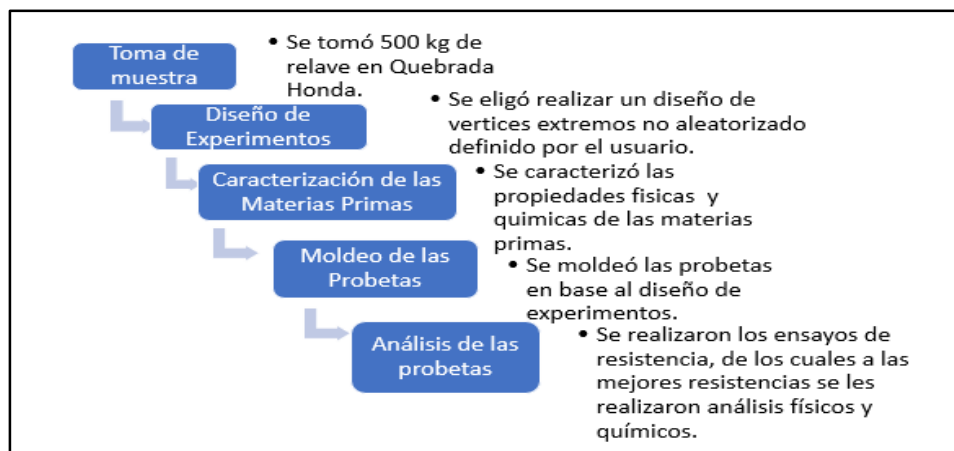


Figura 5. Esquema del proceso experimental de inmovilización de relaves.

Fuente. Elaboración propia, 2019.

3.3. Población y muestra

3.3.1 Población

La población en este estudio está constituida por el relave que se deposita en la cancha de relaves de Quebrada Honda, proveniente de las Plantas Concentradoras de Toquepala y Cuajone, el cual bordea las

100 000 t/d.

3.3.2 Muestra

Del canal se muestreó aproximadamente 500 kg. El proceso de muestreo se realizó con baldes bajo estricta observancia de seguridad por ser un canal abierto que transporta el relave en forma de pulpa. Esta muestra de relave se transportó al Laboratorio de Mineralurgia de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales de la UNJBG en depósitos debidamente cerrados para que no se altere la muestra.

Las muestras para las pruebas experimentales se obtuvieron en función al diseño experimental empleado, denominado diseño experimental de vértices extremos o de mezclas no aleatorizado especificado por el usuario. Un diseño de experimentos con mezclas que tienen componentes o ingredientes, consiste en un conjunto de experimentos en los que se prueban combinaciones particulares o mezclas de dichos ingredientes. Si se denotan por $x_1, x_2, x_3 \dots x_q$, las proporciones en las que participan los componentes de la mezcla, se deben satisfacer dos restricciones: $0 \leq x_i \leq 1$ para cada componente i y $\sum_{i=1}^q x_i = 1$. Estas restricciones indican que la suma de todos los componentes que integran la mezcla debe ser 100 %, esto significa que los componentes que integran la mezcla no pueden ser manipulados independientemente unos de otros y que sus proporciones deben variar entre 0 y 1 (Ortega, Bustamante, Gutiérrez y Correa, 2014). Para el presente estudio se ha utilizado el software Statgraphics Centurion

XVI.II, cuyos rangos de valores de cada una de las variables en estudio, se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2

Valores de las variables reales del diseño experimental utilizado.

N°	Bloque	Relave	Ceniza	Metacaolín
1	1	0,700	0,300	0,000
2	1	0,400	0,600	0,000
3	1	0,600	0,300	0,100
4	1	0,300	0,600	0,100
5	1	0,600	0,375	0,025
6	1	0,450	0,525	0,025
7	1	0,550	0,375	0,075
8	1	0,400	0,525	0,075
9	1	0,550	0,450	0,000
10	1	0,650	0,300	0,050
11	1	0,350	0,600	0,050
12	1	0,450	0,450	0,100
13	1	0,500	0,450	0,050
14	1	0,300	0,700	0,000

Fuente: Elaboración propia, 2019.

Rangos a considerar:

$0,3 < \text{Relave} > 0,7 - 0,0 < \text{Ceniza} > 0,3 - 0,0 < \text{Metacaolín} > 0,1$

3.4. Operacionalización de variables

Con el propósito de desarrollar el presente estudio de investigación se han considerado las siguientes variables que fueron evaluadas mediante el diseño estadístico planteado anteriormente.

a) Variables independientes

- Relave.

- Ceniza volante.
- Metacaolín.

b) Variable dependiente

- Resistencia Mecánica (MPa).

c) Variables intervinientes bajo control

- pH, solución activadora.
- Solución de silicato de sodio (1 M).
- Clima. ($\leq 298,15$ K o 25 °C)
- Tiempo de secado de las probetas. (horas)

3.5. Técnica de recolección y análisis de datos

3.5.1. Toma de muestra de relave

La toma de muestra de estudio se realizó en el distrito de Ilabaya, provincia de Jorge Basadre, región Tacna, en el sur del Perú, de la Empresa Southern Perú Copper Corporation, sito canal de relaves que alimenta a la cancha de relaves de Quebrada Honda ubicada entre las coordenadas - 17.311460 Latitud Sur y -70.719489 Longitud Oeste, a una altitud entre los 3 100 y 3 600 msnm, tal como se muestra en la Figura 6 y la Figura 7.



Figura 6. Lugar de toma de la muestra de relave.

Fuente: Elaboración propia, 2019.



Figura 7. Transporte de la muestra de relaves.
Fuente: Elaboración propia 2019.

3.5.2. Muestra de ceniza volante

La muestra de cenizas volantes fue donada por la empresa ENGIE (Antes ENERSUR ILO), de donde posteriormente fueron llevadas a los laboratorios de la escuela profesional de Ingeniería Metalurgia y Materiales de la UNJBG. Como se muestra en la Figura 8.



Figura 8. Muestra de cenizas volantes.
Fuente: Elaboración propia, 2019.

Para la caracterización de la ceniza volante se realizó el muestreo por el método de cuarteo previa homogenización, para muestras de 500 g cada una para los diferentes tipos de análisis y pruebas que se realizó.

3.5.3. Técnica de análisis de datos

Para el desarrollo de los análisis estadísticos de datos se utilizó el software Statgraphics Centurión XVI.II (en modo prueba).

3.6. Materiales y equipos

Para la realización del presente estudio ha sido necesario contar con los siguientes materiales y equipos:

- Baldes de plásticos 25 L.
- Cilindros de plásticos 50 L.
- Agua
- Vaso precipitado 250 mL.
- Probeta 200 mL.
- Piceta.
- Mallas metálicas.
- Papel filtro N° 42.
- Pipeta 10 ml y 50 mL.
- Probeta.
- Bandejas de metal.
- Tubos de ensayo.
- Espátula.
- pH-metro.

- Mesa rodillos.
- Muestreador rotatorio tipo Gilson.
- Balanza analítica.

Reactivos químicos utilizados en el estudio de investigación

- Hidróxido de sodio.
- Silicato de sodio.
- Otros reactivos para análisis químico.

3.7. Desarrollo experimental

3.7.1. Fabricación de las probetas

Teniendo en cuenta que se desarrolló dos modelos estadísticos, un modelo exploratorio y un modelo de optimización se efectuó la fabricación de las probetas utilizando dos tipos de moldes de (5 cm x 5 cm y 10 cm x 10 cm) las cuales se moldearon entre los meses de diciembre 2018, enero y febrero de 2019. Luego se realizó el estudio micrográfico y análisis por fluorescencia de rayos X en el microscopio electrónico de barrido (MEB) de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalurgia y Materiales de la UNJBG, con el fin de determinar las fases mineralógicas y la composición química de los relaves y cenizas, así como tomar las micrografías correspondientes a los materiales utilizados para la realización de esta investigación.

Para encontrar las condiciones óptimas del geopolímero planteado se comparó con un material similar en propiedades mecánicas y objetivas como es el cemento referenciado por la norma NTP 334.009 (2002) CEMENTOS. “Cementos Portland”, donde se establecen los requisitos físicos y de resistencia (MPa); para este caso, se consideran X MPa a 28 días de curado, considerándose las condiciones inherentes a la investigación.

3.7.2. Procedimiento para la formación de los geopolímeros

Se ha establecido y llevado a cabo el siguiente procedimiento:

- Secar el relave a temperatura ambiente durante una semana.
- Una vez secado el relave debe ser mezclado homogéneamente con las cenizas volantes durante al menos un par de minutos, posteriormente, este debe ser mezclado con la solución activadora de 10 M de NaOH con una relación sólido/líquido de 5 a 1, este debe estar completamente homogéneo para su posterior conformado.
- (Como se ha observado experimentalmente, no es necesaria la utilización de las cenizas volantes ni de metacaolín para una buena resistencia en el geopolímero, por lo que solo agregando la solución activadora al relave se puede conformar el geopolímero con buenas propiedades mecánicas).

- Una vez que la mezcla está homogénea es vertida en sus respectivos moldes, para lo cual se recomienda que el material esté semipastoso para un óptimo conformado, ésta debe estar en lo más mínimo en contacto con el ambiente para un mejor acabado.
- El material debe estar en un proceso de curado de al menos 28 días para propiedades mecánicas medianas y 42 para las resistencias óptimas.

3.7.3. Análisis del geopolímero conformado en base de relaves

3.7.3.1. Ensayo de resistencia a la compresión

Los ensayos de resistencia fueron realizados en los laboratorios de la Escuela Profesional de Ingeniería de Minas de la UNJBG, Para el tratamiento de estas pruebas, previamente se realizaron las probetas de forma cúbica bajo la ISO 1920-4.

3.7.3.2. Determinación de la densidad

Se define la densidad como la masa por unidad de volumen. En un cuerpo físicamente homogéneo existe proporcionalidad entre los volúmenes que se consideran y las masas correspondientes a dichos volúmenes y esta constante de proporcionalidad se denomina densidad (ρ).

La determinación de la densidad de un cuerpo sólido puede simplificarse si el objeto presenta una forma definida, de tal forma que

resulte fácil calcular su volumen. Este es el caso de la determinación de la densidad de las probetas geopoliméricas cúbicas fabricadas para el presente trabajo. En este caso, los medios necesarios serán un calibrador, con el que medirá las dimensiones del cilindro y, además, una balanza para determinar la masa de dicho cuerpo.

3.8. Determinación del nivel de toxicidad del geopolímero

Para este cometido se ha recurrido a la realización de protocolos internacionales, se realizó la prueba TCLP (MA1089 EPA 1311 Toxicity characteristic leaching procedure) y para los metales totales, se realizó en un ICP OES, el cual se determinó por el protocolo, ICP OES MA0122 EPA. *Method 200.7. Revisión 4.4 1994. Determination of metals and trace elements in water and wastes by Inductively Coupled Plasma- Atomic. Emission Spectrometry.*

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4. Descripción de las materias primas

4.1. Análisis granulométrico para el relave

El análisis del tamaño de partícula, para el relave se denota un tamaño de partícula fino que está por debajo de la abertura de 106 μm definidos en la Tabla 3 y Figura 9.

Tabla 3

Distribución del tamaño de partícula del relave.

Malla	Abertura(μm)	Peso (g)	Retenido (%)	G(x) (%)	F(x) (%)
Malla	Abertura(μm)	Peso	Ret.(%)	G(x)	F(x)
20,00	850,00	0,00	0,00	0,00	100,00
30,00	600,00	9,75	0,49	0,49	99,51
40,00	425,00	55,40	2,76	3,25	96,75
50,00	300,00	170,42	8,51	11,76	88,24
70,00	212,00	270,83	13,52	25,28	74,72
100,00	150,00	248,04	12,38	37,66	62,34
140,00	106,00	259,45	12,95	50,61	49,39
200,00	75,00	124,72	6,22	56,83	43,17
270,00	53,00	134,68	6,72	63,55	36,45
325,00	45,00	64,22	3,21	66,76	33,24
400,00	38,00	29,28	1,46	68,22	31,78
500,00	25,00	183,17	9,14	77,36	22,64
635,00	20,00	19,33	0,96	78,32	21,68
-635,00	0,00	434,30	21,68	100,00	0,00

Fuente: Elaboración propia.

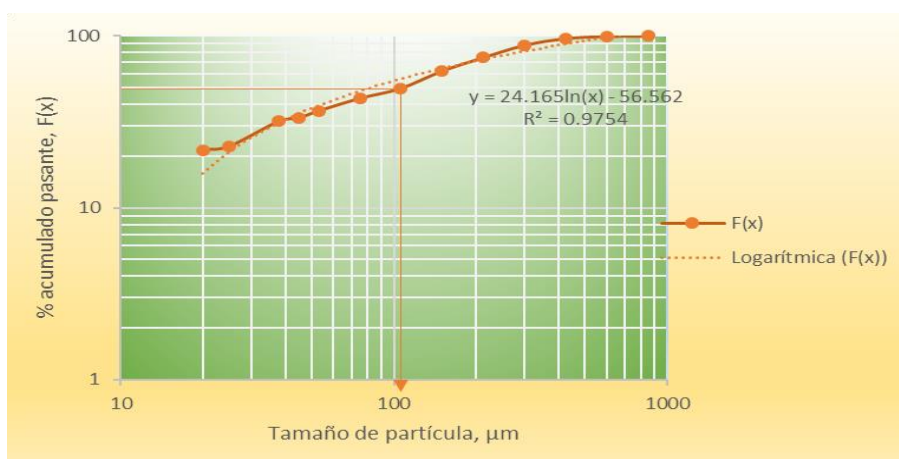


Figura 9. Análisis granulométrico del relave.

Fuente. Elaboración propia.

4.2. Análisis granulométrico de las cenizas volantes

El análisis del tamaño de partícula se da en la Tabla 3 para las cenizas volantes. Se denota un tamaño de partícula fino por debajo de 60 µm definidos en la Tabla 4 y Figura 10.

Tabla 4

Distribución del tamaño de Partícula de las cenizas volantes.

Malla	Abertura(µm)	Peso (g)	Retenido (%)	G(x) (%)	F(x) (%)
20	850	0,00	0,00	0,00	100,00
30	600	3,83	0,77	0,765	99,23
50	300	1,96	0,39	1,16	98,84
70	212	1,72	0,34	1,50	98,50
100	150	2,83	0,57	2,07	97,93
140	106	18,38	3,68	5,74	94,26
200	75	22,08	4,42	10,16	89,84
270	53	81,07	16,22	26,37	73,63
325	45	61,10	12,22	38,59	61,41
400	38	185,58	37,12	75,71	24,29
-400	0	121,43	24,29	100	0,00

Fuente: Elaboración propia.

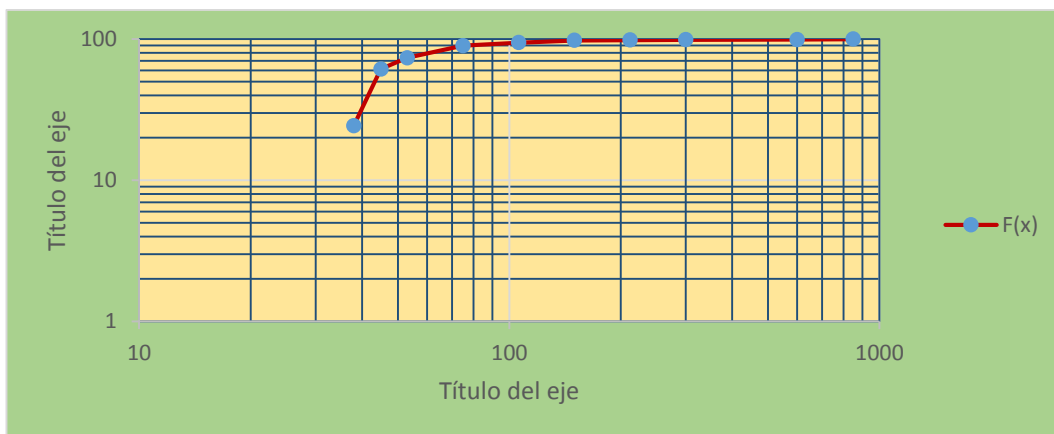


Figura 10. Análisis de las cenizas volantes.

Fuente: Elaboración propia.

4.3. Análisis de la gravedad específica relave

La determinación de la gravedad específica del relave se denota en la Tabla 5 donde se utilizó el método del picnómetro.

Tabla 5

Gravedad específica para el Relave.

Tipo	Peso 1 (g)	Peso 2 (g)	Peso 3 (g)
Peso fiola	37,43	37,43	37,43
Peso fiola + agua	87,17	87,22	87,17
Peso fiola +agua+ mineral	100,03	100,24	100,32
Peso muestra	20,00	20,00	20,00
SG	2,80	2,87	2,92
SG promedio			2,86

Fuente: Elaboración propia.

4.4. Análisis de la gravedad específica para la ceniza volante

La determinación de la gravedad específica de la ceniza volante en promedio es de 2,21, tal como se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6*Gravedad específica ceniza volante.*

Tipo	P1	P2	P 3
SG	2,13	2,30	2,20
SG Promedio	2,21		

Fuente: Elaboración propia.

4.5. Características del relave y cenizas volantes húmedas.

El relave en forma de pulpa presenta características inherentes descritas en la Tabla 7.

Tabla 7*Características del relave húmedo.*

Característica	Unidad
Densidad de pulpa	1,59 g/cm ³
K (Constante sólidos por peso)	0,64
%Sólidos por peso Cw	57,88 %
Dilución	0,73

Fuente: Elaboración propia.

4.6. Humedad del relave y de la ceniza volante**➤ Humedad del relave secado al aire libre**

El relave en forma de pulpa se sometió a una operación de desaguado por sedimentación libre de donde por sifoneo se fue retirando el agua hasta obtener una pasta o lodo denso. Este lodo fue retirado y puesto bandejas para someterlo a secado al aire libre por un tiempo de 4 días. Luego por cuarteo se tomó 3 muestras para determinar la humedad, resultando un valor promedio 11,9 % de humedad, el cual se muestra en la Tabla 8.

Tabla 8

Resultados de humedad del relave secado al aire libre.

Muestra Relave	N° Ensayo	(%) Humedad			
% de Humedad	1	10,59	12,19	11,26	11,35
	2	10,03	11,63	11,82	11,16
	3	10,72	10,32	12,15	11,06
Humedad promedio					11,19

Fuente: Elaboración propia, 2019.

➤ **Humedad de la ceniza volante**

Del mismo modo se tomó 3 muestras para determinar la humedad presente en las cenizas volantes, resultando contener una humedad promedio de 16,2 %, cuyo valor se muestra en la Tabla 9.

Tabla 9

Resultados de humedad de la ceniza volante.

Muestra Ceniza	N° Ensayo	(%) Humedad			
% de Humedad	1	17,35	15,34	17,77	16,82
	2	16,35	18,13	15,00	16,50
	3	17,12	13,41	15,34	15,29
Humedad Promedio					16,20

Fuente: Elaboración propia.

4.7. Análisis por difracción de rayos X

4.7.1. Análisis de difracción de rayos X para el relave

El estudio por difracción de rayos X fue realizado para determinar los componentes útiles para lograr una adecuada geopolimerización. La

Tabla 10 muestra el resultado de este análisis que revela la composición mineralógica del relave, notándose que presenta 3 fases mineralógicas donde predomina la fase del cuarzo (SiO_2).

Tabla 10

Resultados análisis DRX para el relave.

Nombre del mineral	Fórmula general	% Aproximado
Óxido de Silicio	SiO_2	61
Muscovita	$\text{K Si}_3 \text{Al}_3 \text{O}_{12}$	37
Clorita	$\text{Mg}_{9,17} \text{Fe}_{1,02} \text{Al}_{3,46} \text{Si}_{6,35} \text{O}_{36}$	2

Fuente. Laboratorio de investigación Nanolab, UNJBG.

La dispersión porcentual de estas fases mineralógicas, necesarias para la geopolimerización, se muestran en la Figura 11.

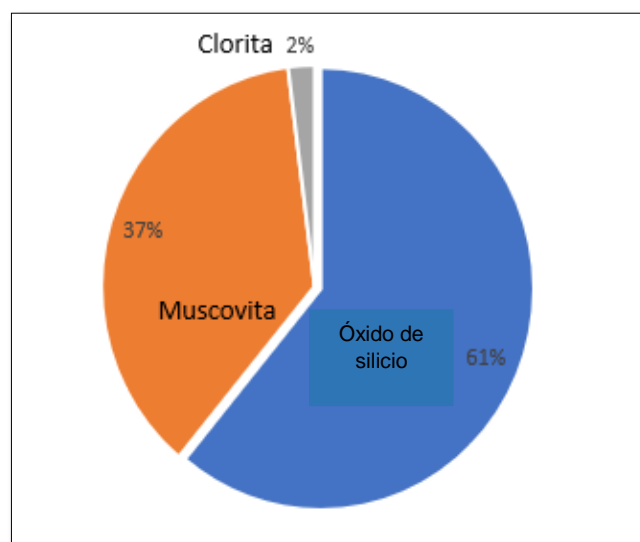


Figura 11. Dispersión de los componentes en el relave.

Fuente: Laboratorio de investigación Nanolab, UNJBG.

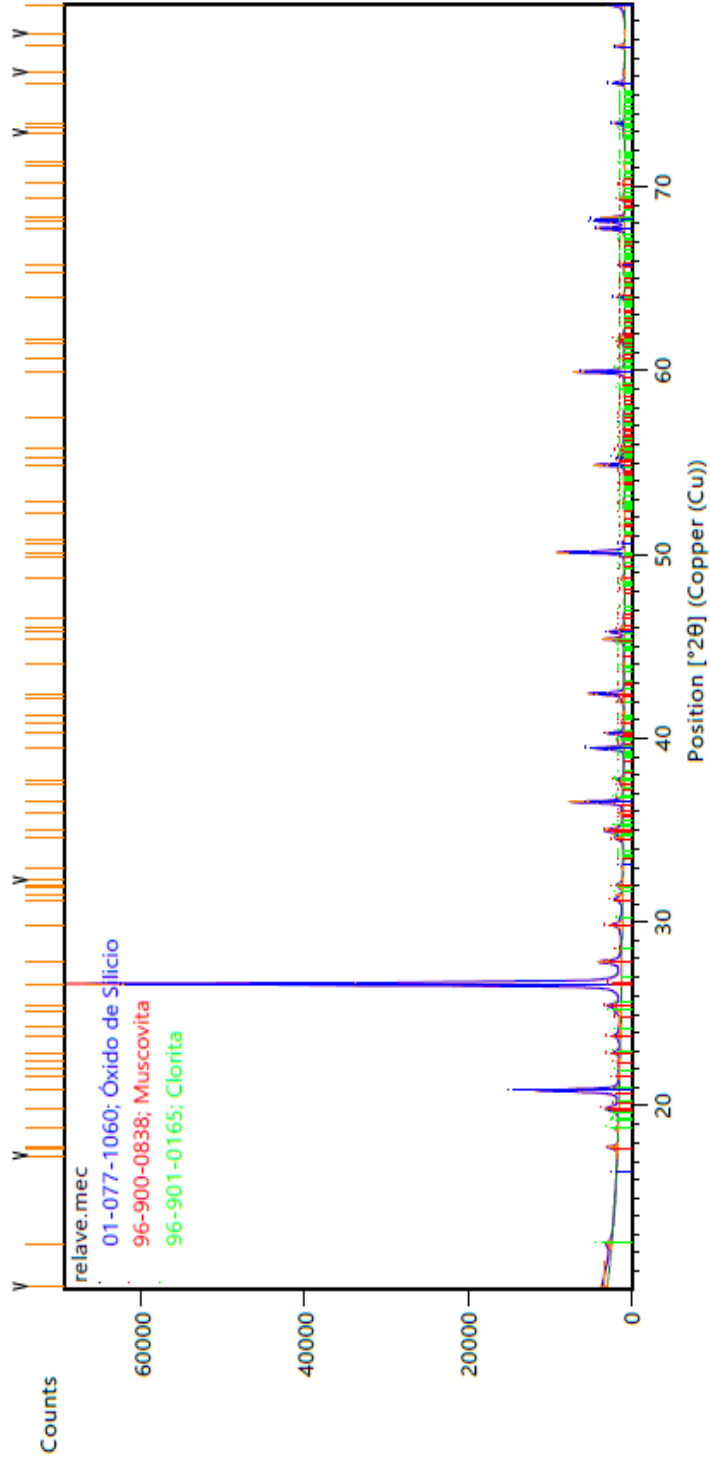


Figura 12. Difractograma mostrando las principales fases presentes en el relave.

Fuente: Laboratorio de investigación Nanolab, UNJBG.

4.7.2. Resultado de análisis de difracción de rayos X para la ceniza volante

La Tabla 11 presenta la composición de la ceniza volante, el cual presenta 3 fases, presentando una fase mayoritaria de SiO₂.

Tabla 11.

Resultado de análisis DRX para la ceniza volante.

Nombre del mineral	Fórmula general	% Aproximado
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

Fuente: Laboratorio de investigación Nanolab, UNJBG.

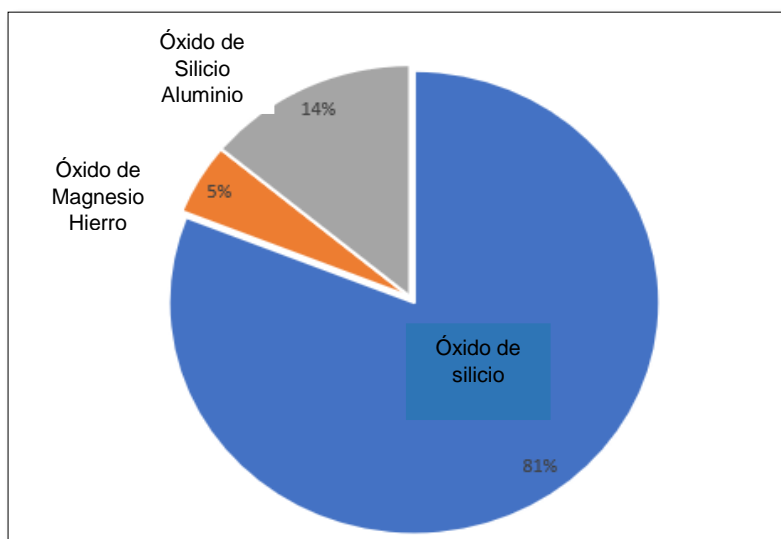


Figura 13. Dispersión de los componentes en la ceniza

Fuente: Laboratorio de investigación Nanolab, UNJBG.

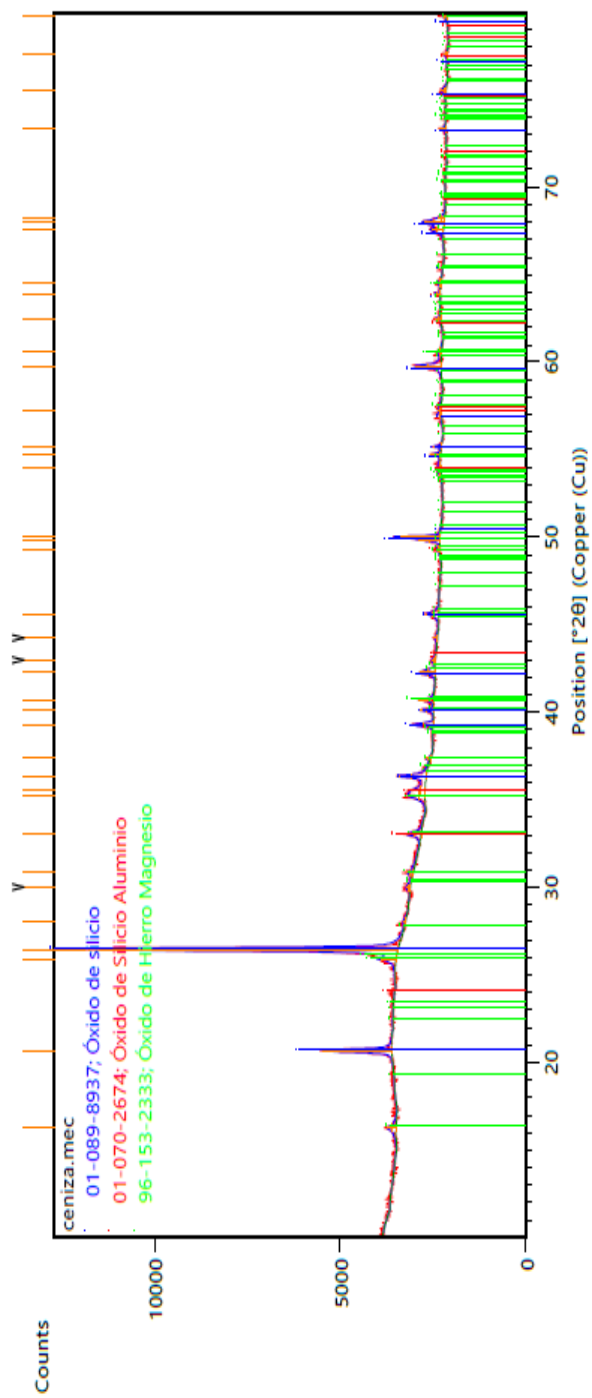


Figura 34. Difractograma mostrando las principales fases presentes en la ceniza volante.

Fuente: Laboratorio de investigación Nanolab, UNJBG.

4.7.3. Análisis de difracción de rayos X del metacaolín

La Tabla 12 presenta la composición relave que presenta 3 fases teniendo la fase mayoritaria de SiO₂.

Tabla 12.

Resultado de análisis DRX para el metacaolín.

Nombre del mineral	Fórmula general	% Aproximado
Cristobalita	SiO ₂	4
Jamborita	NiO ₂	6
Beta tridimita	SiO ₂	9
Cuarzo	SiO ₂	81

Fuente: Laboratorio de investigación Nanolab, UNJBG.

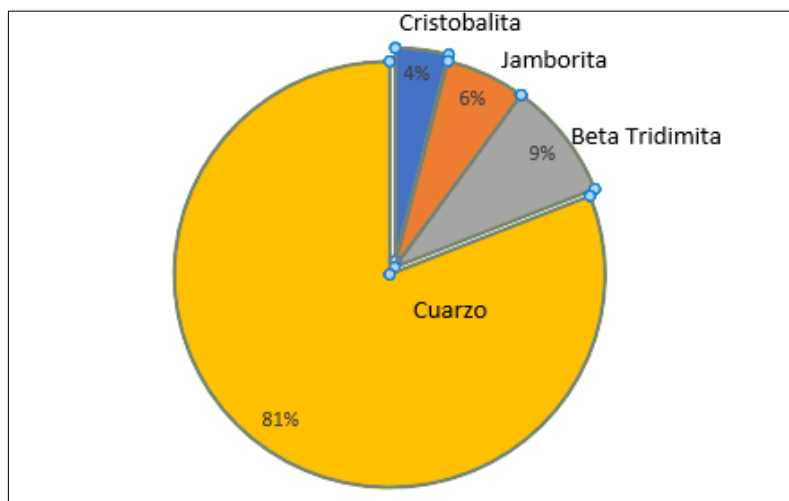


Figura 15. Dispersión de los componentes en la metacaolín.

Fuente: Laboratorio de investigación Nanolab, UNJBG.

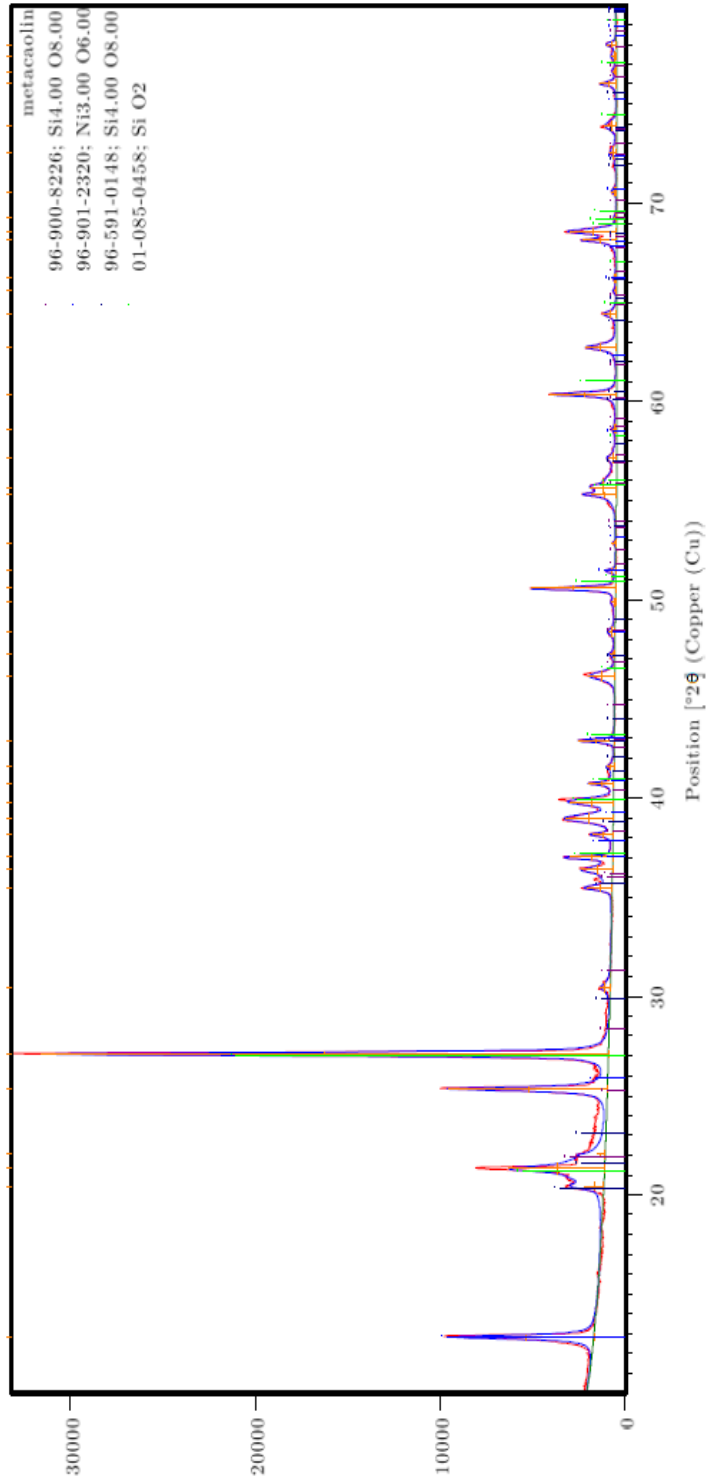


Figura 16. Difractograma mostrando las principales fases presentes en el metacaolín.

Fuente: Laboratorio de investigación Nanolab, UNJBG

4.8. Análisis de composición química EDAX

4.8.1. Resultados del análisis químico EDAX del relave

El análisis químico composicional cuantitativo se ha realizado por EDAX para el relave, presenta un porcentaje alto de elementos de importancia para la formación del geopolímero (20,44 % de Al_2O_3 y 53,39 % de SiO_2), correspondiente a la Tabla 13.

Tabla 13

Resultados del Análisis de composición química EDAX para el Relave.

Composición %	Fórmula
2,05	MgO
20,44	Al_2O_3
53,39	SiO_2
8,81	SO_3
6,97	K_2O
2,71	CaO
5,63	FeO

Fuente. Laboratorio de Microscopía de la E.P. de Ingeniería Metalurgia y materiales de la UNJBG.

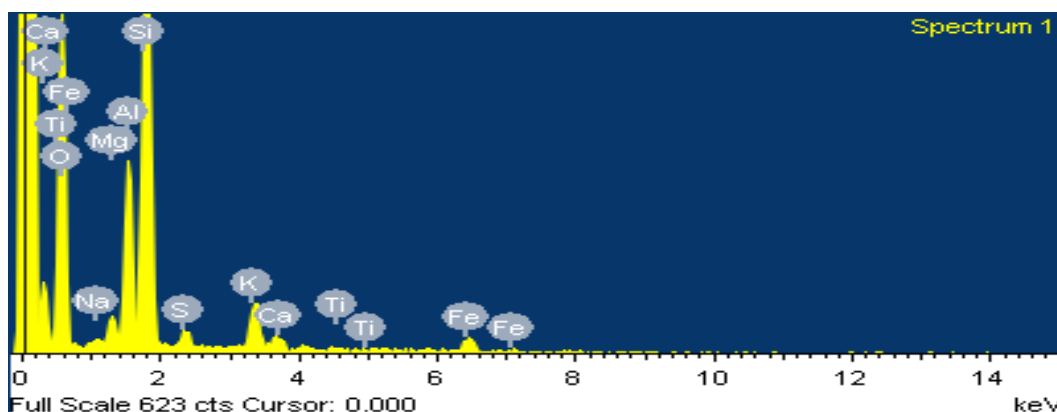


Figura 17. Principales elementos en el relave.

Fuente. Laboratorio de Microscopía de la E.P. de Ingeniería Metalurgia y Materiales de la UNJBG.

4.8.2. Resultados del análisis de composición química EDAX para la ceniza volante

El análisis químico composicional cuantitativo se ha realizado por EDAX para la ceniza volante, el cual presenta un porcentaje alto de elementos de importancia para la formación del geopolímero (22,11 % de Al_2O_3 y 51,76 % de SiO_2), correspondiente a la Tabla 14.

Tabla 14

Resultados del Análisis de composición química EDAX para la ceniza volante.

Composición%	Formula
5,25	Na_2O
1,53	MgO
22,11	Al_2O_3
51,76	SiO_2
2,58	SO_3
2,67	K_2O
4,63	CaO
9,47	FeO

Fuente. Laboratorio de Microscopía de la E.P. de Ingeniería Metalurgia y materiales UNJBG

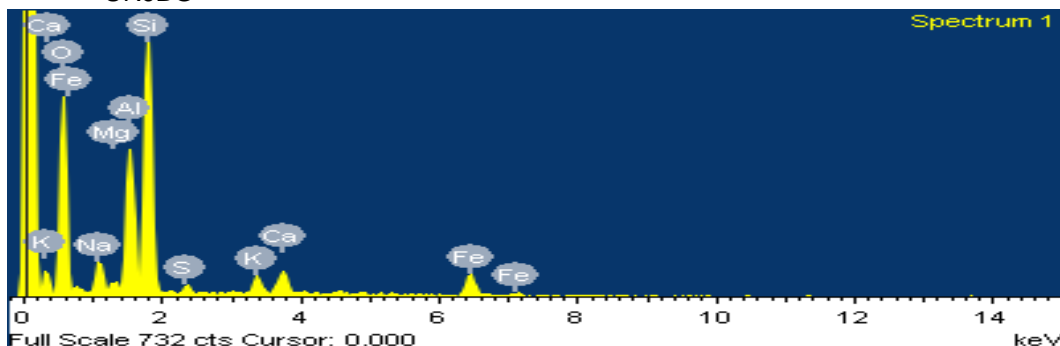


Figura 18. Principales elementos la ceniza volante.

Fuente. Laboratorio de Microscopía de la E.P. de Ingeniería Metalurgia y Materiales UNJBG.

4.9. Análisis morfológico

4.9.1. Resultados del análisis morfológico para el relave

En las Figuras 19 y 20 se muestran las microfotografías del relave utilizado en este estudio, se observa un material particulado heterogéneo con presencia de contenido metálico en su superficie.

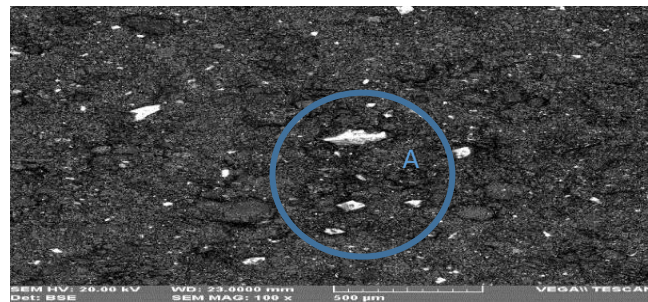


Figura 19. Microfotografía del relave a 100 aumentos de resolución, “A” denota material metálico particulado.

Fuente. Laboratorio de Microscopía de la E.P. de Ingeniería Metalurgia y Materiales UNJBG.

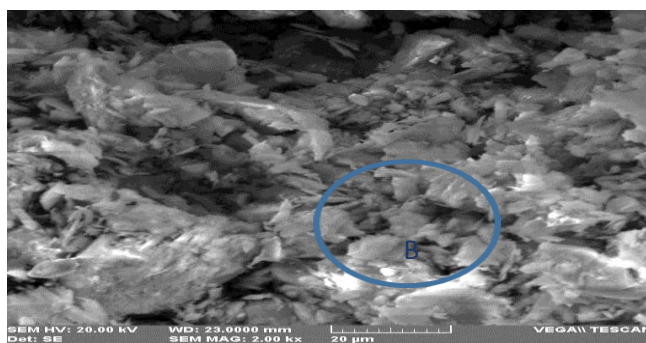


Figura 20. Microfotografía del relave 2000 aumentos de resolución, “B” denota material metálico particulado.

Fuente. Laboratorio de Microscopía de la E.P. de Ingeniería Metalurgia y Materiales UNJBG.

4.9.2. Análisis morfológico de la ceniza volante

En la Figura 21 y 22 se muestran las microfotografías de la ceniza volante utilizado en este estudio, se observa un material participado heterogéneo con presencia de contenido metálico en su superficie

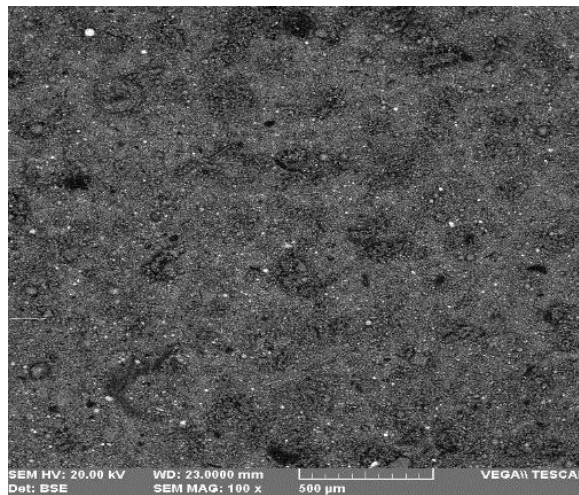


Figura 21. Microfotografía de la ceniza volante a 100 aumentos de magnificación. Fuente. Laboratorio de Microscopía de la E.P. de Ingeniería Metalurgia y Materiales UNJBG.

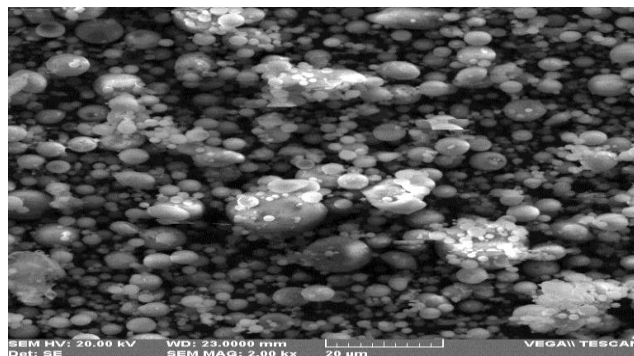


Figura 22. Microfotografía de la ceniza volante a 2000 aumentos de magnificación. Fuente. Laboratorio de Microscopía de la E.P. de Ingeniería Metalurgia y Materiales UNJBG.

4.10. Resultados de los ensayos a las probetas

4.10.1 Resultados de propiedades organolépticas

La tabla 15 denota las principales propiedades organolépticas para las materias primas utilizadas y el geopolímero obtenido.

Tabla 15

Propiedades organolépticas para los elementos.

Tipo	Color	Olor	Tacto
Relave puro	Las probetas presentan una tonalidad plomiza.	Presenta un olor suave a mineral sulfurado.	Presenta una superficie áspera y frágil.
Ceniza volante Pura	Las probetas presentan un color plomizo oscuro.	Presenta un olor suave a minerales oxidados	Presenta una superficie lisa y frágil.
Mezclas	Varían con la presencia de las cenizas volantes de tonalidades de plomo claro a más oscuro	Inodoras	Superficie lisa y dura., en algunos casos se observa la presencia de cristales de silicio parecidas a la eflorescencia común

Fuente: Elaboración propia, 2019.

En la Figura 23 se muestra las probetas moldeadas a las distintas mezclas utilizadas en el diseño experimental empleado en este estudio.



Figura 23. Probetas fabricadas (mezclas).

Fuente: Elaboración Propia.

4.11. Resultado de análisis de difracción de rayos X para las formaciones cristalinas en forma de eflorescencia.

En la Tabla 16 y Figura 24 se denotan la composición y figura de estas formaciones, esta se observa en las probetas de 1 M y 5 M expuestas directamente al aire libre, también en menor proporción en las mezclas a 10 M y 15 M. Se observa la presencia del mineral raro thenardita.

Tabla 16

Presenta la composición de las formaciones cristalinas en forma de eflorescencia.

Nombre	Fórmula general	% Aproximado
Oxido de Silicio	SiO ₂	28,5
Thenardita	Na ₂ SO ₄	27,8
Muscovita	K _{2,40} Na _{1,48} Al _{11,20} Ti _{0,08} Fe _{0,40} Mg _{0,16} Si _{12,16} O _{48,00}	43,7

Fuente. Laboratorio de investigación Nanolab, UNJBG.



Figura 24. Imagen cristales en forma de eflorescencia.

Fuente. Elaboración propia, 2019.

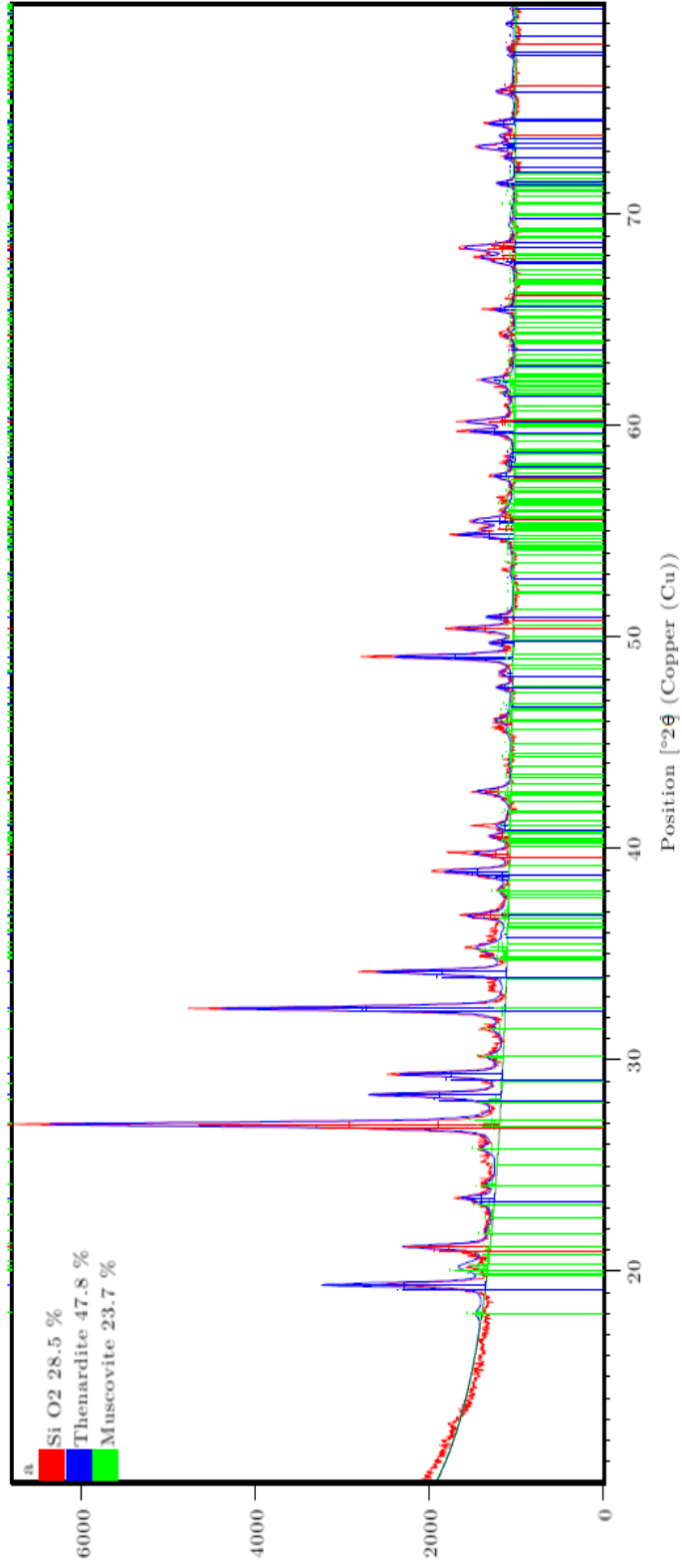


Figura 25. Difractograma mostrando las Principales fases presentes en los cristales en forma de eflorescencia.

Fuente: Laboratorio de investigación Nanolab, UNJBG

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

Tabla 17

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

Numero de orden	Relave (%)	Cenizas (%)	Metacaolin (%)	SiO_2 (%)	Al_2O_3 (%)	Na_2O (%)	$\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$	$\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$
#	%	%	%	%	%	%			
1	70	30,0	0,0	53,501	21,829	1,486	3,943	0,073695	0,18062
2	40	60,0	0,0	53,732	21,808	2,512	3,964	0,073766	0,18175
3	60	30,0	10,0	56,274	19,644	1,44	4,608	0,081892	0,23460
4	30	60,0	10,0	56,505	19,623	2,466	4,632	0,081980	0,23606
5	60	37,5	2,5	54,252	21,2775	1,731	4,102	0,075605	0,19277
6	45	52,5	2,5	54,3675	21,267	2,244	4,113	0,075643	0,19338
7	55	37,5	7,5	55,6385	20,185	1,708	4,434	0,079698	0,21968
8	40	52,5	7,5	55,754	20,1745	2,221	4,446	0,079739	0,22037
9	55	45,0	0,0	53,6165	21,8185	1,999	3,953	0,073731	0,18119
10	65	30,0	5,0	54,8875	20,7365	1,463	4,258	0,077578	0,20534
11	35	60,0	5,0	55,1185	20,7155	2,489	4,280	0,077657	0,20662
12	45	45,0	10,0	56,3895	19,6335	1,953	4,620	0,081936	0,23533
13	50	45,0	5,0	55,003	20,726	1,976	4,269	0,077617	0,20598
14	30	70,0	0,0	53,809	21,801	2,854	3,971	0,073790	0,18213
Relave puro	100	0	0	53,27	21,85	0,46	3,922	0,073625	0,17950
CV puro	0	100	0	54,04	21,78	3,88	3,991	0,073861	0,18326

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 17 está basada en las Tablas 13 y 14, desde el punto de vista de la composición, la relación más conveniente entre óxidos para el procesamiento del geopolímero debe estar alrededor del 3,3 - 4,5 ($\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$), 0,20-0,48 ($\text{Na}_2\text{O}/\text{SiO}_2$) y 0,80 – 1,60 ($\text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$) (Palomo y Alonso, 2001) ,teniéndose la relación $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ es la más influyente. En la Tabla 15 se observa las relaciones molares para el modelo planteado de donde se resuelve que para todas las mezclas las correspondientes relaciones de $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ superan la relación 3,3 teniendo en cuenta que esta es la relación más importante para la formación del geopolímero, cabe remarcar que la relación $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ es una relación nominal y no debe ser confundida con la relación verdadera de los productos de reacción ya que una parte importante del contenido de sílice podría estar en forma de cuarzo, que es una fase de baja reactividad, para lo cual el tiempo de fraguado del material se prolongue.

4.13. Resultado de resistencia a la compresión

4.13.1. Resistencia para el geopolímero a 1 M

La resistencia a la compresión se determinó a un solo tiempo de curado de 28 días a 1 M y un pH entre 11-13, el tiempo tomado está en referencia al tiempo de secado del cemento portland, no se observa resistencia mecánica significativa en el material aglomerado presente en la tabla 18 (Ver anexo 1).

Tabla 18*Resistencia del geopolímero a 1 M.*

1M						
N°	Relave (%)	Ceniza (%)	Metacaolín (%)	kg-f	kg/cm ²	MPa
1	0,700	0,300	0,000	319,90	14,81	1,45
2	0,400	0,600	0,000	249,90	11,81	1,16
3	0,600	0,300	0,100	236,74	10,96	1,07
4	0,300	0,600	0,000	279,97	12,68	1,24
5	0,600	0,375	0,025	576,29	27,84	2,73
6	0,450	0,525	0,025	516,67	23,40	2,29
7	0,550	0,375	0,075	607,22	28,71	2,82
8	0,400	0,525	0,075	486,00	22,50	2,21
9	0,550	0,450	0,000	340,10	16,43	1,61
10	0,650	0,300	0,005	670,86	32,44	3,18
11	0,350	0,600	0,005	310,09	14,98	1,47
12	0,450	0,450	0,010	260,06	13,44	1,32
13	0,500	0,450	0,005	582,66	26,95	2,64
14	0,300	0,700	0,000	229,93	11,36	1,11

Fuente: Elaboración propia, 2019.

4.13.2. Resistencia para el geopolímero a 5 M

La resistencia a la compresión se determinó a un solo tiempo de curado de 28 días a 5 M y un pH de 9 a 10, el tiempo tomado está en referencia al tiempo de secado del cemento portland, No se observa aumento de la resistencia mecánica aun no significativa en el material aglomerado, presente en la Tabla 19, (Ver anexo 2).

Tabla 19*Resistencia del geopolímero a 5 M.*

N°	Relave (%)	Ceniza (%)	5M			
			Metacaolín (%)	kg-f	kg/cm ²	MPa
1	0,700	0,300	0,000	695,72	29,58	2,90
2	0,400	0,600	0,000	398,95	20,21	1,98
3	0,600	0,300	0,100	953,02	45,06	4,42
4	0,300	0,600	0,000	463,92	19,33	1,90
5	0,600	0,375	0,025	1049,96	51,85	5,08
6	0,450	0,525	0,025	881,19	39,06	3,83
7	0,550	0,375	0,075	1148,33	56,82	5,57
8	0,400	0,525	0,075	892,53	37,98	3,72
9	0,550	0,450	0,000	895,99	38,29	3,76
10	0,650	0,300	0,005	1031,62	47,76	4,68
11	0,350	0,600	0,005	779,90	35,45	3,48
12	0,450	0,450	0,010	837,49	37,93	3,72
13	0,500	0,450	0,005	839,04	34,96	3,43
14	0,300	0,700	0,000	429,98	19,11	1,87

Fuente: Elaboración propia, 2019.

4.13.3. Resistencia para el geopolímero a 10 M

La resistencia a la compresión se determinó a un solo tiempo de curado de 28 días a 10 M y un pH entre 11 a 12, el tiempo tomado está en referencia al tiempo de secado del cemento portland, Se observa un máximo en la mezcla de 55 % relave, 37,5 % Ceniza Volante y 7,5 % de Metacaolín con una resistencia de 14,08 MPa. Se observa que a 28 días de secado al aire libre aun en algunas probetas presentan baja humedad mostrado en la Tabla 20, (Ver anexo 3).

Tabla 20*Resistencia del geopolímero a 10 M.*

N°	10M			kg-f	kg/cm ²	MPa
	Relave (%)	Ceniza (%)	Metacaolín (%)			
1	0,700	0,300	0,000	1993,07	107,85	10,58
2	0,400	0,600	0,000	1363,79	063,08	06,19
3	0,600	0,300	0,100	2710,42	136,89	13,42
4	0,300	0,600	0,000	1742,33	078,91	07,74
5	0,600	0,375	0,025	2771,19	125,45	12,30
6	0,450	0,525	0,025	2661,63	117,98	11,57
7	0,550	0,375	0,075	2970,06	143,62	14,08
8	0,400	0,525	0,075	2640,71	119,76	11,74
9	0,550	0,450	0,000	2639,92	124,76	12,23
10	0,650	0,300	0,005	3306,94	138,25	13,56
11	0,350	0,600	0,005	2270,10	98,70	09,68
12	0,450	0,450	0,010	2766,42	117,72	11,54
13	0,500	0,450	0,005	2635,69	119,37	11,71
14	0,300	0,700	0,000	820,42	042,73	04,19

Fuente: Elaboración propia.

4.13.3.1. Humedad de las probetas de 10 M a 28 días de curado

Se observa que el material aglomerado geopolimérico presenta una humedad promedio de 2,68 % y una humedad para la mejor muestra de 2,86 %, se observa que las probetas conformadas presentan humedad, teniéndose en cuenta el ambiente de la ciudad de Tacna, se muestra en la Tabla 21, (Ver Anexo 3).

Tabla 21

Reporte de humedades para las probetas de 10 M.

N°	Relave (%)	Ceniza (%)	Metacaolín (%)	P. Inicial (g)	P. Seco (g)	Humedad (%)
1	0,700	0,300	0,000	241,1	233,4	3,30
2	0,400	0,600	0,000	225,5	217,7	3,58
3	0,600	0,300	0,100	233,5	226,5	3,09
4	0,300	0,600	0,000	238,4	232,7	2,45
5	0,600	0,375	0,025	240,2	233,2	3,00
6	0,450	0,525	0,025	233,7	227,6	2,68
7	0,550	0,375	0,075	230,0	225,8	2,86
8	0,400	0,525	0,075	231,8	226,0	2,57
9	0,550	0,450	0,000	241,2	234,0	3,08
10	0,650	0,300	0,005	243,2	237,4	2,44
11	0,350	0,600	0,005	224,6	218,3	2,89
12	0,450	0,450	0,010	241,0	235,1	2,51
13	0,500	0,450	0,005	233,9	229,1	2,10
14	0,300	0,700	0,000	243,6	238,6	2,10
Humedad promedio						2,69

Fuente: Elaboración propia.

4.13.4. Resistencia para el geopolímero a 10 M a 35 días de curado

La resistencia a la compresión se determinó a un solo tiempo de curado de 28 días a 10 M y un pH entre 11-12, teniendo en cuenta la presencia aun de humedad en las probetas se procede a continuar con el secado durante una semana más. Se observa la mejor muestra en la mezcla 55 % relave, 37,5 % Ceniza Volante y 7,5 % de metacaolín con una resistencia, la cual es la máxima de 24,60 Mpa presente en la Tabla 22. (Ver Anexo 4).

Tabla 22*Resistencia del geopolímero a 10 M a 35 días de curado.*

N°	10 M			Kg-F	Kg/cm ²	Mpa
	Relave (%)	Ceniza (%)	Metacaolín (%)			
1	0,700	0,300	0,000	2936,70	130,52	12,80
2	0,400	0,600	0,000	2583,53	105,45	10,34
3	0,600	0,300	0,100	5659,04	240,81	23,62
4	0,300	0,600	0,000	2820,00	117,50	11,52
5	0,600	0,375	0,025	5140,06	218,54	21,43
6	0,450	0,525	0,025	5358,50	214,34	21,02
7	0,550	0,375	0,075	5660,07	250,89	24,60
8	0,400	0,525	0,075	4228,41	195,76	19,20
9	0,550	0,450	0,000	3708,47	145,43	14,26
10	0,650	0,300	0,005	5289,98	235,11	23,06
11	0,350	0,600	0,005	4410,10	187,66	18,40
12	0,450	0,450	0,010	5970,00	238,80	23,42
13	0,500	0,450	0,005	4758,00	198,25	19,44
14	0,300	0,700	0,000	1838,17	78,22	07,67

Fuente: Elaboración propia.

4.13.5. Resistencia para el geopolímero a 15 M

La resistencia a la compresión se determinó a un solo tiempo de curado de 28 días a 15 M y un pH entre 12-13, el tiempo tomado está en referencia a el tiempo de secado del cemento portland, No se observa aumento de la resistencia mecánica aun no significativa en el material aglomerado presente en la Tabla 23 (Ver Anexo 5).

Tabla 23*Resistencia del geopolímero a 15 M.*

N°	Relave (%)	Ceniza (%)	15M			
			Metacaolín (%)	Kg-F	Kg/cm ²	Mpa
1	0,70	0,300	0,000	1685,81	74,79	7,33
2	0,40	0,600	0,000	1470,15	57,79	5,67
3	0,60	0,300	0,100	3178,27	132,43	12,99
4	0,30	0,600	0,000	1574,61	69,80	6,85
5	0,60	0,375	0,025	3225,91	137,86	13,52
6	0,45	0,525	0,025	2630,69	119,31	11,70
7	0,55	0,375	0,075	2657,48	131,23	12,87
8	0,40	0,525	0,075	2724,88	121,11	11,88
9	0,55	0,450	0,000	2725,09	126,16	12,37
10	0,65	0,300	0,005	2897,06	128,76	12,63
11	0,35	0,600	0,005	2595,03	99,81	9,79
12	0,45	0,450	0,010	2357,05	119,04	11,67
13	0,50	0,450	0,005	2581,00	114,71	11,25
14	0,30	0,700	0,000	873,66	37,99	3,73

Fuente: Elaboración Propia.

4.14. Resultado prueba TCLP y metales pesados por ICP OES

Se mandaron a analizar a la empresa Certimin 2 muestras correspondientes, la primera, la mejor prueba la mezcla de 10 M a 55 % relave, 37,5 % ceniza volante y 7,5 % de metacaolín con una resistencia de 24,60 MPa y a la muestra de 1 M 55 % relave, 37,5% ceniza volante y 7,5 % con una resistencia de 2,82 Mpa, se observa una gran reducción de los niveles de elementos contaminantes en comparación entre la muestra 1 y 2 la cual está denotada en la Tabla 24 .

Tabla 24

Resultado pruebas prueba TCLP.

Muestras	Elementos																			
	Código	MON000	MA0122	MA0122	MA0122	MA0122	MA0122	MA0122	MA0122	MA0122	MA0122	MA0122	MA0122	MA0122	MA0122	MA0122	MA0122	MA0122	MA0122	MA0122
Unidad																				
Limite de																				
N°																				
Detección																				
LD																				
1	Muestra1	Relave	<0,002	4,17	3,122	0,307	0,0066	<0,02	493,42	<0,001	<0,02	<0,002	<0,002	<0,002	<0,004	0,469	1,12	9,89	<0,004	
2	Muestra2	Relave	<0,002	0,91	2,243	0,188	<0,0003	<0,02	228,77	<0,001	<0,02	<0,002	<0,002	<0,004	0,005	0,33	68,5	0,639		

Continuación Tabla 24

Muestras	Elementos																			
	Código	MA0122	MA0122	MA0122	MA0122	MA0122	MA0122	MA0122	MA0122	MA0122	MA0122	MA0122	MA0122	MA0122	MA0122	MA0122	MA0122	MA0122	MA0122	MA0122
Unidad																				
Limite de																				
N°																				
Detección																				
LD																				
4	2030,05	<0,002	<0,06	0,2	<0,008	<0,02	132,65	<0,007	4,3157	0,05	<0,05	0,045	0,279	16,21	1,277					
3	<0,002	2,2,08	<0,01	<0,008	1,76	88,67	<0,007	7	2,3054	0,03	<0,05	0,713	0,016	9,79	0,012					
2618,02																				

Fuente: Laboratorio químico Certimin

4.15. Resultados del análisis de diseño de mezclas

Se evaluó la inmovilización de relaves de flotación de sulfuros de cobre mediante el uso de geopolímeros, para lo que se realizó un mismo diseño estadístico con diferentes molaridades hallándose el mejor resultado en la muestra de 10 M con 55 % relave, 37,5 % ceniza volante y 7,5 % de metacaolín, con una resistencia de 14,08 MPa en condiciones naturales a 28 días y 24,60 MPa a 35 días de secado. Se realizaron pruebas para los materiales al 100 % de composición para el relave logrando una resistencia de 22,68 MPa a 10 M y 19,26 MPa a 15 M pertenecientes a las muestras F1 y R1 a 35 días de secado (Revisar anexo 6).

4.15.1 Resultados de la definición de variables

Variables explicativas(X) independientes:

X_1 = Relave.

X_2 = Ceniza.

X_3 = Metacaolín.

Variable Respuesta (Y)

Y_1 = Resistencia a la Compresión (MPa).

4.15.2. Definición del diseño

Para el experimento se desarrolló un diseño con vértices extremos o diseño de mezcla especificado por el usuario que consiste en proponer en

base a estudios ya revisados con la intención de poder obtener un resultado más óptimo, la cual está denotada en la Tabla 25.

Tabla 25

Mezclas y número de pruebas.

N°	Relave (%)	Ceniza (%)	Metacaolín (%)
1	0,70	0,300	0,000
2	0,40	0,600	0,000
3	0,60	0,300	0,100
4	0,30	0,600	0,000
5	0,60	0,375	0,025
6	0,45	0,525	0,025
7	0,55	0,375	0,075
8	0,40	0,525	0,075
9	0,55	0,450	0,000
10	0,65	0,300	0,005
11	0,35	0,600	0,005
12	0,45	0,450	0,010
13	0,50	0,450	0,005
14	0,30	0,700	0,000

Fuente: Elaboración propia.

4.15.2. Efectos estimados del modelo completo para el modelo 10 M a 28 días de curado

Tabla 26

Efectos estimados del modelo completo para el modelo 10 M a 28 días de secado.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Media	168317,000	1	168317,		
Lineal	8241,560	2	4120,78	15,13	0,0007
Cuadrático	2221,170	3	740,389	7,64	0,0098
Cúbico Especial	27,650	1	27,6494	0,26	0,6266
Cúbico	243,401	3	81,1336	0,64	0,6265
Error	504,455	4	126,114		
Total	179555,	14			

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 27*Resultados del modelo completo modelo 10 M a 28 días de secado.*

Modelo	ES	R-Cuadrada	R-Cuadrada Ajd.
Lineal	16,51	73,34	68,49
Cuadrático	9,85	93,10	88,79
Cúbico Especial	10,34	93,35	87,64
Cúbico	11,23	95,51	85,41

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 28*Resultados ANOVA Completo modelo 10 M a 28 días de secado.*

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo Cuadrático	10462,7	5	2092,55	21,59	0,0002
Error total	775,505	8	96,9382		
Total (corr.)	11238,2	13			

Fuente: Elaboración propia,

 $R^2 = 93,0994 \%$ R^2 (ajustada por g,l,) = 88,79 por ciento

Error estándar del est, = 9,85

Error absoluto medio = 5,85

Estadístico Durbin-Watson = 1,73 (P=0,32)

Ecuación del modelo cuadrático ajustado es:

$$R = 19,9305xRv - 158,363xCv - 5149,3xMK + 687,316xRvx Cv + 6241,91xRvxMk + 6215,35xCvxMk$$

Donde:

R= Resistencia, RV = Relave, Cv = Ceniza volante y Mk = Metacaolin

La Figura 26 representa la superficie respuesta estimada, para resistencias a la compresión de las mezclas geopoliméricas activadas con 10 M que muestra los valores máximos de resistencia a la compresión y de acuerdo a la leyenda de colores de esta Figura se puede decir que el valor estimado máximo de resistencia a la compresión se encuentra en la región de 14,08 y 15 MPa.

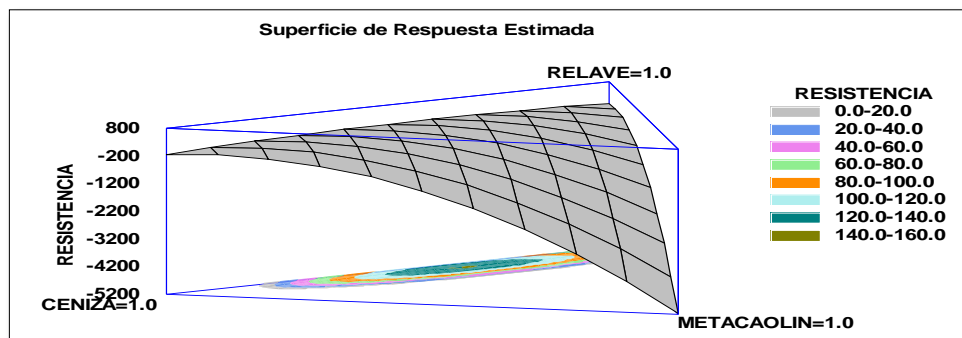


Figura 26. Superficie de respuestas estimadas para el modelo 10 M a 28 días de curado.

Fuente: Elaboración propia.

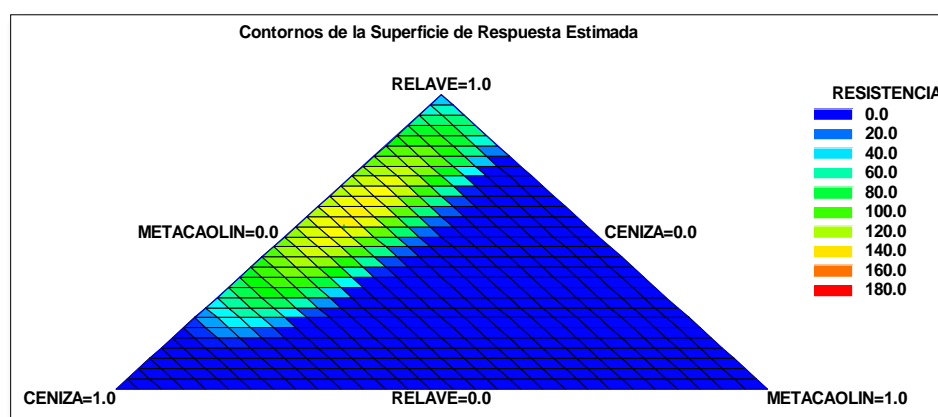


Figura 27. Contornos de la superficie respuesta, la resistencia a la compresión de las mezclas geopoliméricas a 10 M a 28 días de curado.

Fuente: Elaboración propia.

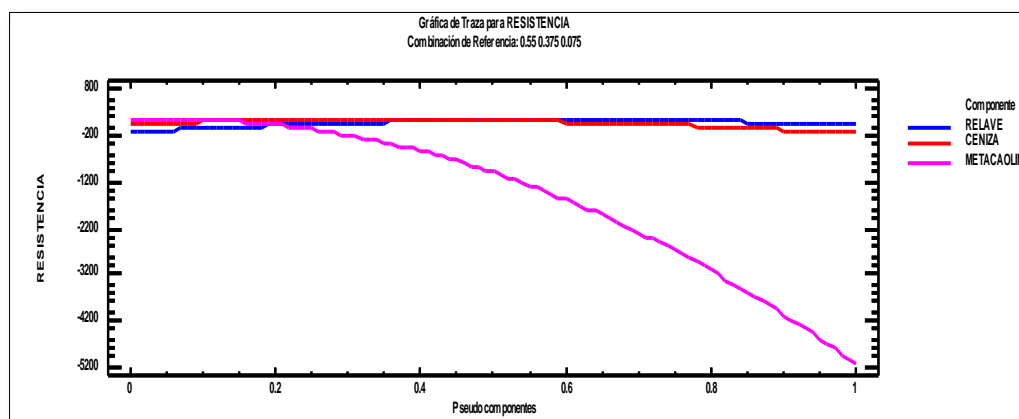


Figura 28. Representa la gráfica de trazas para resistencia. Se observa las curvas de ceniza y relave las cuales presentan mayor relevancia para la mezcla que el metacaolín.

Fuente: Elaboración propia, 2019.

Tabla 29

Matriz de correlación para los coeficientes estimados de las mezclas geopoliméricas a 10 M a 28 días de curado

	A: Relave	B: Ceniza	C: Metacaolín	AB
A: Relave	1,0000	0,8214	-0,1999	-0,9452
B: Ceniza	0,8214	1,0000	-0,2606	-0,9538
C: Metacaolín	-0,1999	-0,2606	1,0000	0,2873
AB	-0,9452	-0,9538	0,2873	1,0000
AC	0,1581	0,2630	-0,9937	-0,2694
BC	0,2096	0,2269	-0,9939	-0,2756

	AC	BC
A: Relave	0,1581	0,2096
B: Ceniza	0,2630	0,2269
C: Metacaolín	-0,9937	-0,9939
AB	-0,2694	-0,2756
AC	1,0000	0,9774
BC	0,9774	1,0000

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 29 muestra la matriz de correlación, la cual muestra el grado de confusión entre los efectos, sin embargo, para este estudio se quiere denotar mayor presencia de relave en las mezclas por lo que, la correlación para este estudio es el adecuado, teniendo en cuenta que para el diseño de mezclas la confusión es normal.

Tabla 30

Resultados estimados para resistencia de las mezclas a 10 M a 28 días de curado.

<i>Fila</i>	<i>Observados Valores</i>	<i>Ajustados Valores</i>	<i>Inferior 95,0% para Media</i>	<i>Superior 95,0% para Media</i>
1	107,85	110,779	91,2247	130,333
2	63,08	77,9105	64,1856	91,6350
3	136,89	134,212	115,47	152,954
4	78,91	79,9272	60,497	99,3574
5	125,45	130,384	120,394	140,373
6	117,98	111,272	100,701	121,844
7	143,62	139,423	129,24	149,606
8	119,76	114,958	104,648	125,268
9	124,76	109,809	94,4934	125,125
10	138,25	138,100	122,761	153,439
11	98,7	94,5236	81,120	107,927
12	117,72	122,534	108,148	136,920
13	119,37	131,776	120,823	142,730
14	42,73	39,4617	19,5776	59,3460

Fuente: Elaboración propia.

Esta tabla contiene información acerca de los valores de resistencia generados usando el modelo ajustado.

La tabla incluye:

- (1) Los valores observados de resistencia (si alguno)
- (2) El valor predicho de resistencia usando el modelo ajustado

(3) Intervalos de confianza del 95,0 % para la respuesta media

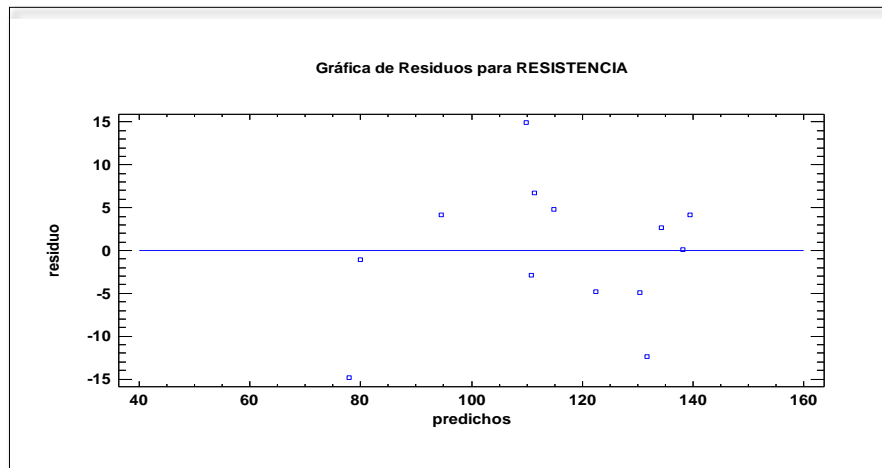


Figura 29. Representación gráfica de residuos para la RESISTENCIA (resistencia a la compresión).

Fuente: Elaboración propia.

Muestra los valores de diferencia entre los valores observados, es decir, valores reales de resistencia a la compresión, y los valores ajustados por el modelo matemático (Tabla 29), como se observa, los valores residuales varían aleatoriamente alrededor de la línea.

4.15.3. Efectos estimados del modelo completo para el modelo 10 M a 35 días de secado

Tabla 31

Efectos estimados del modelo completo para resistencia (kg/cm²) de las mezclas a 10 M a 35 días de curado

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Media	467120,00	1	467120,00		
Lineal	25639,20	2	12819,60	8,68	0,0055
Cuadrático	12911,70	3	4303,91	10,31	0,0040
Cúbico E,	269,64	1	269,64	0,61	0,4586
Cúbico	1126,96	3	375,654	0,77	0,5663
Error	1942,13	4	485,533		
Total	509010,00	14			

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 32

Resultados del modelo completo de las mezclas a 10 M a 35 días de curado

Modelo	ES	R-Cuadrada	R-Cuadrada Ajd,
Lineal	38,4359	61,21	54,15
Cuadrático	20,4289	92,03	87,05
Cúbico Especial	20,939	92,67	86,39
Cúbico	22,0348	95,36	84,93

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 33

Resultados tabla ANOVA para resistencia mezclas a 10 M a 35 días de curado

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo Cuadrático	38551,0	5	7710,19	18,47	0,0003
Error total	3338,73	8	417,342		
Total (corr,)	41889,7	13			

Fuente: Elaboración propia.

$R^2 = 92,03 \%$

R-cuadrada (ajustada por g,l,) = 87,0483 por ciento

Error absoluto medio = 11,9723 Error estándar del est, = 20,4289

Estadístico Durbin-Watson = 2,16873 (P=0,6175)

Autocorrelación residual de Lag 1 = -0,0879842

Tabla 34

Resultados de ajuste de modelo para resistencia de las mezclas a 10 M a 35 días de curado

<i>Parámetro</i>	<i>Estimado</i>	<i>Error Estándar</i>	<i>Estadístico T</i>	<i>Valor-P</i>
A: Relave	-72,1659	101,751		
B: Ceniza	-209,116	107,112		
C: Metacaolín	-15475,3	4771,43		
AB	1151,25	435,364	2,64434	0,0295
AC	19665,0	5288,22	3,71865	0,0059
BC	17100,1	5285,87	3,23507	0,0120

Fuente: Elaboración propia.

R-cuadrada = 92,0297 por ciento

R-cuadrada (ajustada por g,l,) = 87,0483 por ciento

Error estándar del est, = 20,4289

Error absoluto medio = 11,9723

Estadístico Durbin-Watson = 2,16873 (P=0,6175)

Autocorrelación residual de Lag 1 = -0,0879842

Ecuación del modelo ajustado es:

$$R = -72,1659 \cdot R_v - 209,116 \cdot C_v - 15475,3 \cdot M_k + 1151,25 \cdot R_v \cdot C_v + 19665,0 \cdot R_v \cdot M_k + 17100,1 \cdot C_v \cdot M_k$$

Donde:

R= Resistencia, RV = Relave, Cv = Ceniza volante y Mk = Metacaolín

La Figura 31 representa la superficie de respuestas estimadas, para resistencias a la compresión de las mezclas geopoliméricas activadas con 10 M a 42 días de fraguado que muestra la gráfica representa los valores máximos de resistencia a la compresión y de acuerdo a la leyenda de colores de esta Figura se puede decir que el valor estimado máximo de resistencia a la compresión se encuentra en la región de 22,56 a 25,49 MPa.

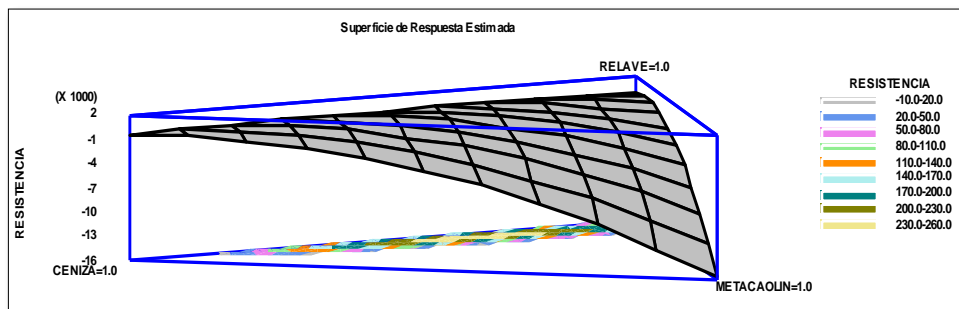


Figura 30. Superficie respuesta estimada para el modelo 10M a 35 días de secado

Fuente: Elaboración propia.

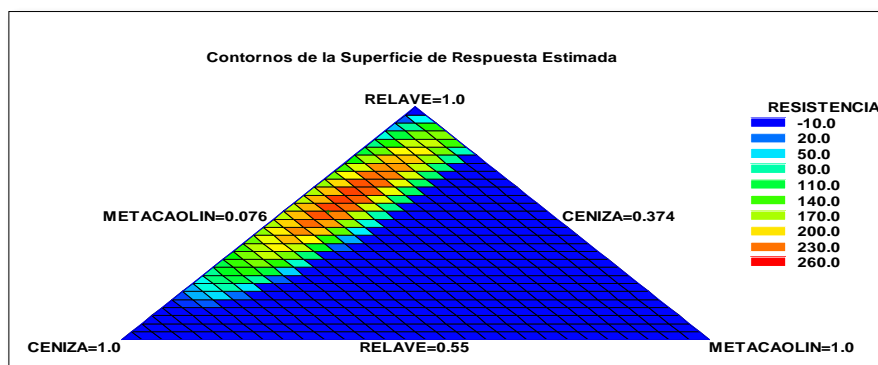


Figura 31. Contornos de la superficie respuesta para resistencia a 10 M a 35 días de fraguado.

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 32 representa la gráfica de trazas, se observa las curvas de ceniza y relave las cuales presentan mayor relevancia para la mezcla que el metacaolín.

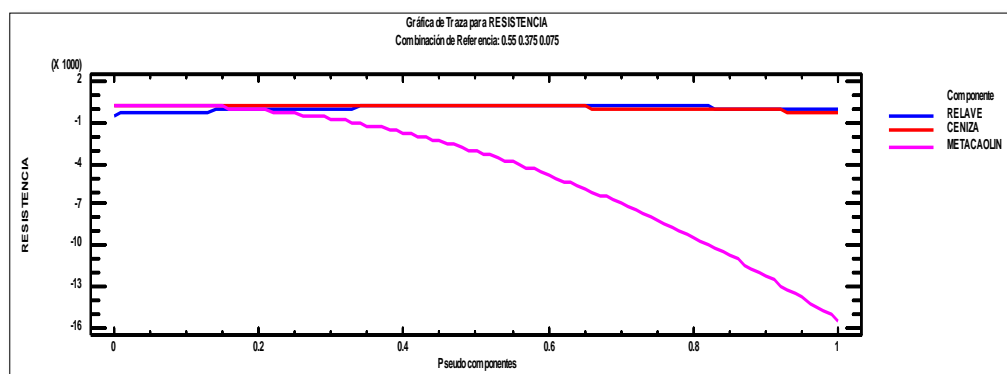


Figura 32. Representación gráfica de trazas para resistencia a 10 M, 35 días de curado.

Fuente. Elaboración propia.

Tabla 35

Matriz de correlación para los coeficientes estimados de las mezclas a 10 M a 35 días de curado

	A: Relave	B: Ceniza	C: Metacaolin	AB
A: Relave	1,0000	0,8214	-0,1999	-0,9452
B: Ceniza	0,8214	1,0000	-0,2606	-0,9538
C: Metacaolin	-0,1999	-0,2606	1,0000	0,2873
AB	-0,9452	-0,9538	0,2873	1,0000
AC	0,1581	0,2630	-0,9937	-0,2694
BC	0,2096	0,2269	-0,9939	-0,2756

	AC	BC
A: Relave	0,1581	0,2096
B: Ceniza	0,2630	0,2269
C: Metacaolin	-0,9937	-0,9939
AB	-0,2694	-0,2756
AC	1,0000	0,9774
BC	0,9774	1,0000

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 35 muestra la matriz de correlación, la cual describe el grado de confusión entre los efectos, sin embargo, para este estudio se quiere denotar mayor presencia de relave en las mezclas, por lo que la correlación para este estudio es el adecuado, teniendo en cuenta que para el diseño de mezclas la confusión es normal.

Tabla 36

Resultados estimados para resistencia de las mezclas a 10 M a 35 días de curado

<i>Fila</i>	<i>Observados Valores</i>	<i>Ajustados Valores</i>	<i>Inferior 95,0% para Media</i>	<i>Superior 95,0% para Media</i>
1	130,52	128,512	87,9388	169,085
2	105,45	121,965	93,4867	150,442
3	240,81	246,571	207,683	285,458
4	117,5	128,538	88,2225	168,854
5	218,54	205,721	184,993	226,449
6	214,34	188,512	166,577	210,447
7	250,89	250,815	229,686	271,945
8	195,76	205,735	184,342	227,127
9	145,43	151,141	119,362	182,921
10	235,11	236,704	204,877	268,531
11	187,66	174,414	146,603	202,225
12	238,8	213,458	183,609	243,307
13	198,25	231,462	208,734	254,19
14	78,22	73,7319	32,4742	114,99

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 36 contiene información acerca de los valores de resistencia generados usando el modelo ajustado, La tabla incluye:

- (1) Los valores observados de resistencia (si alguno).
- (2) El valor predicho de resistencia usando el modelo ajustado.

(3) Intervalos de confianza del 95,0% para la respuesta media.

Figura 33 es la representación gráfica según el modelo matemático, de residuos para la resistencia a la compresión, muestra los valores de diferencia entre los valores observados, es decir, valores reales de resistencia a la compresión, y los valores ajustados por el modelo matemático (Tabla 36), como se observa, los valores residuales varían aleatoriamente alrededor de la línea.

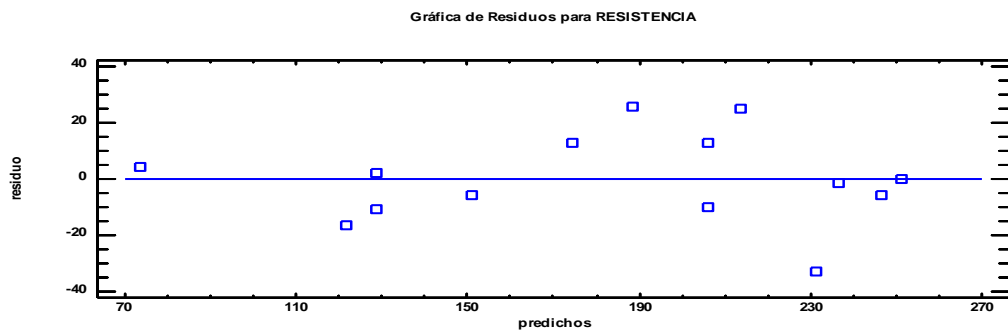


Figura 33. Gráfica de residuos para resistencia (resistencia a la compresión)

Fuente. Elaboración propia.

4.8. Resultados del análisis elemental y micrográfico para las probetas más resistentes

Fuente. Laboratorio de investigación Nanolab, UNJBG

Denominación de las muestras:

Muestra	Denominación	Nombre extenso
01	Muestra 1	Muestra 1 - 55-37,5-7,5
02	Muestra 2	Muestra 2 - 55-45-0

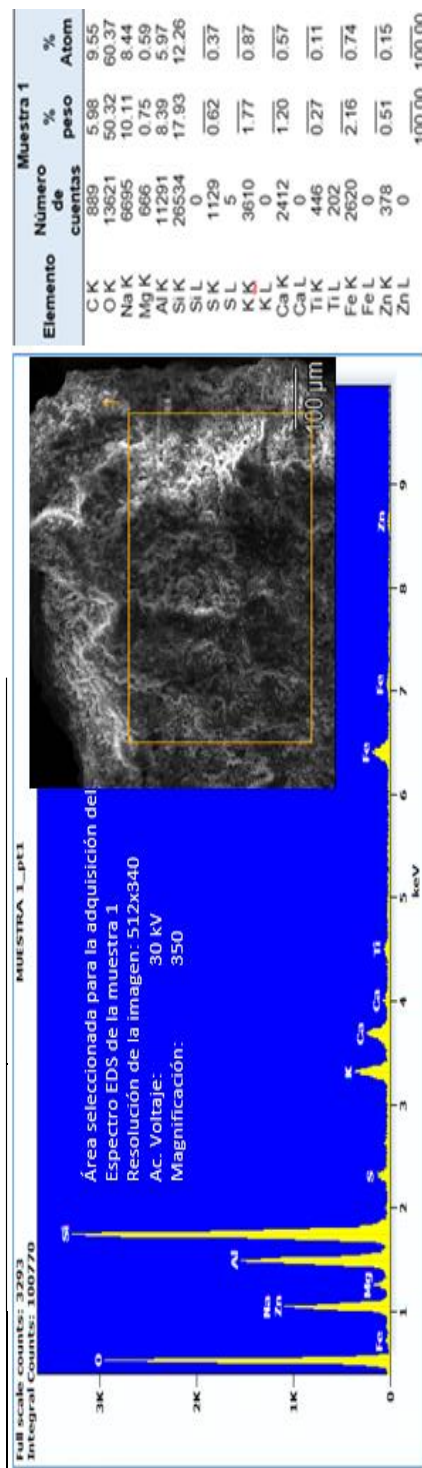


Figura 34. Resultados del análisis elemental y micrográfico para la muestra 1. Denota la aglomeración de los materiales particulados en su malla tetragonal.

Fuente. Laboratorio de investigación Nanolab, UNJBG

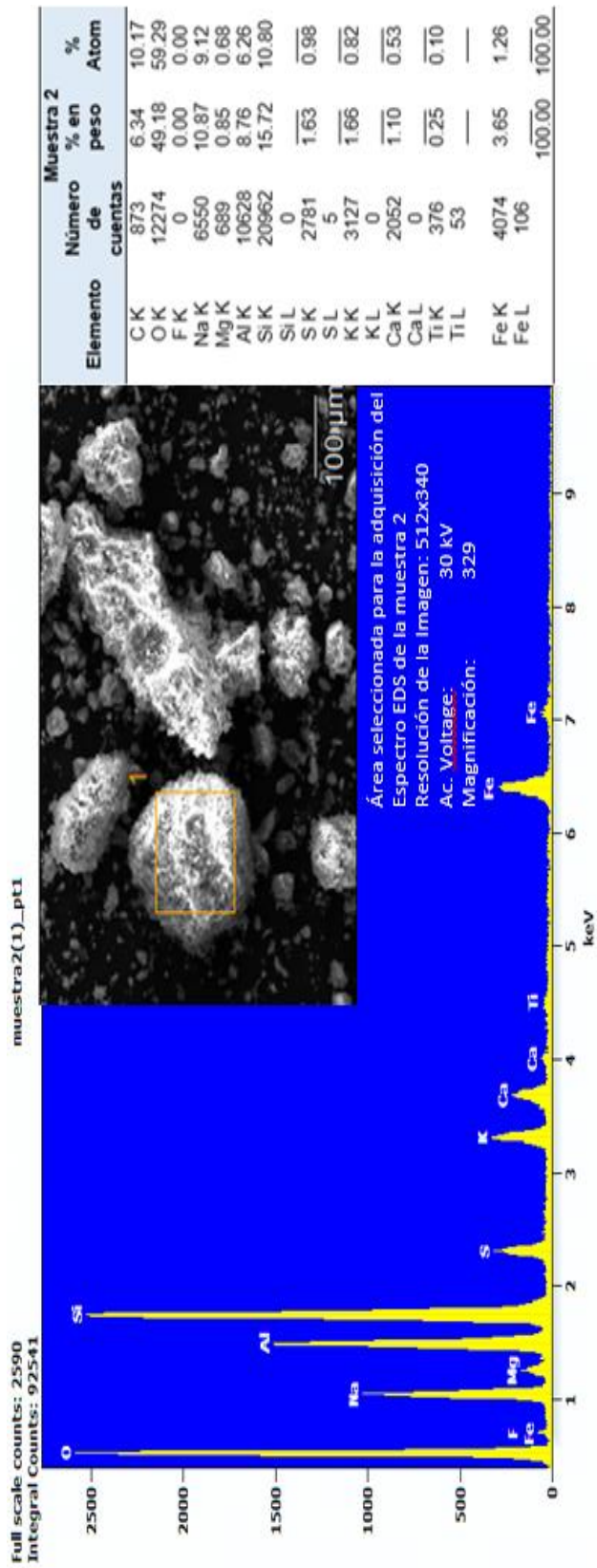


Figura 35. Resultados del análisis elemental y micrográfico para la Muestra 2. Denota la aglomeración de los materiales particulados en su malla tetragonal.

Fuente. Laboratorio de investigación Nanolab, UNJBG

4.17. Discusión

Teniendo en cuenta las características de la investigación presente se procede a realizar la discusión con el artículo científico, realizado por Giannopoulou y Panias (2006), titulado “Development of geopolymeric materials from industrial solid wastes” (Desarrollo de materiales geopoliméricos a partir de desechos sólidos industriales), realizado en La Escuela de Ingeniería Minas y Metalurgia de la Universidad Técnica Nacional de Atenas, Grecia.

Para el artículo científico, “Development of geopolymeric materials from industrial solid wastes” (Desarrollo de materiales geopoliméricos a partir de desechos sólidos industriales), en una de sus conclusiones afirma que se debe investigar la aplicación de la tecnología de geopolimerización para el tratamiento de relaves de flotación resultantes del procesamiento de minerales de sulfuro mixto. Para el presente estudio se denota la importancia de su aplicación, Por lo que se hace una propuesta de estudio de aplicación, para inmovilización de relaves al cierre de la presa de relaves, teniendo en cuenta los resultados favorables descritos en este trabajo de investigación.

Para el artículo científico, “Development of geopolymeric materials from industrial solid wastes” (Desarrollo de materiales geopoliméricos a

partir de desechos sólidos industriales), en una de sus conclusiones afirma que los materiales geopoliméricos sintetizados por mezclas de relaves de flotación y cenizas volantes de presentaron una resistencia a la compresión eficiente de hasta 11,9 MPa y alta absorción de agua. Para el presente estudio las mezclas con los relaves de flotación ceniza y metacaolín presentaron una resistencia a la compresión superior llegando a 24,6 MPa y para el geopolímero formado al 100 % de relave llega a una resistencia 22,26 MPa el cual puede ser explicado por causas de composición teniendo en cuenta que para este estudio se denotó que los relaves de flotación de minerales de cobre (sulfuros de cobre) presenta alta presencia de aluminosilicatos en su composición, hay que tener en cuenta las condiciones atmosféricas para el curado del geopolímero.

Para el artículo científico, "Development of geopolymeric materials from industrial solid wastes" (Desarrollo de materiales geopoliméricos a partir de desechos sólidos industriales), en una de sus conclusiones afirma que las pruebas de lixiviación de los materiales geopoliméricos sintetizados en condiciones estáticas, indicaron la inmovilización efectiva de los metales pesados contenidos en los relaves de flotación. Para el presente estudio se ha demostrado la reducción sustancial en los niveles de elementos presentes en el geopolímero, lo que demuestra que los geopolímeros

obtenidos son una alternativa muy eficiente para inmovilizar estos relaves de flotación de minerales de cobre (sulfuros de cobre).

4.18. Contrastación de hipótesis

Por la naturaleza del estudio se opta por una hipótesis descriptiva, debido a que la investigación es de tipo exploratorio experimental.

Hipótesis general

H₀ = La inmovilización de los relaves de flotación de sulfuros de cobre se logra con el uso de un proceso de geopolimerización de los mismos.

H₁ = La inmovilización de los relaves de flotación de sulfuros de cobre no se logra con el uso de un proceso de geopolimerización de los mismos.

En concordancia con los resultados obtenidos que indican la posibilidad de inmovilizar relaves de flotación de sulfuros de cobre mediante el uso de geopolímeros se opta por la hipótesis **H₀** y se descarta la hipótesis alternativa **H₁**, por lo tanto, queda contrastada.

Hipótesis específicas:

H₀ = Los aditivos determinados para la geopolimerización con relaves son los adecuados.

H₁ = Los aditivos determinados para la geopolimerización con relaves no son los adecuados.

En concordancia con los resultados obtenidos se puede indicar que los aditivos determinados son adecuados para la formación del geopolímero en base a relaves de flotación de cobre, por lo que se opta por la hipótesis **H₀** y se descarta la hipótesis alternativa **H₁**, por lo tanto, queda contrastada.

H₀ = La determinación del proceso de geopolimerización permite proponer un procedimiento propio para la inmovilización de relaves de flotación de sulfuros de cobre.

H₁ = La determinación del proceso de geopolimerización no permite proponer un procedimiento propio para la inmovilización de relaves de flotación de sulfuros de cobre.

En concordancia con los resultados obtenidos se puede indicar que la determinación del proceso de geopolimerización permite proponer un procedimiento propio para la inmovilización de relaves de flotación de sulfuros de cobre, por lo que se opta por la hipótesis **H₀** y se descarta la hipótesis alternativa **H₁**, por lo tanto, queda contrastada.

4.19. Propuesta de aplicación del estudio

La minería en todo el mundo, y particularmente la minería del cobre, ha experimentado un notable crecimiento entre los años 2000 y 2014. Esto ha resultado en proyectos con altas tasas de producción diaria. En países como Perú y Chile, los mayores productores de cobre del mundo (ambos países son responsables del 40 % de la producción mundial), varios de estos proyectos se ubican en la cordillera de los Andes, muy por encima del nivel del mar, lo que requiere la construcción de grandes depósitos de relaves, muchos de los cuales requieren presas de considerable altura. Pero también existe la minería polimetálica de Cu-Pb-Zn, minerales refractarios de oro y plata, que se encuentran enclavados en la cordillera de los Andes, donde la geografía es demasiado accidentada, por tanto, no hay terreno adecuado para la disposición de relaves, a su vez estos contiene elementos altamente tóxicos y dañinos al medio ambiente, como el mercurio, el cromo, el cadmio, el arsénico, el antimonio, en forma de sulfuros o sulfosales, elementos que necesariamente se deben evitar que se lixivien, surge la imperiosa necesidad de controlarlos, para lograr hacer una minería limpia y sustentable.

En esa perspectiva, como el objetivo de este estudio fue evaluar la posibilidad de inmovilizar e inertizar relaves de flotación de sulfuros de cobre mediante el método de geopolimerización reactiva, utilizando los

componentes aluminosilicatos en ellos contenidos en la proporción que ha permitido minimizar las tasas de lixiviación de los metales pesados y los elementos principales que se analizaron después de 28 días de curado.

Según los resultados, existe la posibilidad de estabilizar grandes cantidades de diversos elementos del relave empleado en este estudio mediante geopolimerización reactiva, permite proponer su uso para estabilizar e inmovilizar relaves de cualquier planta concentradora en la forma que se muestra en la Figura 37, durante el periodo de vida de producción de la mina y finalmente al cierre de sus operaciones y por consiguiente, el cierre del depósito de relaves.

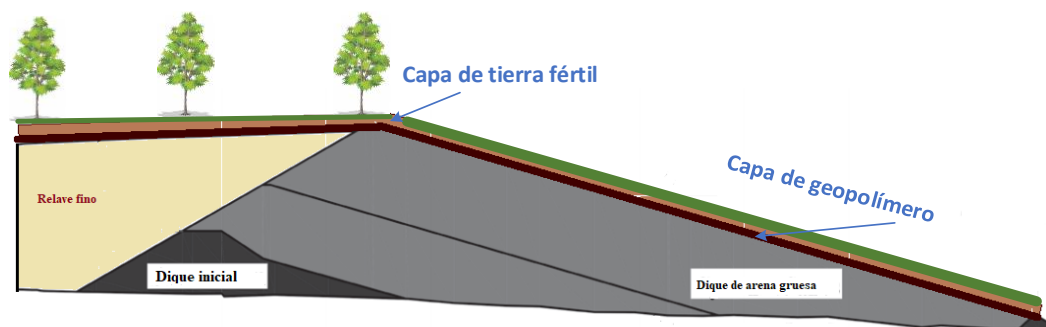


Figura 36. Esquema de la inmovilización de relaves al cierre de la presa de relaves.

Fuente: Elaboración propia, 2019.

CONCLUSIONES

Se ha comprobado que los relaves de flotación de cobre, provenientes de la operación minera de Toquepala en el distrito de Ilabaya -Tacna, son útiles para la conformación de geopolímero, logrando así obtener propiedades óptimas para la resistencia tanto química y estructuralmente.

Experimentalmente, la mayor resistencia a la compresión en el modelo estadístico es 55 % relave, 37,5 % Ceniza Volante y 7,5 % de metacaolín con una resistencia máxima de 14,08 MPa a 28 días de curado en solución de 10 M de NaOH y 24.60 MPa a 35 días de curado a un 95 % de confianza. Se realizaron pruebas para los materiales al 100 % de composición para el relave logrando una resistencia de 22,68 MPa en solución de 10 M de NaOH y 19,26 MPa en solución de 15 M de NaOH pertenecientes a las muestras RV-Y3 y RV-Y4 a 35 días de secado.

Se caracterizó el procedimiento para la obtención del geopolímero, teniendo en cuenta los resultados experimentales no es necesario la presencia de componentes como cenizas volantes o metacaolín para el conformado del geopolímero en periodos de 28 a 35 días de secado.

RECOMENDACIONES

Para el conformado de los geopolímeros en base a relaves de flotación de cobre (sulfuro de cobre) es necesario la utilización de los respectivos equipos de protección personal (EPP), teniendo en cuenta que se estará trabajando con material particulado fino. Para un mejor acabado superficial del geopolímero se debe tratar en lo más mínimo en contacto con el ambiente, colocarle un film de plástico para evitar la formación de cristales silicosos en la superficie, prestando atención también a la homogeneidad de las mezclas para el conformado del geopolímero.

Teniendo en cuenta la composición mineralógica del relave y las características ambientales de la ciudad de Tacna, el geopolímero, el tiempo de curado varía de 28 a 35 días de curado, el NaOH comercial es igual de efectivo para el conformado de geopolímeros que el de laboratorio.

La universidad, el Estado la sociedad y la empresa privada deben impulsar en lo posible medidas de innovación de investigaciones orientadas al reciclaje de desechos industriales aprovechando sus propiedades innatas, como material se abre un gran campo de estudio no solo para las ciencias ingenieriles si no también aportes para la economía circular.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arias, F. (2012). "El Proyecto de Investigación, Introducción a la metodología científica". 6ª Edición, Editorial Episteme, c.a.
- Barbosa, V., MacKenzie, K. y Thaumaturgo, C. (2000). "Synthesis and Characterisation of Materials Based on Inorganic Polymers of Alumina and Silica: Sodium Polysialate Polymers." *International Journal of Inorganic Materials* 2(4): 309-317.
- Barrie, E , Cappuyns V., Vassilieva E., Adriaens R., Hollanders S., Garcés D., Paredes C., Pontikes Y., Elsen J. y Machiels L. (2015). "Potential of inorganic polymers (geopolymers) made of halloysite and volcanic glass for the immobilisation of tailings from gold extraction in Ecuador" artículo publicada en la revista especializada *Applied Clay Science* 109-110:95-106.
- Cheng, T. y Chiu, J. (2003). "Fire-resistant geopolymer produced by granulated blast furnace slag." *Miner. Engg.* Vol. [16], No. 3.
- Davidovits, J. (1982). "Mineral Polymers and Methods of Making Them". U.S. Patent No. 4472199, 1982.
- Davidovits, J. (1999). "Chemistry of Geopolymeric Systems, Terminology In: *Proceedings of 99 International Conference*", eds. Joseph Davidovits, R. Davidovits & C. James, France.

Davidovits, J. (2011). "Geopolymer Chemistry & Applications". 3rd Edition.
Institut Géopolymère. Saint-Quentin, Francia.

Duxson, P., Fernández, A., Provis J., Palomo, A., y Deventer J. (2007).
"Geopolymer Technology: The Current State of the Art". Journal of
Materials Science 42 (9): 2917-2933.

García, C. Tongombol, D. (2014) "Los relaves mineros, su efecto en el
ambiente y la salud" IV CONACIN.

Giannopoulou, I. y Panyas, D. (2006). "Development of geopolymeric
materials from industrial solid wastes" artículo presentado en la
segunda conferencia internacional "Advances in Mineral Resources
Management and Environmental Geotechnology", Hania, Grecia.

Hardjito, D., Wallah, S., Sumajouw, D., y Rangan, B. (2004) "Properties of
Geopolymer Concrete with Fly Ash as Source Material: Effect of
Mixture Composition". Paper999 to the Seventh CANMET/ACI
International Conference on Recent Advances in Concrete
Technology. Las Vegas, USA.

Hernández, R., Fernández, C. y Baptista, M. (2010) "Metodología de la
Investigación" Quinta edición.

Instituto Peruano de Economía. (2017). "El valor agregado de la minería en
el Perú" Primera edición.

Komnitsas, K. y Zaharaki, D., (2007). "Geopolymerisation: A review and prospects for the minerals industry". Journal Minerals Engineering, pp.1261–1277.

Komnitsas, K., Zaharaki, D., Perdikatsis, V., (2009) "Effect of synthesis parameters on the compressive strength of low-calcium ferronickel slag inorganic polymers", Journal Hazardous Materials, vol. 161, pp.760-768.

Komnitsas, K., Zaharaki, D., Vlachou, A., Bartzas, G. y Galetakis, M. (2015) Effect of synthesis parameters on the quality of construction and demolition wastes (CDW) geopolymers. Advanced Powder Technology 26. pp. 368-376.

Lee, W. y Deventer, J. (2004). "The interface between natural siliceous aggregates and geopolymers." Cem. Concr. Res. Vol. [34], No. 2.

Mackenzie, K., Waijarean, N., Asavapisit S., Guy N. y Jameson L., (2017). "Synthesis and properties of geopolymers based on water treatment residue and their immobilization of some heavy metals" Artículo publicado en Journal of Materials Science 52(12).

Ministerio de energía y minas. (1993), "Guía Ambiental Para el Manejo de Relaves Mineros".

Montes, N. (2014). "Cementos Alcalinos: Materiales de Construcción Ecológicos" Revista CINTEX, Vol. 19, pp.109-125.

- Montgomery, D. (2005). "Diseño y análisis de experimentos" segunda edición. Editorial Limusa Wiley, ISBN 9681861566.
- Ortega, D., Bustamante, M., Gutiérrez, D. y Correa A., (2014)." Diseño de mezclas en formulaciones industriales" DYNA, Volumen 82, Número 189, p. 149-156, 2015. ISSN electrónico 2346-2183. ISSN impreso 0012-7353.
- Palomo, A., Grutzeck, M. y Blanco, M. (1999). "Alkali -activated fly ashes A cement for the future". Journal Cem. Concr. Res. Vol. [29].
- Palomo, A., Blanco, M., Granizo, M., Puertas, F., Vázquez T. y Grutzeck M. (1999). "Chemical stability of cementitious materials base on metakaolin". Cem. Concr. Res. Vol. [29].
- Palomo, A. y Alonso, S., (2001) "Calorimetric study of alkaline activation of calcium hydroxidemetakaolin solid mixtures". Journal Cement and Concrete Composites, vol. 31, no. 1, pp. 25-30.
- Phair, J. y Deventer J. (2001)." Effect of silicate activator pH on the leaching and material characteristics of waste-based inorganic polymers" Journal Minerals Engineering 14(3):289-304.
- Provis, L. y Deventer J. (2009). "Structure, processing, properties and industrial applications". Woodhead Publising Limited. 1 Ed. ISBN: 978-1-85573-607-8.

- Rahier, H., Simons, W., Mele, B. y Biesemans M. (1997). "Low-Temperature Synthesised Aluminosilicate Glasses Part 111: Influence of the Composition of the Silicate Solution on Production, Structure and Properties". J. Mater. Sci. Vol. [32], No. 22.
- Waijarean, N., Suwimol, A. y Kwannate, S. (2014). "Strength and microstructure of water treatment residue-based geopolymers containing heavy metals" Artículo publicado en Construction and Building Materials 50:486-491.
- Wills, B. y Finch J. (2016). "Wills 'Mineral Processing Technology, 8th Ed., Una introducción a los aspectos prácticos del tratamiento de minerales y la recuperación de minerales "(Elsevier Ltd, Amsterdam, 2016).
- Wilson, D., Balkau, F. y Thurgood, M. (2005). Manual de Formación en gestión de residuos peligrosos para países en vías de desarrollo. Disponible: www.uneptie.org/pc/hazardouswaste/menu.htm.
- Xu, H., Deventer, J. y Lukey, G. (2001) "Effect of alkali Metals on the preferential Geopolymerization of Stilbite/kaolinite Mixtures" Industrial and Engineering Chemistry Research.

Yip, C., Lukey, G. y Deventer, J. (2003). "Processing, microstructure and properties of geopolymeric materials". 1 05th Annual Meeting and Exposition of the American Ceramic Society, Nashville TN.

ANEXOS

ANEXO 1



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 2




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 3




UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN
FACULTAD DE INGENIERÍA
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 VALDOVINOS
ING. GEÓLOGO GEOTÉCNICO
Reg. CIP 156993

Responsable de Laboratorio


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



ANEXO 4




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 5



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 155993

Responsable de Laboratorio


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


ANEXO 6




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
X1		06/03/2019	4.4	4.8	21.12	100	4.73
X2		06/03/2019	4.5	4.7	21.15	150	7.09
F1		06/03/2019	4.5	4.5	20.25	3810	188.15
R1		06/03/2019	4.4	4.6	20.24	4840	239.13


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


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



