



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Facultad de Ingeniería

Carrera de Ingeniería Civil

Evaluación de mezclas de hormigón simple fabricado con arenas de relave minero de la planta de tratamiento y beneficio “Matamoros”, del Cantón Portovelo, Provincia de El Oro

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Civil

Autores:

Erick Danilo, Espinoza Capelo

CI: 0106002603

Correo electrónico: danespcapelo@gmail.com

Marco Ignacio, Ochoa Macancela

CI: 0302591151

Correo electrónico: marco.ochoam@gmail.com

Director:

Christian Américo, Cruzat Contreras

CI: 0107985681

Codirector:

Daniel Estuardo, Mogrovejo Carrasco

CI: 0301500576

Cuenca, Ecuador

08 de abril de 2021



Resumen

El hormigón juega un papel crucial dentro del desarrollo de la sociedad, constituyendo uno de los pilares que evidencian el crecimiento económico de las naciones. Al ser un material tan importante, la mejora de sus propiedades resulta una preocupación común en la actualidad; es por esto que se busca la reducción del costo e impacto ambiental generado por la fabricación y extracción de los constituyentes del hormigón, dando mejores prestaciones que brinden la oportunidad de cumplir con los estándares de calidad cada vez más altos dentro de la industria de la construcción.

El presente trabajo de titulación plantea determinar la influencia del uso de material de desecho de la industria aurífera en el distrito minero Zaruma - Portovelo y la variación que éste genera dentro de las propiedades físico-mecánicas del hormigón.

Con los resultados obtenidos mediante los ensayos descritos en este trabajo de titulación, se puede concluir que, en mezclas con variación de cemento la trabajabilidad aumenta y su resistencia a la compresión se mantiene, a diferencia de las mezclas con variación de arena donde su resistencia aumenta. Esta característica se da ya que el relave está compuesto en su mayoría por material fino (pasante el tamiz No.4), el cual se incorpora a la mezcla, reduciendo la cantidad de espacio vacíos, disminuyendo la porosidad y aumentando la resistencia. En base al ensayo de resistividad eléctrica se concluye que, a medida que transcurre el tiempo de curado, la resistencia ante la penetración de iones cloruro aumenta, mejorando así su calidad y durabilidad.

Palabras claves: Relave minero. Hormigón. Propiedades físico-mecánicas. Resistencia. Factibilidad.



Abstract

Concrete is very important for the society's development, becoming one of the indicators of economic growth in countries. Being such an important material, improving its properties turns out to be a common concern today; this is one of the main reasons why people try reducing its cost and the impact that manufacture and extraction of the concrete constituents has on the environment. Giving better benefits that provide opportunities to meet the increasingly high-quality standards within the construction industry.

The present thesis develops an investigation in which it is proposed to determine the influence of the use of waste material from the gold industry in the Zaruma-Portovelo mining district and the variation that this generates within the physical-mechanical properties of concrete.

As a consequence, it is established that workability increases in mixtures with variation in the amount of cement and its compression strength is maintained; however, there is evidence of an increase in the samples with variation of sand. Abrasion resistance is affected in all samples and according to the quality classification based on the pulse speed test, also all samples show good performance. On the other hand, in the resistivity test, the behavior of all the samples before the penetration of chloride ions is moderate and high.

Keywords: Gold mine tailing. Concrete. Physical-mechanical properties. Resistance. Feasibility.



ÍNDICE DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	16
1.1. ANTECEDENTES	16
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	16
1.3. JUSTIFICACIÓN	17
1.4. OBJETIVOS	17
1.4.1. Objetivo general	17
1.4.2. Objetivos específicos	17
1.5. HIPÓTESIS	18
1.6. ALCANCE	18
2. MATERIALES Y MÉTODOS	19
2.1. MATERIALES	19
2.1.1. Agua	19
2.1.2. Agregados	20
2.1.3. Aditivo químico	22
2.1.4. Cemento	23
2.1.5. Relave	24
2.1.5.1 Aspectos relevantes	25
2.1.5.2 Impacto socioeconómico y medioambiental	25
2.2. METODOLOGÍA	26
2.2.1. Caracterización de agregados	26
2.2.1.1 Granulometría	26
2.2.1.1.1 Agregado grueso	26
2.2.1.1.2 Agregado fino	27
2.2.1.2 Peso volumétrico suelto	29
2.2.1.3 Peso volumétrico compactado	29
2.2.1.4 Peso específico y absorción	30
2.2.1.4.1 Procedimiento agregado grueso	30
2.2.1.4.2 Procedimiento agregado fino	32
2.2.1.5 Abrasión	34
2.2.2. Caracterización de relave minero	35
2.2.2.1 Humedad	35
2.2.2.2 Granulometría por cribado	36



2.2.2.3	Granulometría por hidrómetro	36
2.2.2.4	Límites de consistencia del suelo (Atterberg)	37
2.2.2.5	Densidad.....	38
2.2.3.	Diseño, dosificación y elaboración de morteros	38
2.2.3.1	Mortero patrón.....	39
2.2.3.2	Mortero con sustitución	39
2.2.3.3	Diseño de la mezcla de mortero	39
2.2.3.4	Procedimiento de mezclado de mortero	40
2.2.3.5	Resistencia a compresión de morteros	42
2.2.4.	Diseño, dosificación y elaboración de hormigones	42
2.2.4.1	Hormigón patrón.....	42
2.2.4.2	Hormigón con sustitución	42
2.2.4.3	Diseño de la mezcla de hormigón	42
2.2.4.4	Procedimiento de mezclado del hormigón	43
2.2.5.	Propiedades físico mecánicas del hormigón	45
2.2.5.1	Ensayo de trabajabilidad	45
2.2.5.2	Ensayo de resistencia a compresión simple	46
2.2.5.3	Ensayos de absorción y densidad del hormigón endurecido	47
2.2.5.4	Ensayo de abrasión en el hormigón	48
2.2.5.5	Ensayo de velocidad de pulso ultrasónico.....	49
2.2.5.6	Ensayo para ataque de sulfatos	50
2.2.5.7	Ensayo de resistividad eléctrica	51
2.2.6.	Factibilidad del hormigón.....	53
3.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	54
3.1.	CARACTERIZACIÓN DE AGREGADOS.....	54
3.1.1.	Granulometría del agregado grueso	54
3.1.2.	Granulometría del agregado fino	54
3.1.3.	Peso volumétrico suelto y compactado	55
3.1.4.	Peso específico y absorción para agregado grueso y fino	57
3.1.5.	Abrasión en agregado grueso.....	58
3.2.	CARACTERIZACIÓN DE RELAVE MINERO	59
3.2.1.	Contenido de humedad	59
3.2.2.	Granulometría de relave	59



3.2.3.	Límites de Atterberg.....	61
3.2.3.1.1.	Límite Líquido.....	61
3.2.3.1.2.	Limite Plástico.....	62
3.2.3.1.3.	Límite de Contracción.....	62
3.2.4.	Densidad de relave.....	63
3.3.	ANÁLISIS DE MORTEROS.....	63
3.3.1.1.1.	Mortero Patrón.....	63
3.3.1.1.2.	Mortero con sustitución o adición de relave.....	65
3.4.	ANÁLISIS DE PROPIEDADES FISICO-MECÁNICAS EN HORMIGÓN.....	72
3.4.1.	Trabajabilidad.....	72
3.4.2.	Resistencia a compresión.....	73
3.4.3.	Absorción y densidad.....	74
3.4.4.	Abrasión.....	75
3.4.5.	Velocidad de pulso ultrasónico.....	75
3.4.6.	Ataque de sulfatos.....	77
3.4.7.	Resistividad eléctrica.....	78
3.5.	FACTIBILIDAD DEL HORMIGÓN.....	78
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	82
4.1.	CONCLUSIONES.....	82
4.2.	RECOMENDACIONES.....	85
	BIBLIOGRAFÍA.....	86
	ANEXOS.....	90

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Criterio de aceptación de aguas dudosas. Fuente: (NTE INEN 1855-1, 2015).....	19
Tabla 2.	Límites de tamaño de suelos separados. Fuente:(Das, 2013).....	20
Tabla 3.	Normas de ensayos a realizar en el agregado grueso.....	21
Tabla 4.	Normas de ensayos a realizar en el agregado fino.....	21
Tabla 5.	Ficha técnica del aditivo, ViscoCrete 4100. Fuente: (Sika Ecuatoriana S.A., 2021).....	23
Tabla 6.	Especificaciones técnicas de Holcim Premium Tipo HE. Fuente: (Holcim Ecuador S.A., 2021).....	24
Tabla 7.	Requisitos de clasificación para agregados gruesos. Fuente: (NTE INEN-872, 2011).....	27
Tabla 8.	Requisitos de gradación para agregado fino. Fuente: (NTE INEN-872, 2011).....	28



Tabla 9. Límites para sustancias nocivas en hormigón. Fuente: (NTE INEN-872, 2011)	28
Tabla 10. Gradación de las muestras de ensayo. Fuente: (NTE INEN 860, 2011)	34
Tabla 11. Especificaciones para la carga. Fuente: (NTE INEN 860, 2011).....	35
Tabla 12. Consistencia de la mezcla según el asentamiento. Fuente: (Guevara Fallas et al., 2012)..	45
Tabla 13. Clasificación de la calidad del hormigón a través de la velocidad de onda Fuente: (Saint- Pierre et al., 2016)	50
Tabla 14. Penetración del ion cloruro en función de la resistividad eléctrica. Fuente: (AASHTO T358, 2017).....	53
Tabla 15. Granulometría asumida para material triturado	54
Tabla 16. Granulometría asumida para agregado fino	55
Tabla 17. Calibración del molde	55
Tabla 18. Peso volumétrico suelto para agregado grueso	56
Tabla 19. Peso volumétrico compactado para agregado grueso	56
Tabla 20. Peso volumétrico suelto para agregado fino	56
Tabla 21. Peso volumétrico compactado para agregado fino.....	56
Tabla 22. Contenido de vacíos para agregado grueso.....	57
Tabla 23. Contenido de vacío para agregado fino	57
Tabla 24. Datos iniciales para absorción en agregado grueso.....	57
Tabla 25. Peso específico del agregado grueso y porcentaje de absorción	57
Tabla 26. Datos iniciales para absorción en agregado fino.....	58
Tabla 27. Peso específico del agregado fino y porcentaje de absorción	58
Tabla 28. Resultados del ensayo de abrasión	58
Tabla 29. Resumen de Ensayos en Agregados	59
Tabla 30. Resultados del ensayo de humedad	59
Tabla 31. Granulometría obtenida del relave minero	60
Tabla 32. Resultados del ensayo para límite líquido	61
Tabla 33. Resultados del ensayo de límite de contracción.....	63
Tabla 34. Mezclas de mortero para selección de muestra patrón.....	64
Tabla 35. Resistencia a compresión en mortero patrón	64
Tabla 36. Resistencia a compresión en mortero con adición de relave por porcentaje de arena	65
Tabla 37. Resistencia a compresión de mortero con sustitución de relave por arena.....	67
Tabla 38. Resistencia a compresión en mortero con adición de relave por porcentaje de cemento ..	69
Tabla 39. Resistencia a compresión en morteros con sustitución de relave por cemento	71
Tabla 40. Consistencia de la mezcla de acuerdo a los asentamientos	73
Tabla 41. Resistencia a compresión en hormigones	73
Tabla 42. Resultados del ensayo de absorción y densidad.....	74
Tabla 43. Resultados del ensayo de abrasión	75
Tabla 44. Resultado del ensayo de velocidad de pulso a los 7 días	76
Tabla 45. Resultado del ensayo de velocidad de pulso a los 28 días	76
Tabla 46. Ensayo de velocidad de pulso para análisis de sulfatos	77
Tabla 47. Ensayo de compresión para análisis de sulfatos	77
Tabla 48. Penetración de Iones Cloruro de acuerdo a la resistividad.....	78
Tabla 49. Análisis de precios unitarios para el hormigón patrón	79



Tabla 50. Análisis de precios unitarios para el hormigón con adición de relave por porcentaje de arena.....	79
Tabla 51. Análisis de precios unitarios en hormigón con sustitución de relave por arena	80
Tabla 52. Análisis de precios unitarios para el hormigón con adición de relave por porcentaje de cemento	80
Tabla 53. Análisis de precios unitarios para hormigón con sustitución de relave por cemento	81

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Agregado grueso proveniente de "Rookazul"	21
Ilustración 2. Agregado fino proveniente de "Vipesa"	22
Ilustración 3. Aditivo químico "ViscoCrete 4100"	23
Ilustración 4. Holcim Premium Tipo HE.....	24
Ilustración 5. Relave minero extraído de las relaveras	25
Ilustración 6. Equipo para granulometría por cribado	27
Ilustración 7. Ensayos de peso volumétrico.....	30
Ilustración 8. Equipo para peso específico y absorción de agregado grueso.....	32
Ilustración 9. Proceso colocación de arena en estado SSS.....	32
Ilustración 10. Máquina de los ángeles.....	34
Ilustración 11. Muestras de relave en ensayo de humedad	36
Ilustración 12. Granulometría por hidrómetro	37
Ilustración 13. Límites de Atterberg en un suelo Fuente: (Das, 2013).....	37
Ilustración 14. Equipo para Límites de Atterberg	38
Ilustración 15: Matraz con relave para Densidad Relativa	38
Ilustración 16. Materiales y equipos para elaboración de hormigón	39
Ilustración 17. Proceso de mezclado en mortero	41
Ilustración 18. Equipo para ensayo a compresión simple	42
Ilustración 19. Proceso de mezclado de hormigón	44
Ilustración 20. Cono de Abrams para ensayo de trabajabilidad	45
Ilustración 21. Equipo para ensayo a compresión simple	46
Ilustración 22. Ensayo de absorción y densidad	47
Ilustración 23. Muestras para ensayo de abrasión	49
Ilustración 24. Ensayo velocidad de pulso ultrasónico	50
Ilustración 25. Ensayo ataque de sulfato	51
Ilustración 26. Ground Tester MODEL 6472	52
Ilustración 27. Ensayo de resistividad eléctrica	52
Ilustración 28. Curva Granulométrica del Agregado Grueso	54
Ilustración 29. Curva Granulométrica del Agregado Fino	55
Ilustración 30. Curva Granulométrica del Relave Minero	60
Ilustración 31. Curva granulométrica de relave y arena	61
Ilustración 32. Curva Límite Líquido	62



Ilustración 33. Ensayo del Límite Plástico	62
Ilustración 34. Resistencia a compresión en mortero patrón	64
Ilustración 35. Resistencia a compresión en mortero con adición de relave por porcentaje de arena a los 7 días	66
Ilustración 36. Resistencia a compresión en mortero con adición de relave por porcentaje de arena a los 28 días	66
Ilustración 37. Resistencia a compresión de mortero con sustitución de relave por arena a los 7 días	67
Ilustración 38. Resistencia a compresión de mortero con sustitución de relave por arena a los 28 días	68
Ilustración 39. Resistencia a compresión en mortero con adición de relave por porcentaje de cemento a los 7 días	70
Ilustración 40. Resistencia a compresión en mortero con adición de relave por porcentaje de cemento a los 28 días	70
Ilustración 41. Resistencia a compresión en mortero con sustitución de cemento por relave a los 7 días	71
Ilustración 42. Resistencia a compresión en mortero con sustitución de cemento por relave a los 28 días	72
Ilustración 43. Resultados del ensayo de compresión a los 7 y 28 días	74
Ilustración 44. Hormigones luego del ensayo de abrasión en condición seca	75
Ilustración 45. Distancia entre la planta de beneficio "Matamoros" y hormigonera más cercana.	78

Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Erick Danilo Espinoza Capelo, en calidad de autor/a y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Evaluación de mezclas de hormigón simple fabricado con arenas de relave minero de la planta de tratamiento y beneficio "Matamoros", del Cantón Portovelo, Provincia de El Oro", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 08 de abril de 2021.



Erick Danilo Espinoza Capelo

C.I: 0106002603

Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Marco Ignacio Ochoa Macancela, en calidad de autor/a y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación "Evaluación de mezclas de hormigón simple fabricado con arenas de relave minero de la planta de tratamiento y beneficio "Matamoros", del Cantón Portovelo, Provincia de El Oro", de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio Institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 08 de abril de 2021



Marco Ignacio Ochoa Macancela

C.I: 0302591151

Cláusula de Propiedad Intelectual

Erick Danilo Espinoza Capelo, autor/a del trabajo de titulación "Evaluación de mezclas de hormigón simple fabricado con arenas de relave minero de la planta de tratamiento y beneficio "Matamoros", del Cantón Portovelo, Provincia de El Oro", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor/a.

Cuenca, 08 de abril de 2021



C.I: 0106002603

Cláusula de Propiedad Intelectual

Marco Ignacio Ochoa Macancela, autor/a del trabajo de titulación "Evaluación de mezclas de hormigón simple fabricado con arenas de relave minero de la planta de tratamiento y beneficio "Matamoros", del Cantón Portovelo, Provincia de El Oro", certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor/a.

Cuenca, 08 de abril de 2021



Marco Ignacio Ochoa Macancela

C.I: 0302591151



AGRADECIMIENTO

Nuestra gratitud a los directores de tesis, Lcdo. Cristhian Contreras, PhD, e Ing. Daniel Mogrovejo, PhD, por su siempre incondicional apoyo y buena disposición para guiarnos en la realización del presente trabajo de titulación.

A la empresa Holcim, de manera especial a los ingenieros, Marcelo Cañizares (Jefe de planta de la empresa Holcim – Cuenca) y Pablo Orbe (Jefe de laboratorio de la empresa Holcim – Cuenca), por proporcionarnos de manera desinteresada la totalidad de los materiales para el desarrollo de este trabajo experimental.

A nuestros lectores de tesis, Ing. Diana Mora e Ing. Juan Jiménez, por las observaciones y recomendaciones realizadas que permitieron mejorar los resultados obtenidos de nuestro trabajo.

Marco y Danilo



DEDICATORIA

A mi pequeña Danna, a ti por ser la fuerza, esperanza y motivación para cada día ser una mejor versión de mí. A mi familia, por haberme apoyado siempre de manera incondicional. De manera muy especial para Carmita, Jossy y Angie que me acompañaron y dieron sus palabras de aliento a lo largo de este camino. Gracias por querer siempre lo mejor para mí.

Danilo

El presente trabajo de titulación se lo dedico a mis padres, Marco Ochoa y Zaida Macancela, quienes han sido un ejemplo de vida y me han brindado su apoyo incondicional, haciendo hasta lo imposible para poder alcanzar esta meta. De ellos aprendí la responsabilidad, honestidad y, sobre todo, a trabajar duro por superarme cada día y mediante su aliento llegar a obtener mi título profesional. Por último, pero no menos importante, a esa compañera de vida que me encontré en el camino, a quien le debo mucho y que ha estado ahí, dándome ese empujón, cuando más lo he necesitado.

Marco

1. INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES

La minería es un factor fundamental en la supervivencia y el desarrollo de la humanidad, pero genera alteraciones en el medio ambiente y desechos sólidos como los relaves (residuos generados del procesamiento mecánico y químico de operaciones mineras), los cuales son vertidos en áreas para disposición de estos desechos con cierto porcentaje de humedad conocidos como depósitos o relaveras, constituyendo una solución instantánea para los relaves, pero perjudicial al entorno a largo plazo (Jiménez, 2017; Simonsen et al., 2020).

Los procesos de extracción y procesamiento de la minería han mejorado a lo largo de los años, generando una mayor eficiencia en la capacidad de producción de las plantas, lo que ha permitido el incremento de su producción. Este incremento afecta directamente al medio ambiente debido a la falta de tratamiento de desechos, manejo deficiente de los depósitos o relaveras y la falta de espacios donde ubicar estos residuos generados. El manejo y la disposición de relaves se han convertido en un gran desafío, por lo que varias investigaciones proponen su reciclaje y uso en la elaboración de hormigones, constituyendo una potencial estrategia para disminuir en lo posible el impacto ambiental (Cheng et al., 2016; Gao et al., 2020; Vargas & Rigamonti, 2020).

La mayoría de los relaves producidos en todo el mundo se vierten en grandes depósitos en la superficie; por lo tanto, es necesario idear una alternativa para el almacenamiento y eliminación de relaves mineros, disminuyendo los peligros y riesgos asociados con los depósitos de los mismos. La investigación sobre el relave, se deriva de la necesidad de prevenir el peligro que representan para el medio ambiente la tendencia a liberar ácidos y metales pesados, una vez entran en contacto con oxígeno y agua (Siddique & Jang, 2020).

Ecuador al estar en una zona de subducción, posee una gran cantidad de recursos mineros que llegarían a 36.9 millones de onzas de oro, 72.4 millones de onzas de plata, 8.1 millones de toneladas de cobre metálico, 28.471 toneladas de plomo y 209.649 toneladas de zinc. Las minas representativas están situadas en Zaruma, Portovelo, Bella Rica en la provincia de El Oro; Nambija y Chinapinza en la provincia de Zamora y en el sector de El Corazón en la provincia de Imbabura (Domínguez Andrade, 2013).

En el distrito minero Portovelo – Zaruma se producen alrededor de 500 000 toneladas de residuos mineros procedentes de la extracción de Oro y Plata, estos se generan en alrededor de 109 plantas de beneficio, que muchas de las veces llevan procesos con tecnología de bajo rendimiento y altamente contaminante (Marín Alvarado, 2011).

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los problemas ambientales en el distrito minero Zaruma – Portovelo se reportan en trabajos de investigación, que apuntan a la existencia de metales pesados en cantidades superiores a las limitaciones de las normas ambientales, teniendo como objetivo disminuir la contaminación ambiental y preservación del medio ambiente (Paredes Pozo, 2013; Vargas Santacruz, 2018).

En los ríos de la provincia de El Oro, las descargas de los contaminantes sin tratamiento previo afectan negativamente a toda forma de vida, provocando severos impactos a la naturaleza y afecciones en la salud humana según Oviedo et al. (2017). Esta provincia se ve afectada gravemente por metales pesados, en grandes concentraciones de plomo (Pb), arsénico (As), cadmio (Cd), manganeso (Mn), Zinc (Zn) y mercurio (Hg); principalmente causado por los bajos estándares de control.

1.3. JUSTIFICACIÓN

Para reducir estos niveles de contaminación y darles un mejor estilo de vida a los habitantes, resulta necesario la implementación de nuevas técnicas o metodologías acerca del tratamiento de relaves, de las que no se tiene mucha investigación. Razón por la cual, se opta por presentar una metodología experimental, que permita la utilización de los mismos en hormigones para ser empleados en el campo de la construcción, reduciendo los costos de producción y alcanzando un producto sustentable de buena calidad.

Es por ello que, mediante este trabajo de titulación, se busca una alternativa de aplicación de estos desechos en la fabricación de hormigones simples, donde los relaves se utilicen para rellenar los espacios vacíos de las mezclas, trabajando conjuntamente con un aditivo reductor de agua de alto rango, que mantiene o incluso mejora sus propiedades físico – mecánicas. Estas mezclas y sus componentes, deben cumplir con todas las especificaciones y rangos aceptables en hormigones simples, para satisfacer la necesidad de que el uso de los relaves sea favorable.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo general

Determinar la influencia de la aplicación de material de desechos procedentes de procesos mineros de la planta Matamoros, en reemplazo del agregado fino y determinar las propiedades físico - mecánicas del concreto, así como su posible aplicación en el mercado.

1.4.2. Objetivos específicos

- Caracterizar los materiales tradicionales.
- Caracterizar el relave minero como sustitución del agregado fino y cemento.
- Diseñar un mortero patrón mediante métodos tradicionales.
- Diseñar un mortero alternativo con respecto al mortero patrón, con distintos porcentajes de sustitución de agregado y cemento por relave.
- Determinar el porcentaje óptimo de relave minero en el mortero alternativo en términos de resistencia a compresión.
- Diseñar un hormigón tradicional y alternativo.
- Analizar las propiedades físico - mecánicas del hormigón alternativo y tradicional a base de ensayos como: trabajabilidad, resistencia a la compresión, densidades, permeabilidad en términos de absorción, abrasión, ataque de sulfatos, resistividad eléctrica.

- Analizar la factibilidad de uso para el hormigón tradicional y alternativo, en función de los costos de fabricación.

1.5. HIPÓTESIS

Los relaves provenientes de la producción de cobre y su uso en hormigones, proponen la sustitución de hasta 15% del cemento en la mezcla, otorgando al hormigón mayores resistencias a la compresión, además, mejora hasta en 30% las propiedades de durabilidad. Así también, en la sustitución de agregado fino, se ha llegado a establecer una mejora que ronda el 10% (Esmaeili & Aslani, 2019; Jiménez, 2017).

Al ser un material con características similares, la incorporación de relaves resultantes de la producción minera en hormigones, resulta en un mantenimiento o mejora de las propiedades físico-mecánicas, cumpliendo estándares de calidad tanto para normativas nacionales como internacionales. Esta alternativa permite disponer de estos desechos de una manera eficiente, ayudando en la reducción de la contaminación ambiental y generando un producto de bajo costo.

1.6. ALCANCE

El presente trabajo incluye la realización de morteros y el posterior análisis de 4 tipos de mezclas con diferentes proporciones de adición de relaves mineros, así como la ejecución de ensayos de resistencia a la compresión a los 7 y 28 días en cubos de 50 mm de arista. Se crearán 6 especímenes tanto para sustitución como adición, correspondientes al 5%, 10%, 15% y 20%. Se realizan mezclas variando el porcentaje de peso inicial de cemento y arena por separado. Determinando así, un porcentaje de relave, que mejore las propiedades físico-mecánicas del mortero alternativo a comparación del mortero patrón; constituyendo así, como porcentaje óptimo la mezcla de mortero, que presente rangos mayores de resistencia a la compresión y máxima trabajabilidad sin presentar signos de segregación.

Luego, se realizan 12 cilindros de 20 cm de altura y 10 cm de diámetro para el porcentaje óptimo de reemplazo obtenido en el análisis de mortero, tanto para el hormigón patrón como para los alternativos. Posteriormente, se procede a la determinación de sus propiedades físico-mecánicas, a través de los ensayos de: trabajabilidad, resistencia a la compresión, densidad, permeabilidad en términos de absorción, abrasión, ataque de sulfatos, resistividad eléctrica a distintas edades del hormigón, para cada ensayo.

Como etapa final se ejecuta un análisis de las propiedades obtenidas para determinar la factibilidad de empleo en hormigón alternativo, en términos de costos de producción.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. MATERIALES

El hormigón es básicamente una mezcla de dos componentes: agregado y pasta. La pasta, compuesta de cemento portland y agua, une los agregados, normalmente arena y grava creando una masa endurecida, similar a una roca. Esto ocurre como consecuencia de la reacción química del cemento con el agua, además pudiendo agregarse otros materiales cementantes o adiciones minerales (Kosmatka & Kerkhoff, 2014).

Las propiedades de los hormigones presentan variaciones en su comportamiento, debido a las proporciones de la mezcla, curado, temperatura, humedad, componentes, etc.; bajo las cuales se encuentra la mezcla tanto en estado fresco como endurecido.

Se procede a detallar a continuación, cada uno de los materiales necesarios para la producción de hormigones, sus conceptos básicos, las normativas a las cuales se rige el proceso de fabricación y los ensayos a los que serán sometidos dichos elementos.

2.1.1. Agua

Cualquier agua potable o natural que no presente fuerte sabor u olor, se la puede usar como agua de mezcla para la preparación del concreto. La cantidad de agua en la mezcla, está íntimamente relacionada con las propiedades del hormigón endurecido. Al agregar cantidades innecesarias de agua, el exceso que no se usa en la hidratación del hormigón permanece en los poros capilares o se evapora generando vacíos en la mezcla; por otro lado, la utilización de una cantidad adecuada de agua en las mezclas trae consigo innumerables ventajas como: aumento de la resistencia a compresión y flexión y por lo tanto disminución de la absorción y permeabilidad, reducción de la contracción y fisuración, menores cambios de volumen causado por el humedecimiento y el secado, entre otros (Kosmatka & Kerkhoff, 2014).

El agua de la mezcla debe cumplir con los requisitos establecidos en la normativa NTE INEN 1108 (2011); a falta de agua potable las condiciones que debe reunir el agua de acuerdo a la norma NTE INEN 1855-1 (2015), son: Primero, el agua para mezclado debe ser clara y de apariencia limpia, libre de cantidades perjudiciales de aceites, ácidos, sales, materiales orgánicos y otras sustancias dañinas para el hormigón. Segundo, el agua utilizada para limpieza de las concretas, podrá ser utilizada para el mezclado del hormigón siempre que cumpla con los límites, indicados en la Tabla 1.

Tabla 1. Criterio de aceptación de aguas dudosas. Fuente: (NTE INEN 1855-1, 2015)

Ensayos	Límites	Método de Ensayo
Resistencia la compresión, % mínimo de control a 7 días	90	INEN 488
Tiempo de fraguado, desviación del testigo h:min	Desde 1:00 antes hasta 1:30 después	INEN 158
La comparación se hace con dos mezclas elaboradas con proporciones fijas y con el mismo volumen de agua, una con el agua sometida a ensayo y la otra utilizando agua potable o agua destilada		

El agua utilizada en este proyecto es proporcionada por el sistema público de agua potable de la ciudad de Cuenca que es manejado por la empresa ETAPA, misma que se encarga del control de calidad de esta sustancia.

2.1.2. Agregados

Los agregados fino y grueso ocupan cerca del 60% al 75% del volumen del concreto e influyen en sus propiedades, tanto en estado fresco como endurecido, en las proporciones de la mezcla y en el valor comercial del concreto (Kosmatka & Kerkhoff, 2014).

La calidad de los agregados depende de: lugar de origen, distribución granulométrica, densidad, forma y superficie. Los agregados deben cumplir con algunas características para que puedan ser usados en la ingeniería tales como: partículas limpias, duras, resistentes, durables, libres de sustancias químicas y características que en cantidades representativas pueda afectar la adherencia de los áridos en la pasta de cemento.

Los agregados se clasifican según su procedencia, densidad y tamaño. De acuerdo a su procedencia pueden ser de origen natural formándose a través de procesos geológicos y, de origen artificial mediante la intervención del ser humano, ya que los agregados de origen natural pueden ser triturados generando piedra triturada o residuos minerales. Según su densidad, las rocas se dividen en tres grupos: ígneas, sedimentarias y metamórficas. Finalmente, de acuerdo a su tamaño los suelos son denominados gravas, arenas, limos o arcillas, dependiendo del tamaño predominante de las partículas (León & Ramirez, 2010).

La Tabla 2 muestra los límites de tamaño de suelo separado desarrollados por el Instituto Tecnológico de Massachussets (MIT), Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA), Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y del Transporte (AASHTO), Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos, y la oficina de Restauración de Estados Unidos (Das, 2013).

Tabla 2. Límites de tamaño de suelos separados. Fuente:(Das, 2013)

Nombre de la organización	Tamaño del grano [mm]			
	Grava	Arena	Limo	Arcilla
Instituto Tecnológico de Massachussets (MIT)	> 2	2 a 0.06	0.06 a 0.002	< 0.002
Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA)	> 2	2 a 0.05	0.05 a 0.002	< 0.002
Asociación Americana de Oficiales del Transporte de Carreteras Estatales (AASHTO)	76.2 a 2	2 a 0.075	0.075 a 0.002	< 0.002
Sistema unificado de clasificación de Suelos (<i>U.S. Army Corps of Engineers; U.S. Bureau of Reclamation; American Society for Testing and Materials</i>)	76.2 a 4.75	4.75 a 0.075	Finos (es decir, limos y arcillas < 0.075)	

Se recomienda que los agregados tengan una textura rugosa para facilitar su adherencia con la pasta de cemento, evitando así vacíos de aire en la mezcla; de la misma manera, se debe evitar el uso de agregados con formas alargadas y aplanadas, ya que perjudican la trabajabilidad de la mezcla en estado fresco.

Las características más importantes de los agregados fino y grueso, se determinan a través de los ensayos y normas descritas en la Tabla 3 y Tabla 4:

Tabla 3. Normas de ensayos a realizar en el agregado grueso

Ensayo	Norma ASTM	Norma Ecuatoriana de la Construcción
Peso Volumétrico Suelto	ASTM C29	INEN 858
Peso Volumétrico Compactado	ASTM C29	INEN 858
Peso Específico y Absorción	ASTM C127	INEN 857
Granulometría	ASTM C33	INEN 696
Ensayo de Abrasión Mediante la Máquina de los Ángeles	ASTM C131	INEN 860

Tabla 4. Normas de ensayos a realizar en el agregado fino

Ensayo	Norma ASTM	Norma Ecuatoriana de la Construcción
Peso Volumétrico Suelto	ASTM C29	INEN 858
Peso Volumétrico Compactado	ASTM C29	INEN 858
Peso Específico y Absorción	ASTM C128	INEN 856
Granulometría	ASTM C33	INEN 696

Para este trabajo, se necesita un agregado que entregue un aumento de resistencia y máxima adherencia, para lo cual se prevé utilizar un agregado grueso correspondiente a cantos rodados de la mina “Rookazul”, misma que extrae su material del sector de Santa Isabel, este material se puede apreciar en la Ilustración 1. El tamaño máximo nominal es de $\frac{3}{4}$ ” o 19 mm, el cual de acuerdo con la teoría es el máximo tamaño que aporta con gran significancia, un aumento de resistencia, máxima adherencia con el cemento y buena trabajabilidad.



Ilustración 1. Agregado grueso proveniente de "Rookazul"

El agregado fino puede ser arena natural o resultante de un proceso de trituración. Para el trabajo en desarrollo, se utilizó la arena proporcionada por la planta de hormigón premezclado Holcim (Ilustración 2), proveniente de la mina “Vipesa” ubicada en Santa Isabel.



Ilustración 2. Agregado fino proveniente de "Vipesa"

2.1.3. Aditivo químico

Los aditivos químicos son materiales, cuyo fin es el de ser utilizados en mezclas de concreto generando ciertas características específicas. Principalmente, los aditivos se dividen en ocho tipos que se detallan a continuación:

- Tipo A—Aditivos reductores de agua
- Tipo B—Aditivos retardadores
- Tipo C—Aditivos aceleradores
- Tipo D—Aditivos reductores de agua y retardadores
- Tipo E—Aditivos reductores de agua y aceleradores
- Tipo F—Aditivos reductores de agua, de alto rango
- Tipo G—Aditivos reductores de agua, de alto rango, y retardadores
- Tipo S—Aditivos de comportamiento específico

Para el desarrollo del presente trabajo experimental, al enfocarse los parámetros de análisis en garantizar una buena trabajabilidad y resistencia a la compresión, se plantea utilizar un aditivo reductor de agua de alto rango que cumpla el tipo F (ViscoCrete 4100). Este aditivo está diseñado para cumplir la norma ASTM C494 / C494M (2019) y puede ser utilizado en hormigón premezclado, prefabricado, como reductor de agua de alto rango; proporcionando excelente plasticidad manteniendo la trabajabilidad por más de una hora (Sika Ecuatoriana S.A., 2015).

Las ventajas más importantes del aditivo “ViscoCrete 4100” son:

- Reductor de agua.
- Alta plasticidad.
- Larga trabajabilidad y control de fraguado.

Las características físicas del aditivo se presentan a continuación en la Tabla 5:

Tabla 5. Ficha técnica del aditivo, ViscoCrete 4100. Fuente: (Sika Ecuatoriana S.A., 2021)

Aspecto	Líquido traslucido
Densidad [$\frac{g}{cm^3}$]	1.1
Dosis por peso de cemento %	0.19 - 0.9



Ilustración 3. Aditivo químico "ViscoCrete 4100"

2.1.4. Cemento

El cemento es un material aglutinante, procedente de la cocción de materiales calizos y arcillosos para generar un producto denominado Clinker, que al ser molido con adición de yeso tiene propiedades de cohesión y permiten la unión de materiales minerales entre sí, formando una mezcla compacta y homogénea (Enciclopedia_Salvat, 2004).

Según las normas ASTM C 1157 – 08a (2020) y NTE INEN 2380 (2011) los cementos se clasifican:

- Tipo GU. Para construcción en general. Se lo debe utilizar cuando no se requiere uno o más de los tipos especiales.
- Tipo HE. Alta resistencia inicial.
- Tipo MS. Moderada resistencia a los sulfatos.
- Tipo HS. Alta resistencia a los sulfatos.
- Tipo MH. Moderado calor de hidratación.
- Tipo LH. Bajo calor de hidratación.

El cemento utilizado en el presente trabajo fue Holcim Premium Tipo HE, que se puede ver en la Ilustración 4, el cual fue facilitado por la empresa cementera Holcim S.A. Este tipo de cemento presenta altas resistencias tempranas y considerablemente mayores que el cemento tipo GU.



Ilustración 4. Holcim Premium Tipo HE

Tabla 6. Especificaciones técnicas de Holcim Premium Tipo HE. Fuente: (Holcim Ecuador S.A., 2021)

	NTE INEN 2380	Valor Referencial
Cambio de longitud por autoclave, % máximos	0.8	
Tiempo de fraguado, método Vicat		
No menos de, minutos	45	150
No más de, minutos	420	
Contenido de aire del mortero, en volumen, %		3
Resistencia a la compresión, MPa, mínimo		
1 día	12	14
3 días	24	25
7 días	-	32
28 días	-	40
Expansión en barras de mortero 14 días. % Max	0.02	0.001

2.1.5. Relave

Los residuos generados por el procesamiento mecánico y químico en las operaciones de minería, denominados relaves mineros, son lechadas de grano fino de mineral molido, agua de proceso con contenido variable de productos químicos y sus restos. Los desechos mineros, incluidos los relaves, representan una de las mayores producciones de residuos industriales en aproximadamente 20.000-25.000 millones de toneladas por año (Simonsen et al., 2020).

Los relaves resultan ser materiales de desecho en la industria minera y contienen los constituyentes mineralógicos remanentes, con excepción de los metales de interés, además de incluir metales pesados y otras sustancias tóxicas, agregadas en el proceso de molienda (Mahmood & Elektorowicz, 2015).

Los materiales que se han ido acumulando a lo largo de la trayectoria minera de las localidades, son conocidos como pasivos mineros. Estos residuos fueron abandonados en escombreras o minas en desuso, sin la adopción de ninguna protección ambiental o control por parte de las autoridades encargadas, generando una serie de alteraciones en el medio ambiente como: contaminación de aguas superficiales y subterráneas, impacto visual, contaminación de suelos pertenecientes o cercanos al sector (Oblasser & Chaparro, 2008).

El relave a utilizar en el presente trabajo experimental, proviene de la planta de tratamiento y beneficio “Matamoros”, que se encuentra en la ciudad de Portovelo, Provincia de El Oro. El material se observa en la Ilustración 5:



Ilustración 5. Relave minero extraído de las relaveras: (a) Condición Húmeda, (b) Condición Seca.

2.1.5.1 Aspectos relevantes

Basándose en el estudio de caracterización de diferentes tipos de relaves mineros, que comprende tanto su composición mineralógica y química, para reemplazar parcialmente el cemento en mezclas de hormigón, se puede resaltar que: desde el punto de vista de su composición química, el relave presenta características calcáreas y silicio, que pueden intervenir tanto en el comportamiento hidráulico como en sus propiedades puzolánicas; y, desde el punto de vista mineralógico, se evidencia la presencia de calcita, dolomita y principalmente componentes ricos en cuarzo, feldespato y mica (Simonsen et al., 2020).

El aumento en el nivel de reemplazo de los relaves de oro en morteros de cemento, permite un refuerzo significativo en la resistencia a compresión, particularmente cuando se usa como reemplazo de arena. Este incremento, provoca una disminución en la profundidad de penetración de agua, porosidad y profundidad de carbonatación, tanto a corto y largo plazo. Este rendimiento se atribuye principalmente a la naturaleza puzolánica y al efecto de relleno de los relaves de oro, que promueve una microestructura más densa y una matriz mejor consolidada (Ince, 2019).

Los resultados según Ince (2019), demuestran también que el aumento de nivel de reemplazo de relaves de oro resultó en una disminución importante en la pérdida de resistencia a compresión cuando se somete a ciclos de congelación y descongelación.

2.1.5.2 Impacto socioeconómico y medioambiental

La reutilización de estos relaves mineros ayuda a subsanar el entorno contaminado y, por lo tanto, restaura el medio a su estado previo a la minería creando un uso de la tierra, para beneficiar a la comunidad local (Jiménez, 2017).

La incorporación de relaves de oro en morteros de cemento, ha dado buenos resultados como una reducción significativa en las emisiones de CO_2 , que surgen de la fabricación de Clinker. El uso del 30% de relaves de oro como reemplazo de cemento, en particular, resultó en una disminución del 22% en las emisiones de CO_2 . Esta incorporación implica una reducción significativa en las emisiones, proporciona una ruta crucial para remediar de manera sostenible el entorno inmediato de

los sitios mineros y contribuye expresamente al desarrollo socio-económico de la localidad (Ince, 2019).

2.2. METODOLOGÍA

2.2.1. Caracterización de agregados

2.2.1.1 Granulometría

El análisis granulométrico es la determinación del rango del tamaño de partículas presentes en un árido expresado como un porcentaje del peso seco total. Se proporcionan dos análisis para determinar su distribución. Primero, el análisis mecánico para partículas mayores a 0.075 mm, que consiste en hacer pasar la muestra por una serie de mallas, con aberturas progresivamente más pequeñas. Éstas se ubican en una máquina vibratoria durante un tiempo de agitación de 8 a 10 min, período en el cual, se consigue que no caiga más material. Terminado el cribado, se pesa la muestra retenida en cada uno de sus tamices. El segundo procedimiento es el análisis hidrométrico, que se usa para tamaños de partícula menores a 0.075 mm de diámetro, que tiene su fundamento en la ley de Stokes. Utilizando un hidrómetro previamente calibrado y mezclando 50g de muestra, que pasa el tamiz No.200 y con un agente dispersante (Hexametáfosfato de sodio al 4%); se registran los datos de temperatura del agua y lectura del hidrómetro, en los tiempos definidos, para relacionar la velocidad de sedimentación con los tamaños de partícula (Ishibashi & Hazarika, 2010).

Los resultados del análisis mecánico e hidrométrico, se presentan por medio de una curva de distribución granulométrica, en la cual los diámetros se graficarán en la abscisa en escala logarítmica y el porcentaje de finos correspondiente en la ordenada en escala aritmética.

Para el presente trabajo, se utilizó una granulometría controlada, es decir, se procedió a separar por tamaños de partículas y conformar el material, dependiendo de las cantidades necesarias para que se cumpla la granulometría específica, para esto prima el objetivo de mantenerse dentro de los requisitos máximos y mínimos de la norma NTE INEN-872 (2011). De esta manera, se trata de eliminar en lo posible la cantidad de variables inmiscuidas en las mezclas, evitando que varíen las propiedades del hormigón en cada una de las composiciones y generando resultados que podrán ser comparados entre sí, además de poder replicar las mezclas a futuro.

El tamaño máximo nominal de un agregado, corresponde a la abertura del tamiz inmediatamente menor al tamaño máximo absoluto, cuando por dicho tamiz pasa el 90% o más del peso del árido. Por ejemplo, si el tamaño máximo de árido requerido es de 3/4", el 100% deberá pasar el tamiz anterior (1") y casi en su totalidad (entre 90% -100%) el tamiz de 3/4".

2.2.1.1.1. Agregado grueso

Cuando se trata del agregado grueso, el tamaño máximo nominal o tamaños permitidos están basados en los requisitos de espaciamiento para aplicación estructural.

El agregado grueso debe cumplir con los prerrequisitos que se presenta en la Tabla 7, en la cual se especifica el número de tamiz pasante y el tamaño máximo nominal.

Tabla 7. Requisitos de clasificación para agregados gruesos. Fuente: (NTE INEN-872, 2011)

Tamaño nominal [mm]	Porcentaje acumulado en masa que debe pasar cada tamiz de laboratorio											
	100	90	75	63	50	37.5	25	19	12.5	9.5	4.75	2.36
90 a 37.5	100	90 a 100	--	25 a 60	--	0 a 15	--	0 a 5	--	--	--	--
63 a 37.5	--	--	100	90 a 100	35 a 70	0 a 15	--	0 a 5	--	--	--	--
50 a 25	--	--	--	100	90 a 100	35 a 70	0 a 15	--	0 a 5	--	--	--
50a 4.75	--	--	--	100	95 a 100	--	35 a 70	--	10 a 30	--	0 a 5	--
37.5 a 19	--	--	--	--	100	90 a 100	20 a 55	0 a 15	--	0 a 5	--	--
37.5 a 4.75	--	--	--	--	100	95 a 100	--	35 a 70	--	10 a 30	0 a 5	--
25 a 12.5	--	--	--	--	--	100	90 a 100	20 a 55	0 a 10	0 a 5	--	--
25 a 9.5	--	--	--	--	--	100	90 a 100	40 a 85	10 a 40	0 a 15	0 a 5	--
25 a 4.75	--	--	--	--	--	100	95 a 100	--	25 a 60	--	0 a 10	0 a 5
19 a 9.5	--	--	--	--	--	--	100	90 a 100	20 a 55	0 a 15	0 a 5	--
19 a 4.75	--	--	--	--	--	--	100	90 a 100	--	20 a 55	0 a 10	0 a 5

Para que el material se encuentre dentro de los límites establecidos, según su granulometría, se seleccionó el promedio de dichos límites y se ensayó con el equipo mostrado en la Ilustración 6 (a).



Ilustración 6. Equipo para granulometría por cribado: (a) Para árido grueso, (b) Para árido fino.

2.2.1.1.2. Agregado fino

Los agregados finos a utilizar en el desarrollo del trabajo experimental, cumplen con las especificaciones de la norma NTE INEN-872 (2011), que detalla los requisitos para la gradación de acuerdo a la Tabla 8.

En la norma NTE INEN-872 (2011), se detallan algunas especificaciones como: tamaño máximo nominal del agregado, máximo contenido de impurezas, y otros requisitos específicos de

clasificación. Por ejemplo: la diferencia entre el porcentaje de material pasante y el retenido en un tamiz consecutivo, que no debe exceder del 45% y su módulo de finura que debe obtenerse entre los valores de 2.3 y 3.1. Para la separación de tamaños se utiliza el equipo mostrado en la Ilustración 6 (b). El agregado fino debe encontrarse libre de cantidades de impurezas orgánicas perjudiciales al hormigón, es por ello que se proporciona la Tabla 9, donde se detalla el límite de sustancias nocivas en este agregado:

Tabla 8. Requisitos de gradación para agregado fino. Fuente: (NTE INEN-872, 2011)

Tamiz (NTE INEN 154) [mm]	% Pasa
9.5	100
4.75	95-100
2.36	80-100
1.18	50-85
0.6	25-60
0.3	5-30
0.15	0-10

Tabla 9. Límites para sustancias nocivas en hormigón. Fuente: (NTE INEN-872, 2011)

Ítem	Porcentaje de Masa de la Muestra Total %
Terrones de arcilla y partículas desmenuzables	3.0
Material más fino que 75 mm (no. 200):	
Hormigón sujeto a abrasión	3.0
Todos los demás hormigones	5.0
Carbón y Lignito:	
Donde es importante la apariencia superficial del hormigón	0.5
Todos los demás hormigones	1.0

Nota: En caso de ser arena triturada, el material menor a 75 mm (No. 200) está constituido por polvo de trituración, libre de arcilla o esquisto, se permite aumentar los límites en 5 y 7% respectivamente.

Para la determinación del módulo de finura se usa la siguiente ecuación:

$$MF = \frac{\sum \%Retenido_{acum}(No.4+No.8+No.16+No.30+No.50+No.100)}{100}$$

Ecuación 1

Donde:

MF: Módulo de finura, %

%Retenido_{acum}: Material acumulado retenido en una fracción de tamiz, %

2.2.1.2 Peso volumétrico suelto

Para la determinación del peso volumétrico suelto, la norma ASTM C29 (2007) establece el siguiente procedimiento por paladas:

- Desde una altura no mayor a 5 cm encima del recipiente, llenar el molde a rebosar por medio de una pala o cucharón.
- Prevenir la segregación de las partículas que componen la muestra.
- Nivelar la superficie mediante una regleta o una varilla, de manera que los espacios vacíos en la superficie se equilibren con las partículas grandes del árido grueso.
- Determinar y registrar la masa utilizada de árido para llenar el recipiente. Registrar los valores con una aproximación de 0.05 kg

El procedimiento de llenado se muestra en la Ilustración 7 (a), y el peso volumétrico suelto se determina mediante la siguiente expresión:

$$\rho_s = \frac{m_{suelto}}{V}$$

Ecuación 2

Donde:

ρ_s : Peso volumétrico suelto [$\frac{g}{cm^3}$]

m_{suelto} : Masa suelta de material en el recipiente [g]

V: Volumen del recipiente [cm^3]

2.2.1.3 Peso volumétrico compactado

Para la determinación del peso volumétrico compactado, la norma ASTM C29 (2007) establece el siguiente procedimiento por varillado:

- Llenar la tercera parte del molde y nivelar la superficie con los dedos.
- Compactar la capa de áridos con 25 golpes mediante la varilla de compactación, evitando que la varilla golpe el fondo del molde. Ilustración 7 (b).
- Llenar los dos tercios del molde y compactar de la forma indicada en los puntos anteriores, evitando que la varilla de compactación sobrepase la capa anterior del árido.
- Llenar el molde a rebosar y compactar de la forma indicada anteriormente.
- Enrasar con una regleta o los dedos la superficie al final de la tercera capa.
- Determinar y registrar la masa de los áridos compactados necesarios para llenar el recipiente.
- Registrar los valores con una aproximación de 0.05 kg.

Se determina el peso volumétrico compactado mediante la siguiente expresión:

$$\rho_c = \frac{m_{com}}{V}$$

Ecuación 3

Donde:

ρ_c : Peso volumétrico compactado [$\frac{g}{cm^3}$]

m_{com} : Masa compactada de material en el recipiente [g]

V: Volumen del recipiente [cm^3]



Ilustración 7. Ensayos de peso volumétrico: (a) Procedimiento de llenado del picnómetro por paladas, (b) Procedimiento de varillado para peso volumétrico compactado.

2.2.1.4 Peso específico y absorción

El peso específico se utiliza para el cálculo del volumen ocupado por el árido en las mezclas en base al volumen absoluto. También sirve para el cálculo de vacíos entre partículas del material.

La norma NTE INEN 856 (2010) define el peso específico real, como aquel que considera el volumen macizo de las partículas de árido, más los poros accesibles e inaccesibles de estas partículas. Se debe determinar la densidad real de áridos, tanto en estado seco como saturado superficialmente.

El peso específico neto considera el volumen macizo de las partículas de árido más el volumen de los poros inaccesibles.

La absorción es importante porque indica la cantidad de agua, que puede penetrar en los poros permeables de los agregados en un tiempo transcurrido de 24 horas, cuando éstas se encuentran sumergidas en agua.

2.2.1.4.1. Procedimiento agregado grueso

El procedimiento empleado para determinar las propiedades antes mencionadas, se detalla a continuación:

- Previamente, la preparación de la muestra consiste en el lavado y secado de las mismas hasta conseguir una masa constante.
- Sumergir la muestra en agua a temperatura ambiente por un lapso de $24\text{ h} \pm 4\text{ h}$
- Retirar la muestra del agua y secarla superficialmente, determinar su peso y registrarlo como masa de la muestra saturada superficialmente seca (Mss).



- Inmediatamente, colocar la muestra en la canastilla que cuelga de la balanza hidráulica.
- Sumergir y agitar la muestra para remover el aire, pesar y registrarla como masa de la muestra sumergida (M_{sum}).
- Secar la muestra en el horno hasta que llegue a una masa constante, pesar y registrarla como masa de la muestra seca (M_s).

Se determina el peso específico y la absorción mediante las siguientes expresiones:

Densidad del árido en condición seca al horno $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$

$$\text{Densidad seca (SH)} = \frac{997.5 M_s}{M_{SSS} - M_{sum}}$$

Ecuación 4

Densidad del árido en condición saturada superficialmente seca $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$

$$\text{Densidad (SSS)} = \frac{997.5 M_{SSS}}{M_{SSS} - M_{sum}}$$

Ecuación 5

Densidad aparente $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$

$$\text{Densidad aparente (SSS}_a\text{)} = \frac{997.5 M_s}{M_s - M_{sum}}$$

Ecuación 6

Absorción calculada en porcentaje, %

$$\text{Absorción. \%} = \frac{M_{SSS} - M_s}{M_s} * 100$$

Ecuación 7

Donde:

M_{SSS} : Masa de la muestra saturada superficialmente seca [kg]

M_{sum} : Masa de la muestra sumergida [kg]

M_s : Masa de la muestra seca [kg]



Ilustración 8. Equipo para peso específico y absorción de agregado grueso

2.2.1.4.2. Procedimiento agregado fino

El procedimiento empleado para determinar las propiedades del agregado fino, se detalla a continuación.

- Secar el material al horno hasta obtener una masa constante.
- Saturar el material en un recipiente durante 24 h.
- Eliminar lentamente el exceso de agua, evitando que se pierda material.
- Secar la muestra hasta que el material se encuentre en la condición saturada superficialmente seca (SSS).
- La condición SSS, se determina a través del molde cónico, en una superficie lisa y con el diámetro mayor del cono hacia abajo, llenar con árido en tres capas, compactando cada una de ellas con 25 golpes desde una altura libre del pisón de 5 mm. Finalmente, enrasar la superficie del cono.

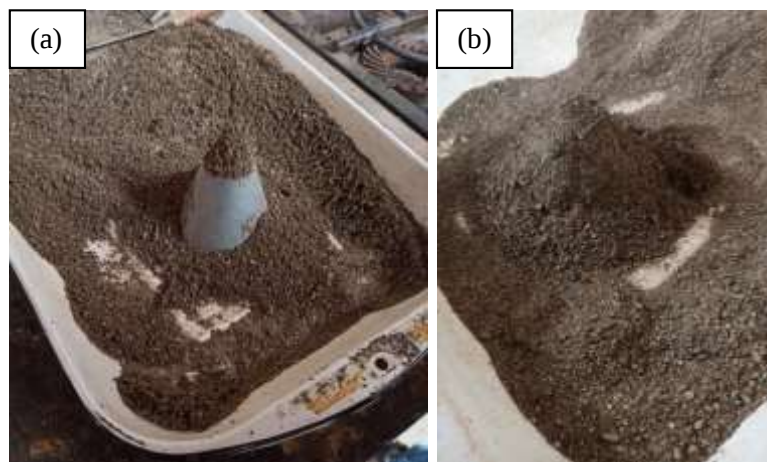


Ilustración 9. Determinación de la condición SSS: (a) Colocación de arena, (b) Arena en estado SSS



- Levantar el cono verticalmente. Si se conserva la forma del cono, el material no se encuentra en condición SSS, para ello el material deberá ser extraído y secado nuevamente, para repetir el procedimiento hasta lograr la condición deseada de que, al retirar el cono, el material se desmorone lentamente sobre su talud natural.
- Cuando se obtenga la condición deseada, registrar el peso del material como masa de la muestra saturada superficialmente seca (M_{ss}).
- Colocar el material en el matraz e introducir agua hasta cubrir los 2/3 de su volumen.
- Rodar, invertir y agitar el matraz para eliminar las burbujas de aire visibles.
- Llenar el matraz con agua hasta la marca de calibración y registrarlo como masa del matraz (M_m).
- Retirar la muestra del matraz evitando pérdidas y registrarlo como masa de la muestra seca (M_s).
- Colocar agua en el matraz hasta su marca de calibración, pesar y apuntarlo como masa de agua (M_a).

Para determinar las propiedades se utilizaron las siguientes ecuaciones:

Densidad del árido en condición seca al horno [$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$]

$$\text{Densidad seca (SH)} = \frac{M_s}{M_a + M_{ss} - M_m}$$

Ecuación 8

Densidad del árido en condición saturada superficialmente seca [$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$]

$$\text{Densidad (SSS)} = \frac{M_{ss}}{M_a + M_{ss} + M_m}$$

Ecuación 9

Densidad aparente [$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$]

$$\text{Densidad aparente (SSS}_a) = \frac{M_s}{M_a + M_s - M_m}$$

Ecuación 10

Absorción calculada en porcentaje, %

$$\text{Absorción. \%} = \frac{M_{ss} - M_s}{M_s} * 100$$

Ecuación 11

Donde:

M_{ss} : Masa de la muestra saturada superficialmente seca [kg]

M_m : Masa del matraz [kg]

M_s : Masa de la muestra seca [kg]

M_a : Masa de agua [kg]

La mayoría de los minerales tienen una densidad de sólidos, que caen dentro de un rango general de 2.6 a 2.9. La densidad de sólidos de arena ligeramente coloreada, formada principalmente de cuarzo, se estima aproximadamente igual a 2.65; para suelos arcillosos y limosos, varía entre 2.6 y 2.9 (Das, 2013).

2.2.1.5 Abrasión

Este ensayo determina la resistencia que ofrecen los agregados gruesos a la abrasión o golpes, mediante la máquina de los Ángeles, Ilustración 10.



Ilustración 10. Máquina de los ángeles

A continuación, se describe el procedimiento del ensayo:

- De acuerdo a la granulometría controlada, se tiene una gradación que mejor representa el rango de tamaños del árido proporcionado para el ensayo; esto se puede determinar mediante la Tabla 10 de la norma (NTE INEN 860, 2011).

Tabla 10. Gradación de las muestras de ensayo. Fuente: (NTE INEN 860, 2011)

Abertura de tamiz [mm]		Masa por tamaños indicada [g]			
Pasante	Retenido	Gradación			
		A	B	C	D
37.5	25	1250 ± 25	...	...	...
25	19	1251 ± 25	...	...	...
19	12.5	1252 ± 10	2500 ± 10	...	...
12.5	9.5	1253 ± 10	2500 ± 10	...	...
9.5	6.3	...	...	2500 ± 10	...
6.3	4.75	...	...	2500 ± 10	...
4.75	2.36	...	...	...	5000 ± 10
Total		5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10	5000 ± 10

- Pesar el material correspondiente al grado elegido en la Tabla 10 y registrar el total como masa inicial. En base a este peso, escoger el número de esferas a colocar en la máquina de Los Ángeles para el ensayo según la Tabla 11.

Tabla 11. Especificaciones para la carga. Fuente: (NTE INEN 860, 2011)

Gradación	Número de esferas
A	12
B	11
C	8
D	6

- Colocar la muestra y las esferas en la máquina, girar 500 revoluciones a una velocidad entre 30 r/min y 33 r/min.
- Descargar el material y realizar una separación preliminar de la muestra sobre un tamiz de mayor abertura que el No. 12.
- Tamizar la porción fina por el tamiz No. 12
- Finalmente, lavar el material más grueso que el tamiz No. 12 y secarlo al horno hasta obtener una masa constante.

El porcentaje de desgaste, se determina mediante la siguiente expresión:

$$P = \frac{M_{in} - M_{fin}}{M_{in}} * 100$$

Ecuación 12

Donde:

P : Pérdida de masa, %

M_{in}: Masa inicial [kg]

M_{fin}: Masa final [kg]

2.2.2. Caracterización de relave minero

2.2.2.1 Humedad

La humedad es el contenido de agua en una muestra de suelo y se define como la relación del peso de agua entre el peso de sólidos en un volumen dado de suelo, es decir, el contenido de humedad en una muestra de suelo en términos de su peso seco (Juárez Badillo & Rico Rodríguez, 2005).

$$w = \frac{W_h - W_s}{W_s} * 100$$

Ecuación 13

Donde:

w : Humedad, %

W_h : Peso de la muestra húmeda [g]

W_s : Peso de la muestra seca [g]

Para la determinación de la humedad, se toma el peso de una muestra en estado húmedo, luego se seca hasta alcanzar un estado de masa constante y se usan las relaciones antes mencionadas, para su cálculo.

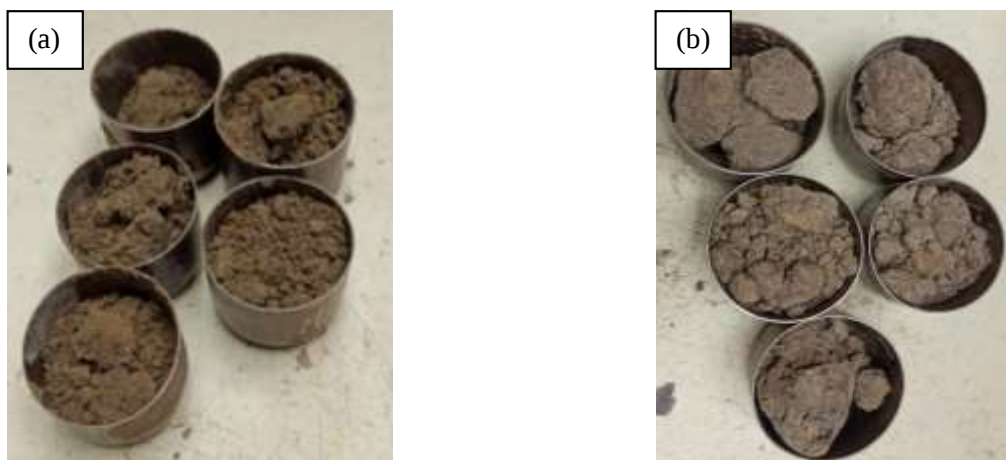


Ilustración 11. Muestras de relave en ensayo de humedad: (a) Relave en estado húmedo, (b) Relave en estado seco.

2.2.2.2 Granulometría por cribado

En el presente trabajo de titulación, se busca establecer la granulometría correspondiente al relave minero mediante la utilización de la serie fina de tamices, que va desde el tamiz No. 4 hasta el tamiz No. 200.

2.2.2.3 Granulometría por hidrómetro

El método más usado, para determinar los porcentajes de partículas que pasa el tamiz No.200, es el hidrómetro, determinando la densidad de la suspensión a medida que pasa el tiempo y midiendo la altura de caída de la partícula de mayor tamaño correspondiente a la densidad media (ASTM D422, 2002).



Ilustración 12. Granulometría por hidrómetro

2.2.2.4 Límites de consistencia del suelo (Atterberg)

Dependiendo del contenido de agua en una muestra de suelo, se puede clasificar en cuatro estados básicos, denominados sólido, semisólido, plástico y líquido. Los valores límite para el paso a cada uno de estos estados se conocen como límites de consistencia, definidos por Ishibashi & Hazarika (2010) y se describen a continuación:

- Límite líquido (LL): es el contenido de agua en el punto de transición de estado plástico a líquido, para realizar este ensayo se utiliza la cuchara de Casagrande, Ilustración 14 (a).
- Límite plástico (LP): es el contenido de agua en el punto de transición de estado semisólido a plástico. Para este ensayo, se realizan cilindros de suelo de 3 mm de diámetro, y se determina la humedad a la cual dichos cilindros se empiezan a agrietar.
- Límite de contracción (SL): es el contenido de agua en el que la transición de estado sólido a semisólido tiene lugar, para realizar este ensayo se utiliza el kit mostrado en la Ilustración 14 (b).

A continuación, se presenta la Ilustración 13, que detalla la representación de los estados básicos en el suelo, de acuerdo a su contenido de humedad.

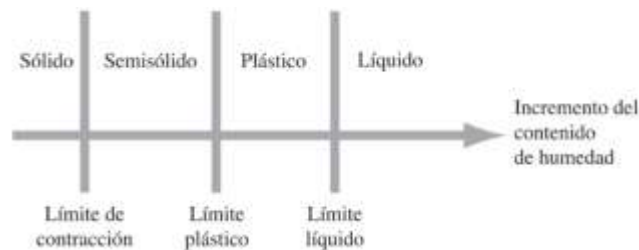


Ilustración 13. Límites de Atterberg en un suelo. Fuente: (Das, 2013)

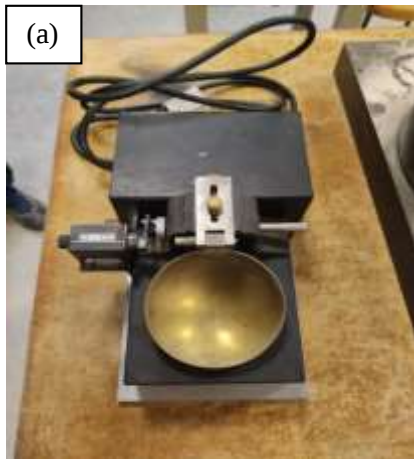


Ilustración 14. Equipo para Límites de Atterberg: (a) Cuchara de Casagrande, (b) Kit para ensayo de Límite de contracción.

2.2.2.5 Densidad

Para la obtención de la densidad de los sólidos del relave, se ejecutó el procedimiento gravimétrico descrito en la norma (ASTM D 854 – 06, 2006).

Para el ensayo, se procedió inicialmente a la calibración del matraz, de este modo se reduce el error producido por la variación de temperatura y la utilización de agua potable.

Debido a que el mayor porcentaje de error, proviene de una inadecuada desaireación, se sometió el matraz con material a ebullición durante un período de 30 minutos como recomienda la norma ASTM D 854 – 06 (2006), a partir del cual se obtiene la densidad relativa. En la Ilustración 15, se observa el matraz con el material en su interior.



Ilustración 15. Matraz con relave para Densidad Relativa

2.2.3. Diseño, dosificación y elaboración de morteros

Para determinar la mezcla patrón en los cubos de mortero, se siguió la norma NTE INEN 152 (2012), equivalente a la ASTM C150/C150M (2019); para las probetas de hormigón, se partió del

método propuesto por el ACI 211.1 (2009). Los materiales y equipos a utilizar se muestran a continuación:



Ilustración 16. Materiales y equipos para elaboración de hormigón

2.2.3.1 Mortero patrón

Se propuso un proceso de mezclado de un mortero con una relación agua/cemento, que garantice una buena resistencia y alta trabajabilidad. Se realizaron varias pruebas de mezcla de mortero, para verificar el comportamiento con dos aditivos diferentes, ViscoCrete 4100 y 20 HE.

Determinado el porcentaje óptimo de aditivo, así como la relación agua/cemento, se definió la mezcla patrón sobre el cual, se van a realizar las muestras con diferentes porcentajes de adición del relave minero.

2.2.3.2 Mortero con sustitución

Se parte de la mezcla del mortero patrón para realizar las sustituciones de relave con diferentes porcentajes, 5%, 10%, 15% y 20%, tanto para el agregado fino como para el cemento. A partir de estas sustituciones, se determina el porcentaje óptimo de relave en función de la resistencia a compresión, que mejore las propiedades del mortero en estudio.

2.2.3.3 Diseño de la mezcla de mortero

El trabajo experimental, busca el diseño de la mezcla y para eso se propuso lo siguiente:

- Se propone una relación inicial de arena/cemento de 2:1, es decir, que por cada peso de cemento se tendrá el doble de peso de arena.
- Luego se procede a realizar el diseño para diferentes relaciones agua/cemento, desde 0.29 hasta 0.35, para dos tipos de aditivos.
- Después, se realiza el ensayo experimental de cada muestra, para determinar la fluidez y trabajabilidad de la misma.

- Finalmente, se escoge la mezcla que mejor trabajabilidad brinda, menor relación agua/cemento ocupa y el tipo de aditivo a implementar, para obtener una buena resistencia.

2.2.3.4 Procedimiento de mezclado de mortero

Para el proceso de mezclado, se propone un procedimiento desarrollado por los autores de este trabajo, mismo que sirve tanto para la ejecución de las mezclas de mortero patrón y mortero alternativo.

- En primer lugar, se lava y seca el agregado fino a utilizar, con el fin de eliminar materia orgánica e impurezas, Ilustración 17 (a).
- Luego se construye la granulometría para el agregado fino, en base a la Tabla 8 de la sección 2.2.1.1.2, y se pesa todos los componentes de la mezcla.
- Se coloca en la batidora: agua, aditivo y cemento; y se procede a mezclar durante un período de 30 segundos a velocidad baja, Ilustración 17 (b) y (c).
- Después, se agrega la arena en un tiempo de 30 segundos a la misma velocidad. Para el caso de los morteros con sustitución, se agrega el relave junto con la arena, Ilustración 17 (d).
- Una vez terminada la adición de arena y/o relave, se detiene la batidora y se cambia a velocidad media por 90 segundos.
- Se detiene la batidora, dejando reposar la mezcla durante 90 segundos, con el fin de limpiar las paredes del recipiente y actúe el aditivo en la misma, Ilustración 17 (e).
- Luego se mezcla durante 60 segundos a velocidad media.
- Posteriormente, se determina la fluidez de la mezcla, mediante el ensayo de fluidez, donde se especifica aplicar 25 golpes durante un tiempo de 15 segundos. Para este procedimiento, se utiliza la mesa de fluidez, Ilustración 17 (f).
- La mezcla se devuelve a la batidora y se bate durante 30 segundos a velocidad media.
- Finalmente, se procede al moldeado de los cubos de mortero, Ilustración 17 (g), donde su compactación se realizó con un pisón normado, según ASTM C109/109M-16^a (2016), y se ejecutó 32 golpes distribuidos en 4 etapas de 8 golpes adyacentes a cada una, Ilustración 17 (h).

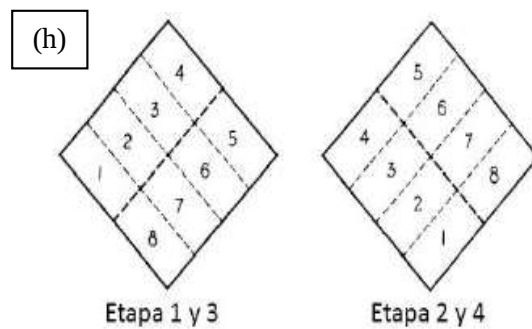
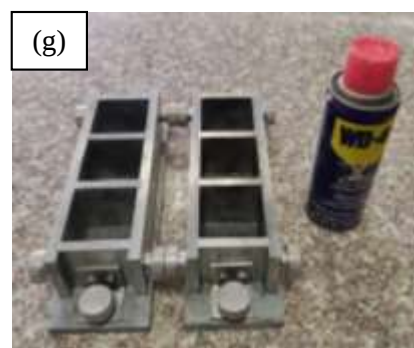
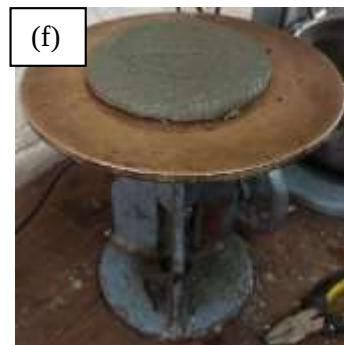


Ilustración 17. Proceso de mezclado en mortero: (a) Lavado de arena, (b) Batidora con agua y aditivo, (c) Incorporación de cemento a la mezcla, (d) Incorporación de arena en velocidad baja, (e) Mezcla de mortero en período de reposo, (f) Mesa de fluidez, (g) Moldes de mortero de 50 mm, agente desmoldante, (h) Orden de apisonado al moldear los especímenes de ensayo. Fuente: (ASTM C109 / C109M, 2016).

2.2.3.5 Resistencia a compresión de morteros

La resistencia a compresión de cubos de mortero, de 50 mm de arista, viene determinada por las normas, ASTM C109 (2016) y NTE INEN 488 (2009). Para el ensayo, se procede a retirar las muestras de la piscina de curado y secarlas superficialmente, para ensayarlas a los 7 y 28 días en la máquina de compresión, Ilustración 18.



Ilustración 18. Equipo para ensayo a compresión simple

De esta prueba, se selecciona el porcentaje de sustitución de relave, que aporta mayor resistencia a compresión sobre el mortero patrón y a partir de esto, se procede a realizar las mezclas de hormigón.

2.2.4. Diseño, dosificación y elaboración de hormigones

2.2.4.1 Hormigón patrón

El método propuesto para la fabricación del hormigón patrón, se realiza mediante el ACI 211.1 (2009), en la que se describe el procedimiento para selección y ajuste de proporciones, para hormigones de peso normal. La consideración básica de este método, es la determinación de la cantidad de los materiales requeridos, para cumplir los estándares de resistencia y trabajabilidad deseados, produciendo un hormigón con excelentes propiedades en estado fresco y endurecido.

2.2.4.2 Hormigón con sustitución

Se determina un porcentaje óptimo de sustitución de relave, en función de los resultados del ensayo de resistencia a compresión en los morteros, tanto en arena como en cemento, con el cual se realiza el hormigón alternativo.

2.2.4.3 Diseño de la mezcla de hormigón

El método del ACI 211.1 (2009), propone una secuencia de pasos, para cumplir de manera satisfactoria con el diseño en base a las propiedades de los materiales y prerrequisitos, que se imponen para llegar al hormigón esperado.

- Como primer paso, para el diseño de la mezcla se impone la trabajabilidad deseada en el hormigón.
- A través del tamaño máximo nominal, se determina el volumen de aire contenido y volumen de agua en la mezcla.

- Luego, se determina la resistencia promedio con la cual se establece el diseño.
- Después, se selecciona la relación agua/cemento, la cual permite que una determinada cantidad de cemento fija en la mezcla, disponga suficiente agua para proporcionar una adecuada colocación del concreto, logrando una resistencia especificada.
- A partir de esto, se determina el contenido de cemento y agregados. Para determinar la cantidad de aditivo, se ocupa un porcentaje en relación a la masa de cemento.
- Se realiza un ajuste por humedad del agregado ya que, dada la porosidad de los mismos, estos absorben agua, que no alcanza a reaccionar con el cemento y, por ende, no hace parte de la cantidad especificada en la dosificación, obtenida en los puntos anteriores. El no tener en cuenta esta precisión, puede ocasionar variaciones de la relación agua/cemento y la trabajabilidad de la mezcla.
- Finalmente, se realizan las mezclas a ser ensayadas en laboratorio.

2.2.4.4 Procedimiento de mezclado del hormigón

El procedimiento de mezclado sigue una secuencia definida, la misma que se cumplirá para todas las mezclas, garantizando la homogeneidad en las técnicas y la presencia de condiciones semejantes en el hormigón.

- Como primer paso, se procede a lavar y secar el agregado a utilizar, con el fin de eliminar materia orgánica e impurezas, debido a que influyen de manera negativa en la resistencia del hormigón, Ilustración 19 (a).
- Se coloca alrededor del 75 % de agua en la mezcladora, se añade la totalidad del aditivo y se mezcla por un tiempo de 30 segundos, para que se integre completamente, Ilustración 19 (b)
- Luego, se añade el cemento evitando desperdiciar el material. Este paso debe ser realizado en un período de 90 segundos, procurando colocar el cemento al fondo de la concretera y reanudando el mezclado durante un tiempo de 60 segundos, Ilustración 19 (c).
- Después, se añade el agregado grueso gradualmente en un periodo de 60 segundos y se mezcla en un intervalo de 2 minutos, Ilustración 19 (d).
- Se agrega la arena junto con el relave durante 60 segundos y se mezcla en el transcurso de 3 minutos. En este paso se incorpora el 25% de agua restante para apresurar la incorporación del agregado fino, Ilustración 19 (e).
- A continuación, se detiene la concretera, para realizar el desprendimiento del material pegado en sus paredes a lo largo de 3 minutos, en el cual actuará el aditivo, Ilustración 19 (f).
- Se reanuda el mezclado, por un tiempo de 7 minutos, para asegurar una completa homogeneización del hormigón.
- Posteriormente, se procede al ensayo de trabajabilidad en el hormigón mediante el cono de Abrams, Ilustración 19 (g).
- Finalmente, se realiza el encofrado en los moldes metálicos de 10 x 20 cm, Ilustración 19 (h).

El lapso de mezclado puede variar dependiendo de las características de: hormigón, presencia de lodos, equipo de mezclado y otros factores. Para el caso de estudio, el proceso de mezclado se realiza en un periodo de 20 minutos.

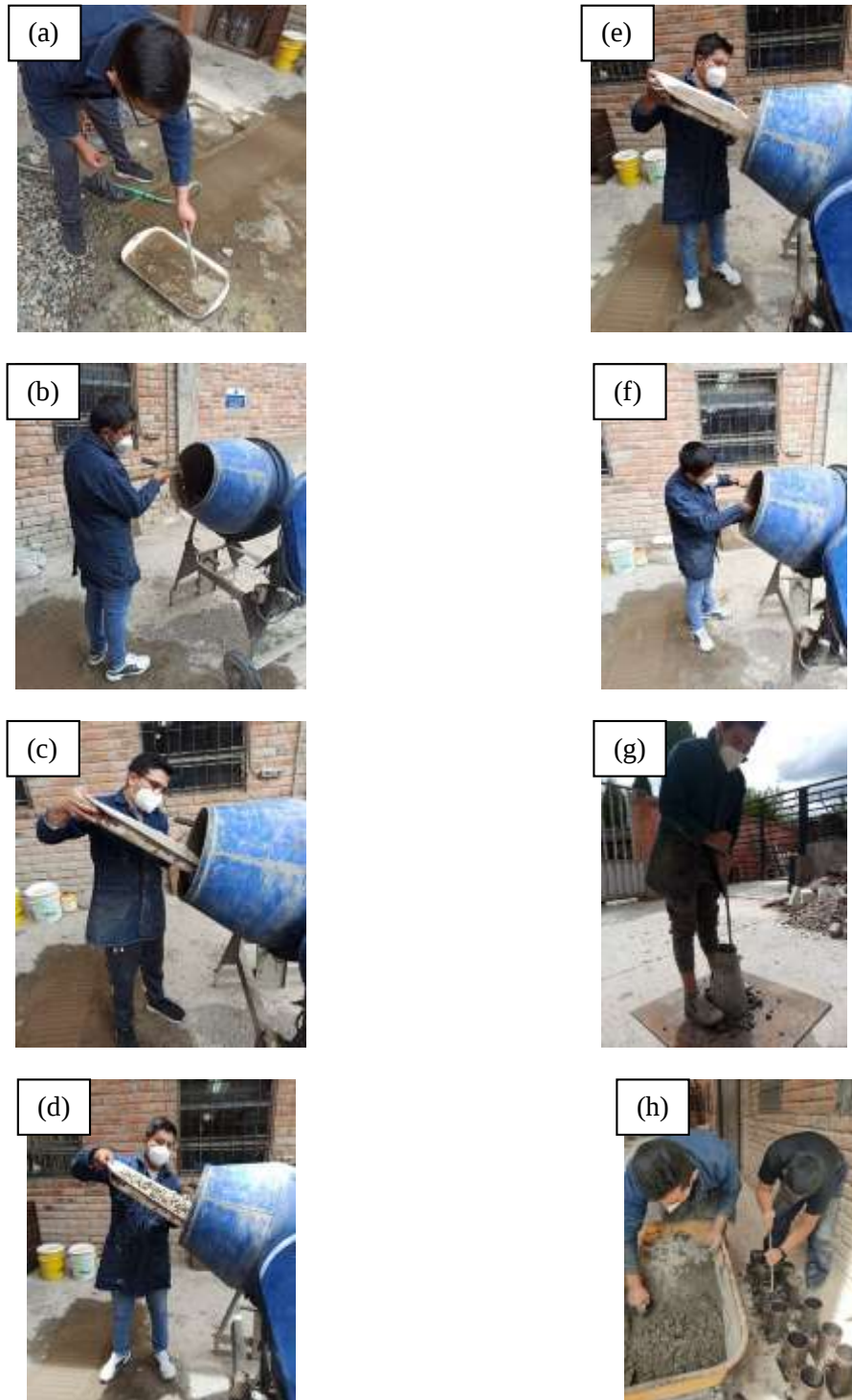


Ilustración 19. Proceso de mezclado de hormigón: (a) Lavado de material, (b) Incorporación de agua, (c) Incorporación de cemento, (d) Adición de agregado grueso, (e) Adición de agregado fino, (f) Desprendimiento de material, (g) Ensayo de trabajabilidad, (h) Varillado y encofrado de la mezcla.

2.2.5. Propiedades físico mecánicas del hormigón

2.2.5.1 Ensayo de trabajabilidad

La trabajabilidad es una propiedad que permite al hormigón ser: mezclado, transportado, vaciado, consolidado y colocado, sin tener que afectar la homogeneidad del concreto.

Para medir la trabajabilidad, se utiliza el cono de Abrams, colocando la mezcla dentro del mismo en un proceso de 3 capas con un varillado de 25 golpes cada una, se retira el cono en un tiempo máximo de 5 segundos y se ubica de forma invertida, determinando el asentamiento en la mezcla mediante un flexómetro, como se muestra en Ilustración 20. El procedimiento descrito anteriormente, se detalla en la norma ASTM C143/C143M (2012), la cual clasifica el asentamiento mediante la Tabla 12.

Tabla 12. Consistencia de la mezcla según el asentamiento. Fuente: (Guevara Fallas et al., 2012)

Consistencia	Asentamiento [mm]
Seca	0 a 20
Plástica	30 a 50
Blanda	60 a 90
Fluida	10 a 150
Líquida	> 150

En la tabla anterior, se expresa la consistencia del hormigón según la cantidad de asentamiento, pues cuanto mayor sea la cantidad de agua: incrementa el asentamiento, aumenta la fluidez, mejora la plasticidad y trabajabilidad.



Ilustración 20. Cono de Abrams para ensayo de trabajabilidad

2.2.5.2 Ensayo de resistencia a compresión simple

Este método consiste en aplicar una carga axial de compresión a la probeta, con una velocidad constante normada, determinando la resistencia a compresión de hormigones cilíndricos y regularizando sus normas constructivas.

El esfuerzo a compresión de la probeta, se calcula dividiendo la carga máxima obtenida durante el ensayo por el área de la sección transversal del espécimen, mediante la Ecuación 14 (ASTM C39/C39M –14, 2014).

$$f'c = \frac{P}{d^2 * \frac{\pi}{4}}$$

Ecuación 14

Donde:

$f'c$: Resistencia a compresión $\left[\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}\right]$

P: Carga transversal aplicada [kg]

d: Diámetro del neopreno utilizado [cm]

Estos resultados son usados para el control de calidad en: dosificación, mezclado, encofrado, evaluación de aditivos y otros aspectos relacionados. Para el presente ensayo, se utilizó la máquina de compresión, Ilustración 21.



Ilustración 21. Equipo para ensayo a compresión simple

2.2.5.3 Ensayos de absorción y densidad del hormigón endurecido

En este método de ensayo, se obtienen los datos requeridos para las conversiones entre masa y volumen del hormigón, con los que se cumplen las especificaciones, tanto para absorción como para cantidad de huecos en el hormigón endurecido, en calidad de porcentaje (ASTM C642-13, 2013).

La probeta de hormigón, se somete a secado en horno a una temperatura de $110 \pm 5^\circ\text{C}$, en un lapso de 48 h, hasta alcanzar una masa constante en la que se puede considerar a la muestra como seca.

Después, se sumerge en agua a 21°C durante un periodo mayor a 48 h y se obtiene el peso de la muestra saturada. Luego, se somete el espécimen de hormigón a ebullición mediante baño María, por un lapso de 5h, como se indica en la Ilustración 22 (a). Se retira del recipiente y se deja enfriar hasta alcanzar una temperatura final de 20 a 25°C , donde se registra su masa. Por último, se determina el peso del cilindro sumergido aparente, utilizando la canastilla que se muestra en la Ilustración 22 (b).



Ilustración 22. Ensayo de absorción y densidad: (a) Ebullición del hormigón a baño María, (b) Canastilla para determinación de masa sumergida.

El porcentaje de absorción y densidad, se determinan mediante las siguientes ecuaciones:

Absorción después de inmersión, %

$$Absorción_{inmersión} = \frac{B - A}{A} * 100$$

Ecuación 15

Absorción después de inmersión y ebullición, %

$$Absorción_{ebullición} = \frac{C - A}{A} * 100$$

Ecuación 16

Densidad seca global $[\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}]$

$$Densidad\ seca\ global(g1) = \frac{A}{C - D} * \rho$$

Ecuación 17



Densidad seca o global después de inmersión [$\frac{g}{cm^3}$]

$$Densidad\ seca\ global_{inmersión} = \frac{B}{C - D} * \rho$$

Ecuación 18

Densidad seca o global después de inmersión y ebullición [$\frac{g}{cm^3}$]

$$Densidad\ seca\ global_{ebullición} = \frac{C}{C - D} * \rho$$

Ecuación 19

Densidad aparente [$\frac{g}{cm^3}$]

$$Densidad\ aparente(g2) = \frac{A}{A - D} * \rho$$

Ecuación 20

Volumen de vacíos, %

$$Volumen_{vacíos} = \frac{g2 - g1}{g2} * 100$$

Ecuación 21

Donde:

A: Masa de muestra seca al horno [g]

B: Masa de muestra saturada superficialmente seca después de inmersión [g]

C: Masa de muestra saturada superficialmente seca después de inmersión y ebullición [g]

D: Masa sumergida aparente después de inmersión y ebullición [g]

ρ : Densidad del agua [$\frac{g}{cm^3}$]

2.2.5.4 Ensayo de abrasión en el hormigón

Este ensayo demuestra la durabilidad y resistencia que tendrá el hormigón, en fabricación de estructuras simples o estructuras que requieran la suficiente resistencia. Para la determinación de abrasión en hormigón, se emplea la normativa (ASTM C131/C131M – 14, 2014).

Las muestras utilizadas en esta prueba, corresponden a los cilindros probados en el ensayo de compresión simple, los cuales conservan sus características físicas y tienen la ventaja de tener una mayor superficie de contacto con las esferas metálicas.



Ilustración 23. Muestras para ensayo de abrasión

2.2.5.5 Ensayo de velocidad de pulso ultrasónico

Éste es un ensayo no destructivo, que se aplica a probetas de hormigón endurecido para tener un diagnóstico preliminar, que justifique mayores análisis de los mismos. El ensayo de velocidad de pulso, indica la presencia de vacíos y grietas en las probetas de hormigón, dando una idea clara de su calidad.

Los pulsos aplicados atraviesan la probeta, llegando de un transductor a otro, donde se convierte en energía eléctrica. Además, la velocidad se obtiene dividiendo la distancia entre transductores y el tiempo (T) que tarda en recorrer el pulso. Inicialmente, el equipo debe ser calibrado para evitar valores erróneos en su medición. Asimismo, se debe utilizar un agente de acoplamiento (gel) en los transductores, para que haya una mejor transferencia del pulso ultrasónico (ASTM C 597, 2010).

La velocidad de pulso, se relaciona con la densidad y el módulo elástico dinámico del hormigón, este último representa la rigidez del mismo ante la sollicitación de una carga impuesta. La Ecuación 22 refleja esta relación:

$$E_d = \frac{\rho * V^2 * (1 + \mu) * (1 - 2\mu)}{1 - \mu}$$

Ecuación 22

Donde:

E_d : módulo elástico dinámico [MPa]

ρ : densidad del hormigón [$\frac{kg}{m^3}$]

μ : relación de poisson

V: velocidad de pulso [$\frac{km}{s}$]

Para el ensayo se utilizaron probetas en condiciones SSS (saturada superficialmente seca), se mantienen las condiciones del ensayo inalteradas y no se aplican correcciones por temperatura, debido a que éstos se realizaron en el rango de temperaturas entre 5°C y 30 °C, donde no se

presentan cambios significativos. Cabe recalcar, que si el ensayo se realiza en condiciones distintas será necesario considerar esta variable (Gehlot et al., 2016).



Ilustración 24. Ensayo velocidad de pulso ultrasónico: (a) Calibración, (b) Medición de velocidad

La Tabla 13 detalla la condición de los hormigones, de acuerdo a su velocidad de pulso ultrasónico, donde un hormigón con una velocidad de pulso menor a $1800 \frac{m}{s}$, constituye un elemento con una considerable presencia de anomalías como: cavidades llenas de aire y una red de grietas bastante desarrollada. En cambio, un hormigón con una velocidad próxima a los $4500 \frac{m}{s}$, es un espécimen con baja porosidad y reducido porcentaje de aire incorporado (Saint-Pierre et al., 2016).

Tabla 13. Clasificación de la calidad del hormigón a través de la velocidad de onda Fuente: (Saint-Pierre et al., 2016)

Velocidad ultrasónica [$\frac{m}{s}$]	Condición del concreto
$v > 4500$	Excelente
$4500 > v > 3600$	Bueno
$3600 > v > 3000$	Cuestionable
$3000 > v > 2100$	Pobre
$v < 2100$	Muy Pobre

2.2.5.6 Ensayo para ataque de sulfatos

El ataque por sulfatos genera un agrietamiento progresivo del elemento, que inicia con la presencia de coloración blanquecina en los bordes de la muestra. Este proceso repercute en una reducción de la resistencia del hormigón, debido a la pérdida de cohesión y agrietamiento, que se originan por la presencia de componentes expansivos. Estos componentes generan un aumento de permeabilidad, que a su vez, permiten el ingreso de otros elementos aceleradores del proceso de deterioro (Irassar et al., 1988; Leon Condo et al., 2017).

Ataque físico: Ocurre cuando las estructuras de hormigón, se encuentran sometidas a ciclos de humedecimiento y secado muy intensos, esto sucede debido a la acción de la marea y los esteros en:

puentes, muelles y cualquier tipo de estructura, ubicada en una zona costera o en presencia de agua con altas concentraciones de sulfatos (Coronel & Balseca, 2011).

Ataque químico: Una vez los sulfatos penetran en el hormigón endurecido, provocan una reacción química que origina compuestos expansivos, como la etringita secundaria, que provoca su fisuración y facilita el ingreso de mayores cantidades de sulfato, pudiendo llegar a la destrucción de la estructura (Coronel & Balseca, 2011).

El método empleado para el análisis de ataque por sulfatos, fue propuesto por Irassar et al. (1988), donde se sumerge las probetas por un período de 56 días. El compuesto utilizado fue sulfato de sodio anhidro en solución acuosa, con una concentración de 4.76 gramos por cada 100 ml de agua, que coincide con la recomendada por el autor, Ilustración 25.

De acuerdo a la hoja de seguridad, el producto “Sulfato de Sodio Anhidro”, tiene un número de registro CAS 7757-82-6 y fórmula molecular Na_2SO_4 . La solubilidad en agua para condiciones normales es $185 \frac{\text{g}}{\text{l}}$.

Se empleó un recipiente de 20 litros de capacidad, donde se colocó 500 gramos de sulfato de sodio anhidro en 10.5 litros de agua destilada, llegando a un porcentaje de saturación del compuesto diluido en agua de 19.63%.



Ilustración 25. Ensayo ataque de sulfato: (a) Compuesto químico de Sulfato de Sodio Anhidro, (b) Incorporación del compuesto

Las muestras en contacto con sulfatos, corresponden a cilindros de 7 días de curado húmedo sumergido en agua. Además, se procedió a sellar el recipiente con papel film de plástico, para evitar el ingreso de impurezas y así proteger las muestras de la intemperie.

2.2.5.7 Ensayo de resistividad eléctrica

La resistividad es una propiedad que indica la oposición del material al flujo de corriente eléctrica, determinado por la Ley de Ohm en la Ecuación 23. Al describir el comportamiento del hormigón frente al paso de corriente, brinda una idea de la calidad de conducción del material. De manera

que, es un indicador de: calidad, porosidad, resistencia mecánica y grado de saturación, ya que si el hormigón se encuentra seco o no saturado, la resistividad crece (Andrade & D'Andrea, 2011).

El objetivo del ensayo es determinar la resistividad eléctrica en el hormigón saturado, para proporcionar una indicación rápida de su resistencia a la penetración de iones cloruro. Este método es adecuado para la evaluación de materiales y sus cantidades para el diseño, con fines de optimización e investigación, para lo cual fue necesario el uso del equipo apropiado, mostrado en la Ilustración 26 (AASHTO T 358, 2017).



Ilustración 26. *Ground Tester MODEL 6472*

El equipo debe ser previamente calibrado, con un intercambio de energía entre sus electrodos para evitar inconsistencias en la medición, Ilustración 27 (a).

Para encontrar la resistividad entre las caras de la muestra, se aplica una corriente mediante electrodos colocados en su parte superior e inferior. La Ilustración 27 (b), indica que la muestra debe estar en condiciones saturadas y en completo contacto con los electrodos, por lo que se emplea un gel entre éstos y las caras del cilindro. Luego, se procede a medir la resultante del intercambio de polos de carga y determinar su media, el cual será el valor característico de resistencia eléctrica.



Ilustración 27. Ensayo de resistividad eléctrica: (a) Calibración, (b) Ejecución del ensayo

Para el cálculo de resistividad eléctrica, se emplea la siguiente expresión:

$$R_e = \frac{R * A}{L}$$

Ecuación 23

Donde:

R_e : Resistividad eléctrica [$k\Omega \cdot cm$]

R: Resistencia [$k\Omega$]

A: Área de placas [cm^2]

L: Longitud del conductor [cm]

Para determinar la calidad y la durabilidad, se sigue la norma AASHTO T358 (2017), la cual relaciona la resistividad eléctrica con la penetración del ion cloruro y lo clasifica desde alta a nula, conforme su valor aumenta, Tabla 14.

Tabla 14. Penetración del ion cloruro en función de la resistividad eléctrica. Fuente: (AASHTO T358, 2017)

Penetración de Iones Cloruro	Probetas de 10 x 20 cm	Probetas de 15 x 30 cm
Alto	< 12	< 12
Moderado	12 - 21	9.5 - 16.5
Bajo	21 - 37	16.5 - 29
Muy Bajo	37 - 254	29 - 199
Despreciable	> 254	> 199

En la tabla anterior, se detallan los rangos de velocidad en la que se determina la penetración de iones cloruro en los cilindros de hormigón, estableciendo una mayor velocidad para una penetración baja, ya que la permeabilidad se reduce y conlleva a una menor cantidad de espacios vacíos en la mezcla.

2.2.6. Factibilidad del hormigón

La factibilidad en el hormigón, se determina mediante el análisis de precios unitarios, considerando los materiales empleados para la fabricación del hormigón y el costo de transporte, desde la planta de beneficio hasta la hormigonera más cercana. Este proceso tiene la finalidad de, establecer el costo total de cada una de las mezclas realizadas con incorporación de relave y realizar una comparación con el hormigón patrón.

De esta manera, se puede concluir si las mezclas con variación de las cantidades de cemento o agregados son rentables. Además, se consideran los beneficios que se pueden alcanzar a largo plazo, tratando de incorporar la solución planteada como ayuda al medio ambiente.

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1. CARACTERIZACIÓN DE AGREGADOS

A continuación, se presentan los resultados de la caracterización de los agregados, para cada uno de los ensayos realizados y calculados con las ecuaciones del capítulo anterior, donde se detalló el método a seguir.

3.1.1. Granulometría del agregado grueso

De acuerdo a la normativa NTE INEN-872 (2011), se han escogido los porcentajes correspondientes a cada abertura de tamiz para el material grueso, los cuales se presentan a continuación, Tabla 15.

Tabla 15. Granulometría asumida para material triturado

Tamiz	Abertura [mm]	% Pasa Min	% Pasa Max	% Pasa escogido
3/4"	19	90	100	100
1/2"	12.5	20	55	37.5
3/8"	9.5	0	15	7.5
4	4.75	0	5	0

En la siguiente ilustración, se detalla la representación de la granulometría asumida, la cual se encuentra dentro de los valores dados en la normativa NTE INEN-872 (2011).

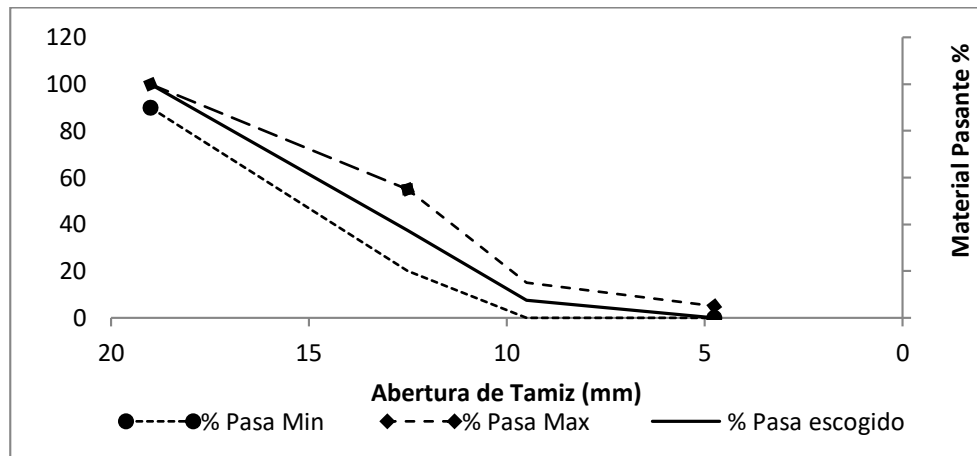


Ilustración 28. Curva Granulométrica del Agregado Grueso

3.1.2. Granulometría del agregado fino

De acuerdo a la normativa NTE INEN-872 (2011), se han escogido los porcentajes correspondientes a cada abertura de tamiz para el agregado fino, los cuales se detallan a continuación en la

Tabla 16.

Tabla 16. Granulometría asumida para agregado fino

Tamiz	Abertura [mm]	% Pasa Min	% Pasa Max	% Pasa escogido
3/8 "	9.5	100	100	100
4	4.75	95	100	100
8	2.38	80	100	90
16	1.19	50	85	67.5
30	0.595	25	60	47.5
50	0.297	10	30	20
100	0.149	2	10	6

En la siguiente ilustración, se representa la granulometría asumida, la cual está dentro de los valores dados en la normativa NTE INEN-872 (2011).

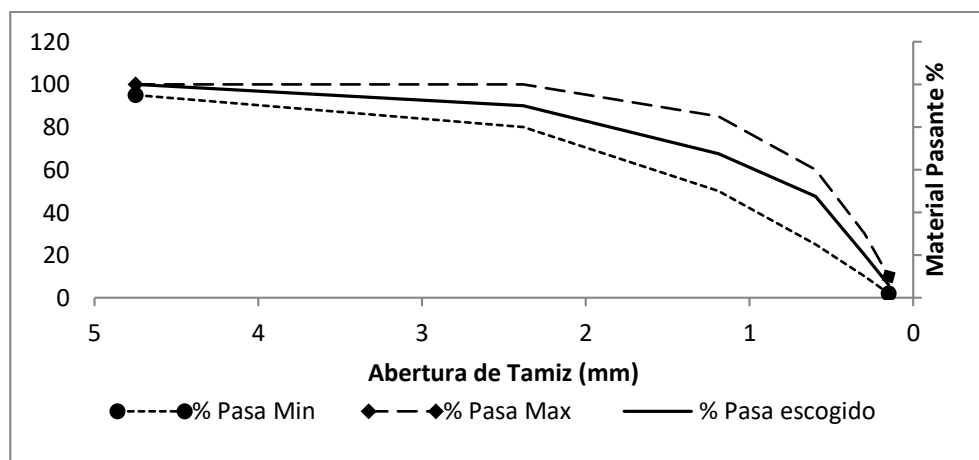


Ilustración 29. Curva Granulométrica del Agregado Fino

Se determina el módulo de finura mediante la Ecuación 1, teniendo un valor de 2.69, que se encuentra dentro del rango de valores 2.3 a 3.1, presentados en la normativa NTE INEN-872 (2011). De encontrarse este valor fuera del rango, el agregado fino debe rechazarse o realizar la corrección de la granulometría.

3.1.3. Peso volumétrico suelto y compactado

Como se detalló anteriormente, la norma a seguir fue ASTM C29 (2007), con la cual se obtuvieron los siguientes datos de calibración del molde, presentados en la Tabla 17:

Tabla 17. Calibración del molde

Datos	
Masa de agua + molde + placa vidrio (W) [g]	6371
Masa placa vidrio + molde (M) [g]	3427

Densidad del agua a la temperatura de medición (D) $\left[\frac{g}{cm^3}\right]$	1.00
Temperatura °C	17
Volumen del molde $[cm^3]$	2947.36

Seguidamente, se tienen los datos del ensayo de peso volumétrico suelto y compactado de cada uno de los agregados.

- Agregado grueso:

Tabla 18. Peso volumétrico suelto para agregado grueso

Datos	
Masa del árido suelto+ molde (Gs) [g]	7098
Masa del molde (T) [g]	2835
Volumen del molde $[cm^3]$	2947.36
Peso volumétrico suelto (Ms) $\left[\frac{g}{cm^3}\right]$	1.45

Tabla 19. Peso volumétrico compactado para agregado grueso

Datos	
Masa del árido compactado + molde (Gc) [g]	7509
Masa del molde (T) [g]	2835
Volumen del molde $[cm^3]$	2947.36
Peso volumétrico compacto (Mc) $\left[\frac{g}{cm^3}\right]$	1.59

- Agregado fino:

Tabla 20. Peso volumétrico suelto para agregado fino

Datos	
Masa del árido suelto + molde (Gs) [g]	7523
Masa del molde (T) [g]	2835
Volumen del molde $[cm^3]$	2947.36
Peso volumétrico suelto (Ms) $\left[\frac{g}{cm^3}\right]$	1.59

Tabla 21. Peso volumétrico compactado para agregado fino

Datos	
Masa del árido compactado + molde (Gc) [g]	7692
Masa del molde (T) [g]	2835
Volumen del molde $[cm^3]$	2947.36
Peso volumétrico compacto (Mc) $\left[\frac{g}{cm^3}\right]$	1.65

Posteriormente, se presenta el contenido de vacíos para cada uno de los agregados, mediante las siguientes tablas:

Tabla 22. Contenido de vacíos para agregado grueso

Datos	
Vacíos, % suelto	41.14
Vacíos, % compacto	35.46

Tabla 23. Contenido de vacío para agregado fino

Datos	
Vacíos, % suelto	38.84
Vacíos, % compacto	36.64

3.1.4. Peso específico y absorción para agregado grueso y fino

Para la determinación de los valores de peso específico y absorción, se aplicaron las normativas NTE INEN 857 (2010) para agregado grueso y NTE INEN 856 (2010) para agregado fino, dando los siguientes resultados:

- Agregado grueso:

Tabla 24. Datos iniciales para absorción en agregado grueso

Datos	
Masa de muestra secada al horno (Ms) [kg]	3.94
Masa de la muestra SSS (Mss) [kg]	4.03
Masa aparente en agua de muestra saturada (Msum) [kg]	2.43
Densidad del agua a 23°C $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$	997.62

Tabla 25. Peso específico del agregado grueso y porcentaje de absorción

Peso específico seco (SH) $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$	2456.26
Peso específico (SSS) $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$	2515.19
Peso específico aparente (SSSa) $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$	2610.46
Absorción, %	2.40

De los resultados anteriores, se determinó que el peso específico aparente o total es de $2610.46 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$, encontrándose dentro de los parámetros establecidos por la norma ASTM C127 (2015), que son $2560 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ y $2720 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$. De igual forma, la absorción es de 2.40% y se encuentran dentro del rango fijado de 0.4% a 2.5%.

- Agregado fino:

Tabla 26. Datos iniciales para absorción en agregado fino

Datos	
Masa de muestra secada al horno (M_s) [kg]	0.49
Masa matraz + agua (M_a) [kg]	0.67
Masa de la muestra SSS (M_{ss}) [kg]	0.50
Masa picnómetro + agua + muestra (M_m) [kg]	0.98
Densidad del agua a 23°C [$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$]	997.62

Tabla 27. Peso específico del agregado fino y porcentaje de absorción

Peso específico seco (SH) [$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$]	2599.72
Peso específico (SSS) [$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$]	2657.11
Peso específico aparente (SSSa) [$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$]	2758.41
Absorción, %	2.21

Para áridos normales, la densidad real varía entre $2.550 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ y $2.750 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$, según Jeria et al., (2017). Por lo que el resultado obtenido de $2758.41 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$, se aproxima al límite superior recomendado. De igual manera, esta normativa establece un valor máximo de absorción de 3%, por lo que la absorción obtenida de 2.21% se encuentra dentro de la recomendación.

3.1.5. Abrasión en agregado grueso

De acuerdo a la sección 2.2.1.5, el material corresponde a un grado B, para el cual se utilizaron 11 esferas. De esta manera, se obtuvieron los resultados presentados en la Tabla 28.

Tabla 28. Resultados del ensayo de abrasión

Datos	
3/4" - 1/2" [g]	2500
1/2" - 3/8" [g]	2501
Masa inicial (m_i) [g]	5001
Masa final (m_f) [g]	3979.7
Pérdida de masa, %	20.42

De este ensayo se determina que, el material es apto para el diseño de mezclas de hormigón, debido a una pérdida de masa menor al 50% según la norma NTE INEN 860 (2011). Finalmente, se

presenta una tabla resumen con los resultados obtenidos en los ensayos sobre los distintos agregados.

Tabla 29. Resumen de Ensayos en Agregados

Propiedad		Datos Obtenidos		Datos Holcim	
		Agregado Grueso	Agregado Fino	Agregado Grueso	Agregado Fino
Peso volumétrico [g/cm ³]	Suelto	1.45	1.59	1.49	1.43
	Compactado	1.59	1.65	1.57	1.58
Contenido Vacíos %	Suelto	41.14	38.84	39.31	45.02
	Compactado	35.46	36.64	36.05	39.25
Peso específico [g/cm ³]	Peso específico (SSS)	2.52	2.66	2.55	2.48
	Peso específico seco (SH)	2.46	2.6	2.46	2.36
	Peso específico aparente (SSSa)	2.61	2.76	2.71	2.68
Absorción %		2.4	2.21	3.71	5.15
Abrasión %		20.42		20.5	

Los ensayos realizados dieron valores próximos a los proporcionados en las fichas técnicas de la empresa Holcim S.A., por lo cual, se puede concluir que la caracterización de los agregados es correcta. Las fichas técnicas utilizadas se encuentran en la sección de Anexos.

3.2. CARACTERIZACIÓN DE RELAVE MINERO

3.2.1. Contenido de humedad

Según la Ecuación 13, se obtiene el contenido de humedad del relave minero, presentado en la Tabla 30.

Tabla 30. Resultados del ensayo de humedad

Tara	Wh [g]	Ws [g]	% Humedad
66	75.21	62.88	19.61
2	77.16	64.31	19.98
171	83.33	69.20	20.42
Promedio			20.00

La humedad obtenida, corresponde al material en condiciones normales dentro del depósito de la planta de beneficio “Matamoros”.

3.2.2. Granulometría de relave

A continuación, se presenta la Tabla 31 con la granulometría para el relave minero, así como su gráfica para una mejor representación de los resultados.

Tabla 31. Granulometría obtenida del relave minero

Diámetro de partícula [mm]	% Pasa
0.297	100
0.149	47.25
0.074	27.89
0.0686	27.43
0.0498	25.94
0.0361	24.36
0.0260	23.34
0.0177	21.85
0.0096	18.97
0.0068	18.32
0.0050	16.09
0.0035	14.78
0.0023	12.92
0.0020	12.65
0.0019	12.37
0.0018	11.90
0.0011	11.44
0.0008	10.51
0.0005	8.83

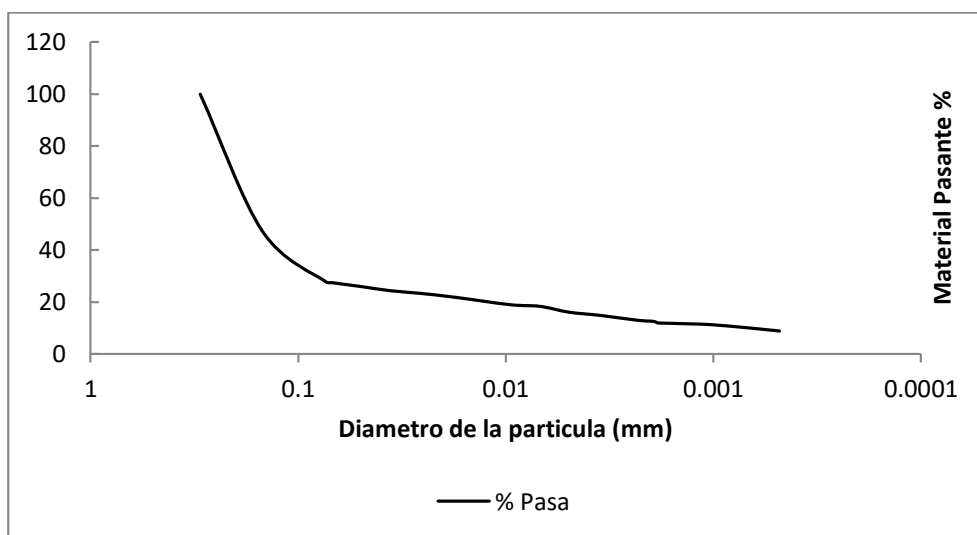


Ilustración 30. Curva Granulométrica del Relave Minero

Ya que el relave se incorpora al agregado fino en las mezclas de hormigón, se realizó una ligadura entre la granulometría de arena y relave minero, dando una curva granulométrica que se encuentra dentro de los límites permisibles, Ilustración 31.

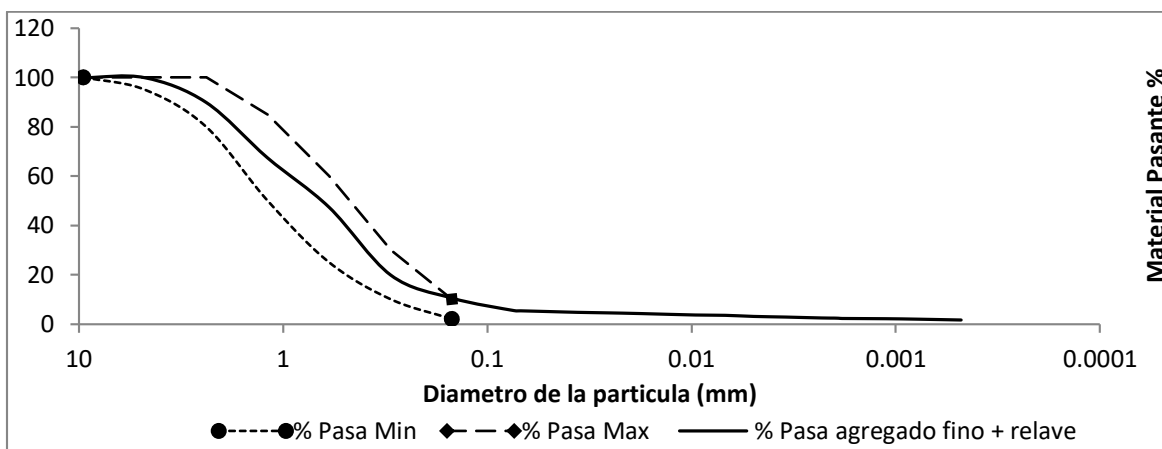


Ilustración 31. Curva granulométrica de relave y arena

3.2.3. Límites de Atterberg



3.2.3.1.1. Límite Líquido

El número de golpes y humedad en el suelo, fueron determinados siguiendo el procedimiento descrito en la norma INEN 691 (2005), cuyos resultados se presentan en la Tabla 32.

Tabla 32. Resultados del ensayo para límite líquido

Tara	# golpes	Peso húmedo [g]	Peso seco [g]	% Humedad
70	29	35.12	29.65	16.85
103	27	20.67	17.69	18.15
34	24	12.56	10.63	18.44
136	14	26.57	22	20.77

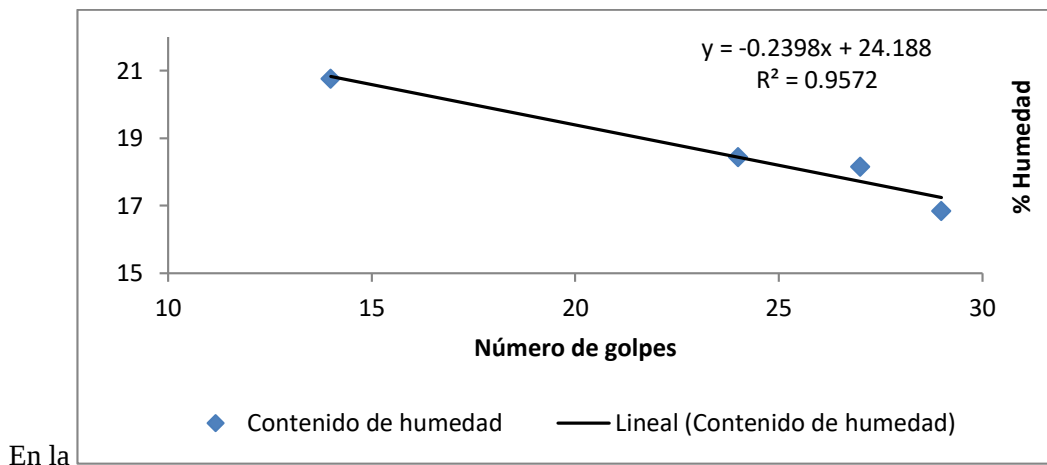


Ilustración 32, se detalla la curva con la cual, se determinó el límite líquido de la muestra a los 25 golpes.

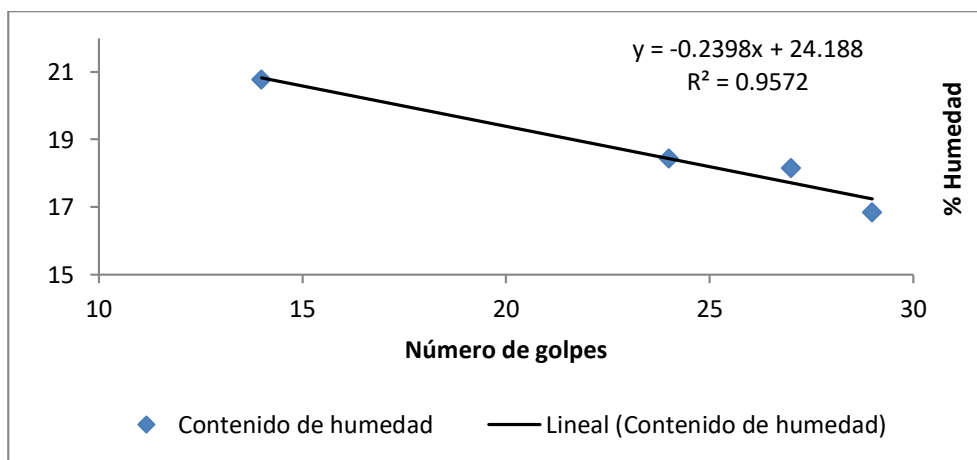


Ilustración 32. Curva Límite Líquido

Por medio de la tendencia lineal, se determina el límite líquido del suelo con un valor de humedad de 18.19 % a los 25 golpes.

3.2.3.1.2. Límite Plástico

Para el límite plástico se siguió el procedimiento descrito en la norma INEN 692 (2005), en base a la cual no se pudo completar el enrollado de los cilindros hasta tener una longitud determinada, ya que se rompieron en varios pedazos, Ilustración 33. De esta manera, se clasifican al material como No Plástico (NP).



Ilustración 33. Ensayo del Límite Plástico

3.2.3.1.3. Límite de Contracción

Se procedió a elaborar tres muestras de suelo en capsulas metálicas, las cuales se ensayaron siguiendo el procedimiento descrito en Bowles (1981), mismo que concuerda con la norma ASTM D 427 (2004). Se obtuvieron los resultados expresados en la Tabla 33.

Tabla 33. Resultados del ensayo de límite de contracción.

Muestra	Cápsula [g]	Peso Suelo Seco [g]	Volumen Inicial Hg [cm ³]	Volumen Final Hg [cm ³]	Volumen Suelo húmedo [cm ³]	Volumen Suelo Seco [cm ³]	% Humedad	% Límite de Contracción
#8	15.55	28.06	31.73	16.78	16.34	14.95	18.85	13.91
OK	18.55	25.88	32.98	18.12	16.34	14.86	18.43	12.71
Promedio								13.31

En la tabla anterior, se muestran los resultados de dos cápsulas, debido a que la tercera muestra se desintegró al extraerla en estado seco, por lo cual fue descartada.

3.2.4. Densidad de relave

Siguiendo el procedimiento gravimétrico, correspondiente a ASTM D 854 (2006), equivalente a la norma AASHTO T100 (2015), se determinó un valor de densidad igual a $2.93 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$.

3.3. ANÁLISIS DE MORTEROS

Como se detalló anteriormente en la sección 2.2.3, para la elaboración de morteros con sustitución de relave, se utilizó como base un mortero patrón obtenido mediante la variación, tanto de la relación a/c como de la incorporación de aditivos (Sika ViscoCrete 4100 y 20 HE). De esta manera,

se obtuvo una mezcla con una relación a/c de 0.31 e incorporación de 2% de ViscoCrete 4100; este aditivo cumple con buenas características de: trabajabilidad, fluidez y resistencia.

3.3.1.1.1. Mortero Patrón

El mortero patrón se determina por medio de una selección experimental de mezclas, diseñadas con múltiples relaciones a/c e incorporación de aditivos químicos: ViscoCrete 4100 y 20 HE. A partir de estas mezclas, se seleccionó aquella con mejor trabajabilidad (fluidez) y baja segregación, propiedades que ayudan, tanto a la correcta realización del encofrado como a mantener la homogeneidad de la mezcla en los cubos de mortero. Los datos de cada una de las muestras experimentadas, se presentan a continuación en la Tabla 34:

Tabla 34. Mezclas de mortero para selección de muestra patrón

Muestra	Materiales [g]						% Fluidez
	Cemento	Arena	a/c	Agua	Aditivo	% Peso de Cemento	
MP1	500	1000	0.3	150	20 HE	2	115
MP2	500	1000	0.3	150	20 HE	2	115
MP3	500	1000	0.3	150	4100	0.9	50
MP4	500	1000	0.35	175	4100	0.9	150
MP5	500	1000	0.33	165	4100	0.9	150
MP6	500	1000	0.31	155	4100	2	130
MP7	500	1000	0.29	145	20 HE	2	95
MP8	500	1000	0.32	160	4100	0.9	150
MP9	500	1000	0.31	155	4100	0.9	125

Como se puede observar en la tabla anterior, la mezcla escogida como patrón fue la MP6, la cual tiene una relación a/c de 0.31 y una fluidez de 130%. A partir de esta mezcla, se realizó el ensayo de resistencia a compresión mediante 6 muestras, que fueron ensayadas a los 7 y 28 días respectivamente y cuyos resultados se presentan a continuación:

Tabla 35. Resistencia a compresión en mortero patrón

Muestra	Materiales [g]	Densidad [g/cm ³]	% Fluidez	Resistencia a Compresión [MPa]
---------	----------------	-------------------------------	-----------	--------------------------------

	Cemento	Arena	a/c	Agua	Aditivo			7 días	28 días
P1	500	1000	0.31	155	10	2.23	130	76.97	87.34
P2	500	1000	0.31	155	10	2.18	130	73.43	84.48
P3	500	1000	0.31	155	10	2.20	130	75.33	86.87

De los datos anteriores, se puede concluir que la resistencia del mortero patrón alcanzada a los 7 días es de 75.24 MPa y a los 28 días es de 86.23 MPa.

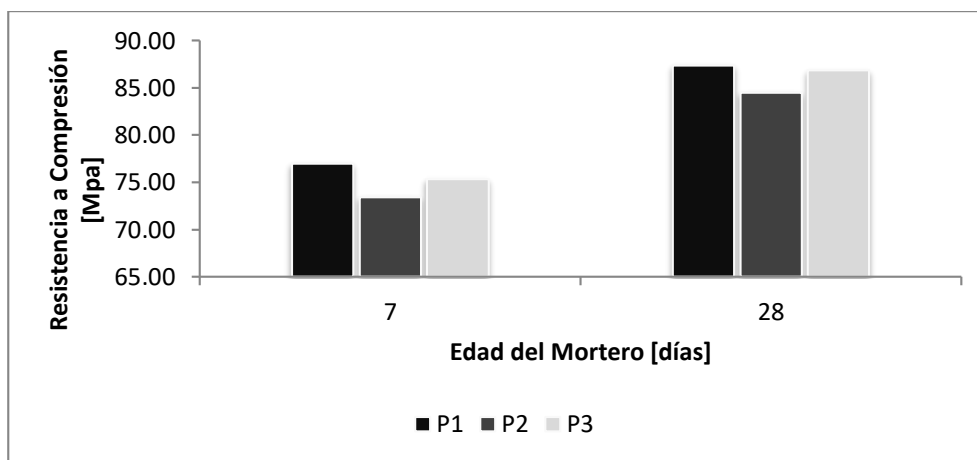


Ilustración 34. Resistencia a compresión en mortero patrón

3.3.1.1.2. Mortero con sustitución o adición de relave

A partir del mortero patrón, se procedió a realizar mezclas con sustitución de relave minero entre 5% y 20 %, en el agregado fino y en el cemento.

• MORTERO CON ADICIÓN DE RELAVE POR PORCENTAJE DE ARENA

Se realizó un mortero, determinando los porcentajes antes mencionados del peso de arena y adicionándolo en peso de relave, presentados en la Tabla 36.

Tabla 36. Resistencia a compresión en mortero con adición de relave por porcentaje de arena

Muestra	% Adición	Materiales [g]					Densidad [g/cm ³]	% Fluidez	Resistencia a Compresión [MPa]	
		Cemento	Arena	Agua	Aditivo	Relave			7	28
100.1	5	500	1000	155	10	50	2.27	100	70.83	85.23
100.2	5	500	1000	155	10	50	2.30	100	72.49	81.23
100.3	5	500	1000	155	10	50	2.28	100	63.99	84.01
101.1	10	500	1000	155	10	100	2.40	115	72.49	88.53

101.2	10	500	1000	155	10	100	2.40	70	66.68	81.52
101.3	10	500	1000	155	10	100	2.31	65	69.10	81.23
102.1	15	500	1000	155	10	150	2.30	10	66.27	75.85
102.2	15	500	1000	155	10	150	2.30	10	64.88	71.04
102.3	15	500	1000	155	10	150	2.29	10	68.08	78.52
103.1	20	500	1000	155	10	200	2.25	0	39.91	69.30
103.2	20	500	1000	155	10	200	2.25	0	40.16	65.38
103.3	20	500	1000	155	10	200	2.24	0	43.24	66.31

Los datos anteriores, se grafican en la Ilustración 35 e Ilustración 36, donde se detallan las resistencias a compresión alcanzadas de acuerdo a cada porcentaje de sustitución, a los 7 y 28 días respectivamente.

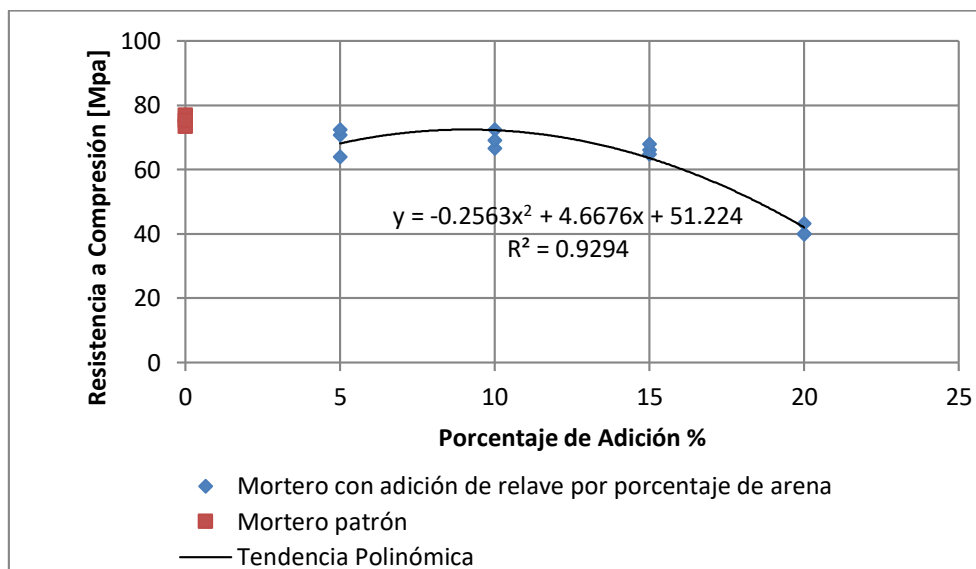


Ilustración 35. Resistencia a compresión en mortero con adición de relave por porcentaje de arena a los 7 días

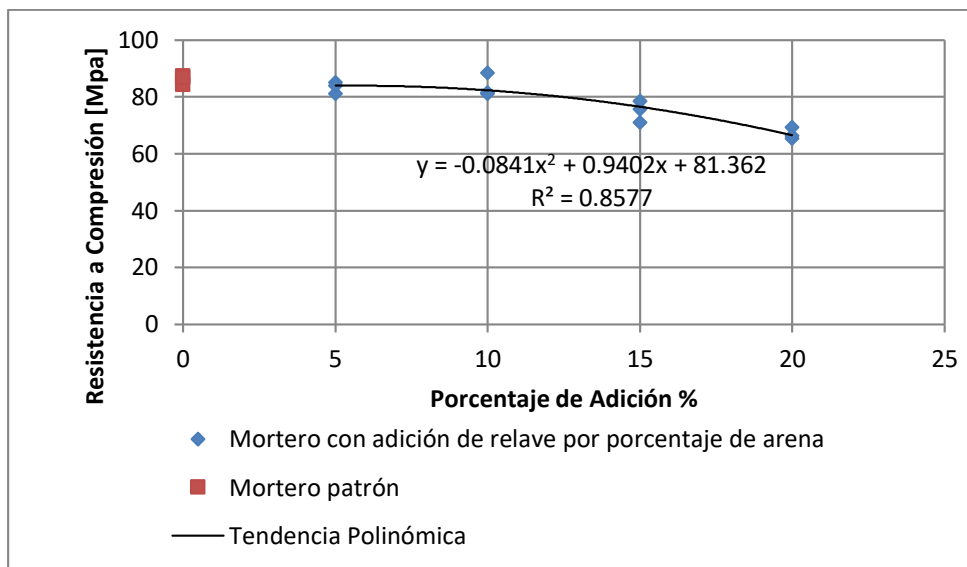


Ilustración 36. Resistencia a compresión en mortero con adición de relave por porcentaje de arena a los 28 días

• MORTERO CON SUSTITUCIÓN DE ARENA POR RELAVE

De la misma manera, se realizó un mortero determinando los porcentajes del peso de arena y sustituyéndolo en peso de relave, obteniéndose los resultados presentados en la Tabla 37.

Tabla 37. Resistencia a compresión de mortero con sustitución de arena por relave

Muestra	% Sustitución	Materiales [g]					Densidad [g/cm ³]	% Fluidez	Resistencia a Compresión [MPa]	
		Cemento	Arena	Agua	Aditivo	Relave			7	28
104.1	5	500	950	155	10	50	2.29	115	65.24	88.36
104.2	5	500	950	155	10	50	2.31	115	65.18	83.85
104.3	5	500	950	155	10	50	2.31	115	64.92	81.90
105.1	10	500	900	155	10	100	2.34	100	65.17	91.61
105.2	10	500	900	155	10	100	2.25	135	68.89	91.44
105.3	10	500	900	155	10	100	2.36	100	68.92	91.14
106.1	15	500	850	155	10	150	2.38	90	66.40	86.97

106.2	15	500	850	155	10	150	2.36	90	68.71	82.42
106.3	15	500	850	155	10	150	2.28	120	67.51	90.85
107.1	20	500	800	155	10	200	2.39	40	62.25	60.15
107.2	20	500	800	155	10	200	2.37	40	63.04	72.54
107.3	20	500	800	155	10	200	2.40	40	48.99	62.87

Los datos anteriores, se grafican en la Ilustración 37 e Ilustración 38, donde se detallan las resistencias a compresión, alcanzadas de acuerdo a cada porcentaje de sustitución a los 7 y 28 días.

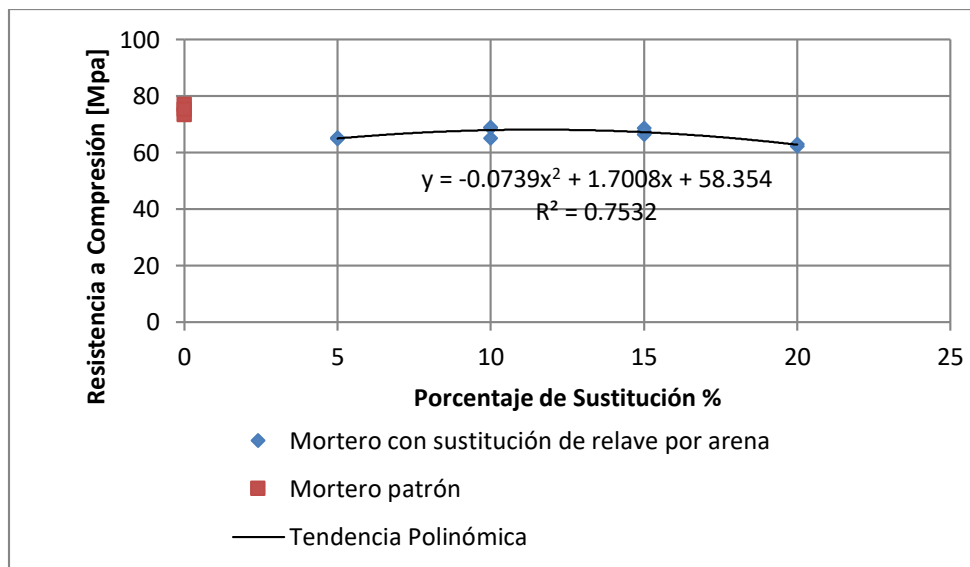


Ilustración 37. Resistencia a compresión de mortero con sustitución de arena por relave a los 7 días

En la Ilustración 37 no se tomó en cuenta el valor de resistencia de la muestra 107.3, debido a que presentó una rotura temprana en una sola cara del cubo, por lo cual el valor obtenido no es representativo, en comparación con las otras dos muestras con el mismo porcentaje de sustitución.

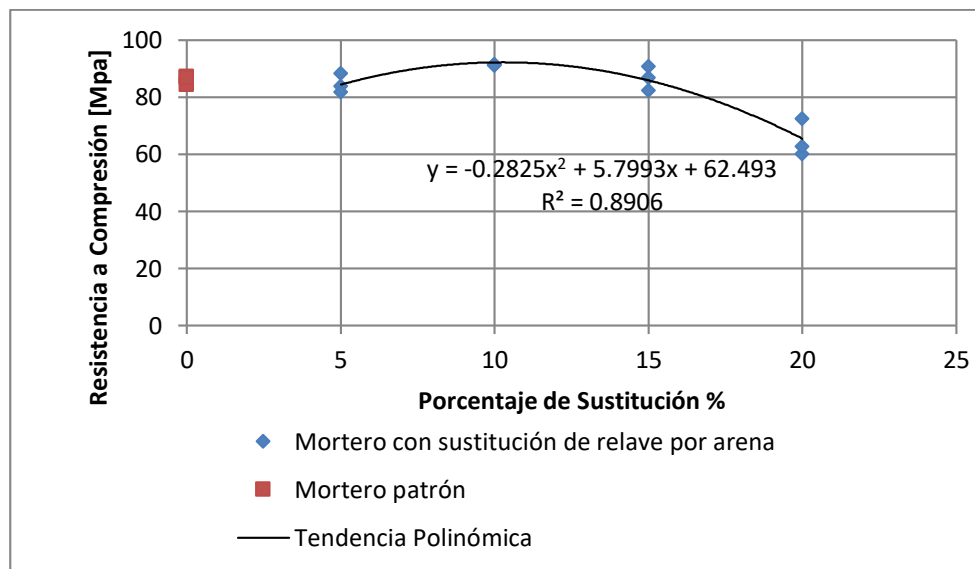


Ilustración 38. Resistencia a compresión de mortero con sustitución de arena por relave a los 28 días

El comportamiento evidenciado a partir de los resultados del ensayo a compresión, en morteros con reemplazo del 5% y 10 % de relave por arena, presentan un incremento de resistencia, tanto a los 7 como a los 28 días, ya que el relave dispone material fino suficiente para rellenar espacios vacíos que deja el árido, mejorando sustancialmente la calidad del hormigón. Por el contrario, a partir del 15% de modificación del agregado, la resistencia disminuye al disponer una cantidad excesiva de material fino en la fabricación de la mezcla.

El aumento de resistencia puede estar relacionado a que el relave disminuye: la profundidad de penetración del agua, porosidad y profundidad de carbonatación a corto y largo plazo. Además, la presencia de carbonatos en el relave podría generar un buen rendimiento, debido a su naturaleza puzolánica, permitiendo el aumento de resistencias. Sin embargo, esto no ha sido comprobado en este trabajo experimental, debido a que se requiere un estudio específico del comportamiento químico del relave, utilizado en la fabricación del hormigón.

- MORTERO CON ADICIÓN DE RELAVE POR PORCENTAJE DE CEMENTO

Se realizó un mortero, determinando los porcentajes del peso de cemento y adicionándolo en peso de relave. De los ensayos a compresión a los 7 días, se evidenciaron valores incoherentes en las muestras con porcentajes de adición de 15% y 20%, las cuales están denominadas como 110 (110.1, 110.2 y 110.3) y 111 (111.1, 111.2 y 111.3) respectivamente.

En la mezcla 110, el error se produjo en una descalibración del equipo a compresión. Por otra parte, el error en la mezcla 111, se dio en el resultado de fluidez como se evidencia en la Tabla 38. Como se observa para otras muestras, a medida que el porcentaje de adición aumenta, la fluidez disminuye; pero en el caso de la mezcla 111, la fluidez aumenta precipitadamente llegando a 77.5%, lo cual afecta a la resistencia del mortero.

Debido a estos valores erróneos, se realizaron morteros con adición del 25% y 30% de relave, para verificar la tendencia de disminución de la resistencia a medida que aumenta el porcentaje de sustitución. Además, se repitieron las mezclas con 15% y 20% de adición, a partir de los cuales se pudieron corregir y verificar los valores obtenidos, obteniéndose los resultados presentados en la Tabla 38.

Tabla 38. Resistencia a compresión en mortero con adición de relave por porcentaje de cemento

Muestra	% Adición	Materiales [g]					Densidad [g/cm ³]	% Fluidez	Resistencia a Compresión [MPa]	
		Cemento	Arena	Agua	Aditivo	Relave			7	28
108.1	5	500	1000	155	10	25	2.37	85	53.35	80.92
108.2	5	500	1000	155	10	25	2.37	85	54.73	78.21
108.3	5	500	1000	155	10	25	2.36	85	52.19	81.54
109.1	10	500	1000	155	10	50	2.34	95	47.56	66.96
109.2	10	500	1000	155	10	50	2.34	95	52.10	79.31



109.3	10	500	1000	155	10	50	2.33	95	51.66	81.10
110.1	15	500	1000	155	10	75	2.42	62.5	32.38	76.75
110.2	15	500	1000	155	10	75	2.39	62.5	47.70	66.23
110.3	15	500	1000	155	10	75	2.39	62.5	37.23	76.05
315.1	15	500	1000	155	10	75	2.41	55	52.51	74.94
315.2	15	500	1000	155	10	75	2.28	55	50.97	75.85
315.3	15	500	1000	155	10	75	2.35	55	57.04	70.36
111.1	20	500	1000	155	10	100	2.40	77.5	66.84	62.60
111.2	20	500	1000	155	10	100	2.40	77.5	70.71	66.74
111.3	20	500	1000	155	10	100	2.41	77.5	66.47	67.31
320.1	20	500	1000	155	10	100	2.39	45	49.99	63.54
320.2	20	500	1000	155	10	100	2.39	45	48.14	60.57
320.3	20	500	1000	155	10	100	2.35	45	49.89	64.22
201.1	25	500	1000	155	10	125	2.25	20	50.52	43.59
201.2	25	500	1000	155	10	125	2.24	20	48.12	43.13
201.3	25	500	1000	155	10	125	2.23	20	46.40	42.46
200.1	30	500	1000	155	10	150	2.26	25	41.85	47.01
200.2	30	500	1000	155	10	150	2.19	25	36.73	44.74
200.3	30	500	1000	155	10	150	2.22	25	38.31	42.65

Los datos anteriores se grafican en la Ilustración 39 e Ilustración 40, donde se detallan las resistencias a compresión alcanzadas de acuerdo a cada porcentaje de adición a los 7 y 28 días.

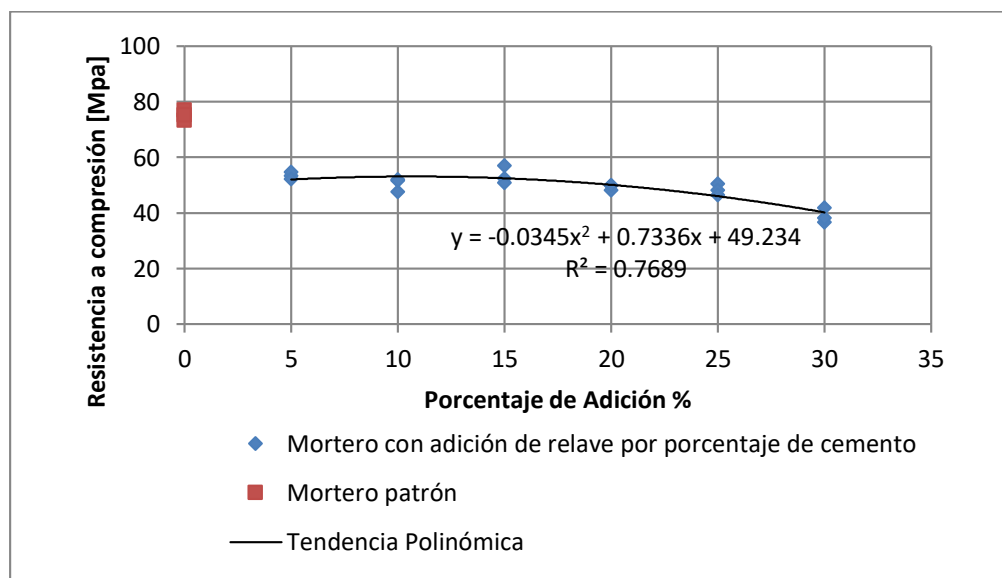


Ilustración 39. Resistencia a compresión en mortero con adición de relave por porcentaje de cemento a los 7 días

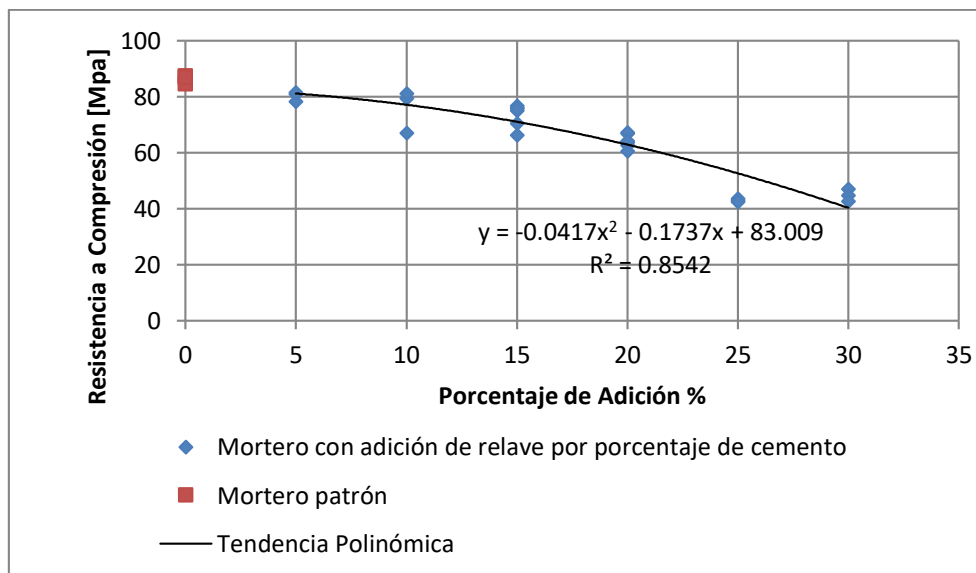


Ilustración 40. Resistencia a compresión en mortero con adición de relave por porcentaje de cemento a los 28 días

• MORTERO CON SUSTITUCIÓN DE CEMENTO POR RELAVE

De la misma manera, se realizó un mortero determinando los porcentajes del peso de cemento y sustituyéndolo en peso de relave, obteniéndose los resultados presentados en la Tabla 39.

Tabla 39. Resistencia a compresión en morteros con sustitución de cemento por relave

Muestra	% Sustitución	Materiales [g]					Densidad [$\frac{g}{cm^3}$]	% Fluidez	Resistencia a Compresión [MPa]	
		Cemento	Arena	Agua	Aditivo	Relave			7	28
112.1	5	475	1000	155	10	25	2.20	120	58.68	71.05
112.2	5	475	1000	155	10	25	2.31	120	58.92	54.09
112.3	5	475	1000	155	10	25	2.31	120	58.04	65.35
113.1	10	450	1000	155	10	50	2.34	113	50.55	74.27
113.2	10	450	1000	155	10	50	2.31	113	55.27	74.76
113.3	10	450	1000	155	10	50	2.33	113	57.07	63.86
114.1	15	425	1000	155	10	75	2.19	115	47.73	61.19
114.2	15	425	1000	155	10	75	2.20	115	47.02	54.69

114.3	15	425	1000	155	10	75	2.17	115	49.45	53.83
115.1	20	400	1000	155	10	100	2.15	120	43.36	45.53
115.2	20	400	1000	155	10	100	2.13	120	40.01	55.57
115.3	20	400	1000	155	10	100	2.12	120	39.51	55.19

Los datos anteriores se grafican en la Ilustración 41 e Ilustración 42, donde se detallan las resistencias a compresión alcanzadas de acuerdo a cada porcentaje de sustitución a los 7 y 28 días.

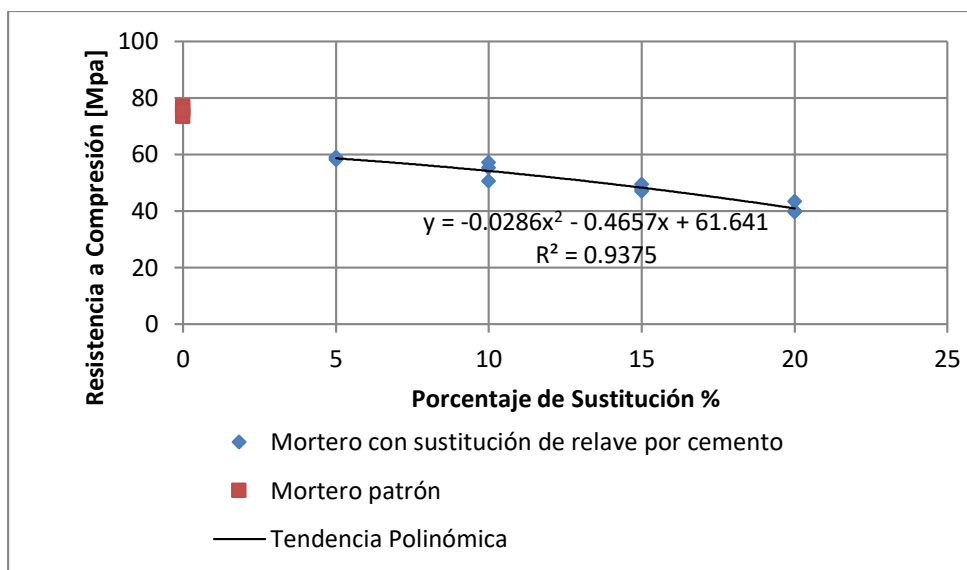


Ilustración 41. Resistencia a compresión en mortero con sustitución de cemento por relave a los 7 días

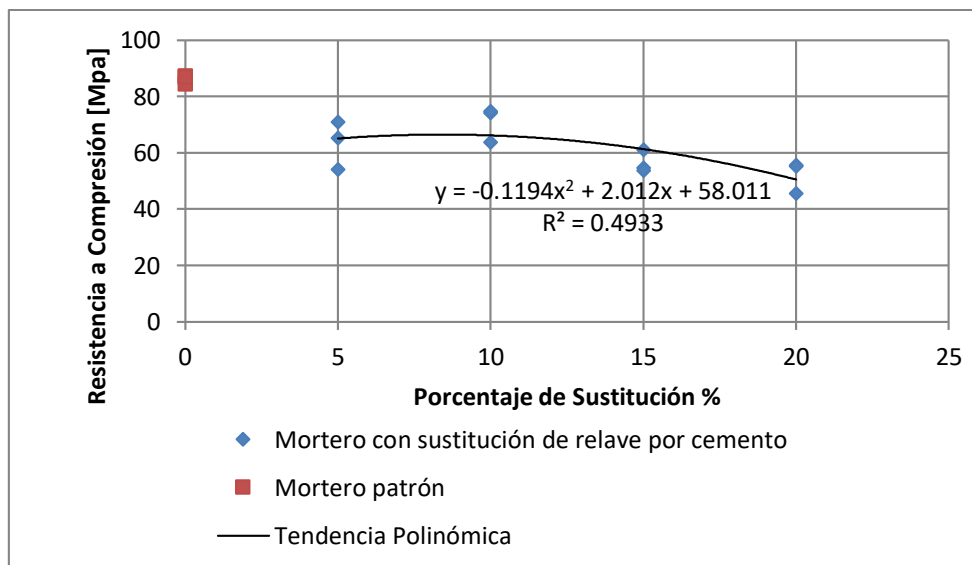


Ilustración 42. Resistencia a compresión en mortero con sustitución de cemento por relave a los 28 días

Los resultados en los ensayos a compresión, en la modificación de la cantidad de cemento por relave, evidencian que las resistencias disminuyen secuencialmente y solo cuando se tiene un

reemplazo de 5%, las resistencias son mayores que los otros porcentajes de sustitución. Cabe recalcar, en porcentajes superiores al 5%, las resistencias disminuyen, debido a que la granulometría del relave es más gruesa que la del cemento, dejando mayor cantidad de espacios vacíos y disminuyendo la compacidad del hormigón.

El incremento de la resistencia puede estar influenciado por el relleno de espacios vacíos por parte del relave, comportándose como un suplemento cementante para reemplazo parcial del cemento. Asimismo, sus características calcáreas pueden intervenir, tanto en el comportamiento hidráulico como en sus propiedades puzolánicas, las cuales no se han comprobado en el presente trabajo debido a que se requiere un estudio de caracterización físico-químico y mineralógico complementario, para determinar el comportamiento del relave.

3.4. ANÁLISIS DE PROPIEDADES FISICO-MECÁNICAS EN HORMIGÓN

De acuerdo a las tablas anteriores, el porcentaje de sustitución o adición que alcanzó mayor resistencia a compresión en los morteros fue de 10%, por lo que éste fue escogido como el porcentaje con el que se realizaron los hormigones.

3.4.1. Trabajabilidad

Se siguió el procedimiento de la norma ASTM C143 / C143M (2020), para determinar la trabajabilidad en cada una de las mezclas con el porcentaje de sustitución y/o adición de 10%, y cuyos resultados se presentan en la Tabla 40.

Tabla 40. Consistencia de la mezcla de acuerdo a los asentamientos

Probeta	Asentamiento [mm]	Consistencia
Hormigón patrón	180	Líquida
Arena con adición	190	Líquida
Arena con sustitución	127	Líquida
Cemento con adición	240	Líquida
Cemento con sustitución	260	Líquida

Como se puede observar en la tabla anterior, las mezclas presentan una consistencia “LÍQUIDA”, las cuales se pueden denominar como hormigones autocompactantes.

3.4.2. Resistencia a compresión

La resistencia a compresión en las probetas de hormigón, se obtiene del cociente entre la fuerza aplicada por el equipo de compresión y el área transversal de un cilindro, cuyo diámetro es de 10 cm, obteniendo un área de 78.54 cm según la norma ASTM C39 / C38M (2017). A continuación,

en la Tabla 41 e Ilustración 43, se presentan los resultados de la resistencia a compresión de hormigones a los 7 y 28 días.

Tabla 41. Resistencia a compresión en hormigones

Probeta	% Sustitución / Adición	Fuerza [kN]		Resistencia a Compresión [MPa]		Promedio	
		7 días	28 días	7 días	28 días	7 días	28 días
Hormigón patrón 01	0	267	279	34.00	35.52		
Hormigón patrón 02	0	263	283	33.49	36.03	33.76	35.95
Hormigón patrón 03	0	265.5	285	33.80	36.29		
Arena con adición 01	10	311	335	39.60	42.65		
Arena con adición 02	10	302	343	38.45	43.67	39.68	42.61
Arena con adición 03	10	322	326	41.00	41.51		
Arena con sustitución 01	10	314	348	39.98	44.31		
Arena con sustitución 02	10	342	355	43.54	45.20	42.23	44.78
Arena con sustitución 03	10	339	352	43.16	44.82		
Cemento con adición 01	10	239	214	30.43	27.25		
Cemento con adición 02	10	220	225	28.01	28.65	27.80	28.39
Cemento con adición 03	10	196	230	24.96	29.28		
Cemento con sustitución 01	10	200	197.9	25.46	25.20		
Cemento con sustitución 02	10	191.4	193.8	24.37	24.68	24.83	24.72
Cemento con sustitución 03	10	193.6	190.7	24.65	24.28		

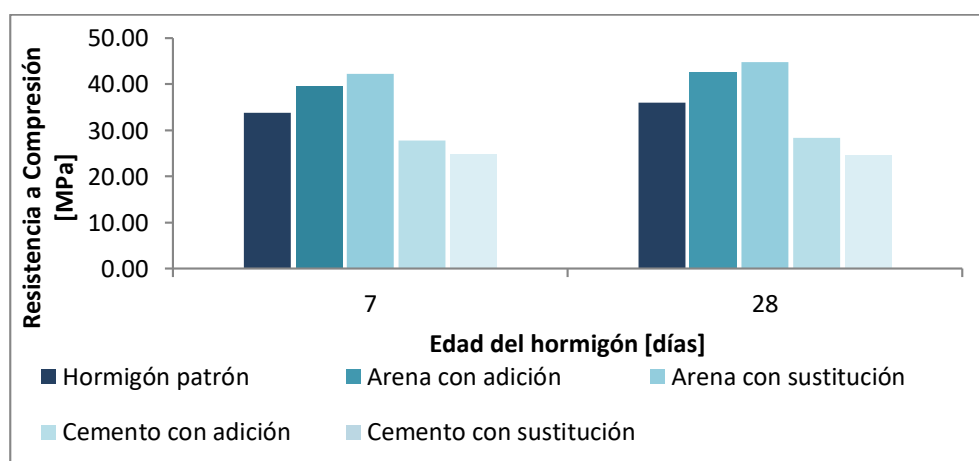


Ilustración 43. Resultados del ensayo de compresión a los 7 y 28 días

Se tienen los resultados únicamente de los 7 y 28 días, debido a la poca accesibilidad al laboratorio a causa de la pandemia.

En los resultados obtenidos anteriormente, se puede apreciar que la resistencia aumenta con el paso del tiempo para las probetas con adición y sustitución de relave por arena. Por otra parte, en las probetas con adición y sustitución de cemento, la resistencia tiende a mantenerse.

El aumento no tan significativo en la resistencia, puede deberse al tipo de cemento (HE) utilizado, ya que este desarrolla su resistencia a edades tempranas.

Finalmente, las mezclas que presentan mejor comportamiento a la compresión son aquellas en las que se modifica la cantidad de arena, presentando resistencias mayores a la dosificación patrón; no siendo así, para las mezclas con variación de la cantidad de cemento, donde las resistencias se ven afectadas.

3.4.3. Absorción y densidad

Siguiendo el procedimiento para determinar el peso del cilindro de hormigón en estado: seco, saturado superficialmente seco y sumergido, descrito con mayor detalle en la sección 2.2.5.3 y mediante las ecuaciones de la misma, se determina: la densidad, absorción del agua y los vacíos en el hormigón endurecido, los cuales se presentan en la Tabla 42.

Tabla 42. Resultados del ensayo de absorción y densidad

Muestra	% Absorción _{imm}	% Absorción _{eb}	Densidad seca _{imm}		Densidad seca _{eb}		% Volumen vacíos
			g1 [$\frac{g}{cm^3}$]	[$\frac{g}{cm^3}$]	[$\frac{g}{cm^3}$]	g2 [$\frac{g}{cm^3}$]	
Hormigón patrón	8.037	6.241	2.066	2.232	2.195	2.373	12.920
Arena con adición	7.998	6.557	2.063	2.228	2.198	2.387	13.554
Arena con sustitución	8.393	6.250	2.083	2.257	2.213	2.395	13.042
Cemento con adición	8.642	5.920	1.926	2.092	2.040	2.174	11.421
Cemento con sustitución	9.734	6.295	1.882	2.065	2.000	2.135	11.867

3.4.4. Abrasión

En la Tabla 43, se presentan los resultados de la prueba de desgaste por abrasión, en la que cada valor mostrado corresponde a tres probetas ensayadas.

Tabla 43. Resultados del ensayo de abrasión

Probeta	7 días			28 días		
	Peso húmedo	Peso seco	%Abrasión	Peso húmedo	Peso seco	%Abrasión
Hormigón patrón	9.85	8.22	23.45	6.68	5.69	24.68
Arena con adición	9.58	7.54	27.91	10.06	7.90	28.18
Arena con sustitución	10.26	7.60	32.00	6.65	5.12	31.64
Cemento con adición	9.37	6.89	33.73	9.21	6.73	33.71
Cemento con sustitución	9.18	6.67	36.45	9.16	6.80	36.07

El efecto de abrasión es mayor en las mezclas en las que varía la cantidad de cemento, sobre todo cuando se sustituye por relave, dando un porcentaje de abrasión de 37% aproximadamente; mientras que, en las mezclas donde se adiciona y sustituye la arena, no se tiene una variación significativa en el porcentaje de abrasión en comparación con el hormigón patrón.



Ilustración 44. Hormigones luego del ensayo de abrasión en condición seca

3.4.5. Velocidad de pulso ultrasónico

Siguiendo la normativa ASTM C 597-09 (2010), para la realización del ensayo y mediante la Tabla 13, se pudo determinar la condición del hormigón, en base a la velocidad de pulso obtenida por medio del ultrasonido.

Tabla 44. Resultado del ensayo de velocidad de pulso a los 7 días

Probeta	Días	Tiempo [μs]	Velocidad $\left[\frac{m}{s}\right]$	Distancia [cm]	Condición del hormigón
Hormigón patrón 01	7	50.3	3980	20	Bueno
Hormigón patrón 02	7	49.4	4050	20	Bueno
Hormigón patrón 03	7	50	4000	20	Bueno
Arena con adición 01	7	50.8	3940	20	Bueno
Arena con adición 02	7	50.2	3980	20	Bueno
Arena con adición 03	7	52.4	3820	20	Bueno
Arena con sustitución 01	7	48.9	4160	20	Bueno
Arena con sustitución 02	7	49.3	4060	20	Bueno
Arena con sustitución 03	7	48.3	4140	20	Bueno
Cemento con adición 01	7	51.8	3860	20	Bueno
Cemento con adición 02	7	51.5	3880	20	Bueno
Cemento con adición 03	7	50.4	3970	20	Bueno
Cemento con sustitución 01	7	52.4	3820	20	Bueno

Cemento con sustitución 02	7	53.9	3710	20	Bueno
Cemento con sustitución 03	7	59.2	3690	20	Bueno

Tabla 45. Resultado del ensayo de velocidad de pulso a los 28 días

Probeta	Días	Tiempo [μs]	Velocidad $\left[\frac{m}{s}\right]$	Distancia [cm]	Condición del hormigón
Hormigón patrón 01	28	46.7	4280	20	Bueno
Hormigón patrón 02	28	51.6	3880	20	Bueno
Hormigón patrón 03	28	47	4260	20	Bueno
Arena con adición 01	28	48	4170	20	Bueno
Arena con adición 02	28	48.1	4160	20	Bueno
Arena con adición 03	28	48	4170	20	Bueno
Arena con sustitución 01	28	51.9	3850	20	Bueno
Arena con sustitución 02	28	52.3	3820	20	Bueno
Arena con sustitución 03	28	52.4	3820	20	Bueno
Cemento con adición 01	28	50.2	3980	20	Bueno
Cemento con adición 02	28	51.2	3910	20	Bueno
Cemento con adición 03	28	53.3	3750	20	Bueno
Cemento con sustitución 01	28	52.3	3820	20	Bueno
Cemento con sustitución 02	28	52.1	3840	20	Bueno
Cemento con sustitución 03	28	51.9	3850	20	Bueno

3.4.6. Ataque de sulfatos

Para el análisis de sulfatos, se realizó el ensayo de velocidad de pulso ultrasónico, con el cual se obtiene la condición del hormigón; característica que se comparó con las probetas sin ataque de sulfatos, como se observa en la Tabla 46:

Tabla 46. Ensayo de velocidad de pulso para análisis de sulfatos

Probeta	Días	Tiempo [μs]	Velocidad $\left[\frac{m}{s}\right]$	Distancia [cm]	Condición del hormigón
Hormigón en condiciones normales					
HP 10	35	45.8	4370	20	Bueno
ASR 11	35	47.4	4220	20	Bueno
ACR 11	35	47.9	4180	20	Bueno
CSR 10	35	50	4000	20	Bueno
CCR 11	35	53.1	3770	20	Bueno
Hormigón en ataque de sulfatos					
HP 11	35	46.4	4310	20	Bueno
ASR 12	35	48	4170	20	Bueno
ACR 08	35	48	4170	20	Bueno
CSR 07	35	49.9	4010	20	Bueno
CCR 03	35	54.2	3690	20	Bueno

Como se apreció en la Tabla 46, para probetas de edad similar pero expuestas a distintas condiciones de curado, la velocidad de pulso disminuye para hormigones expuestos a sulfatos en comparación con los hormigones de curado normal. Finalmente, se realizó el ensayo a compresión para determinar la resistencia de estas muestras y compararlas. En ambos casos, las probetas estuvieron inmersas en agua 40 días y los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 47.

Tabla 47. Ensayo de compresión para análisis de sulfatos

Probeta	% Sustitución / Adición	Fuerza [kN]	Resistencia
		40 días	40 días
Hormigón en condiciones normales			
HP 10	0	285	36.29
ASR 11	10	335	42.65
ACR 11	10	355	45.20
CSR 10	10	230	29.28
CCR 11	10	198	25.20
Hormigón en ataque de sulfatos			
HP 11	0	279	35.52
ASR 12	10	326	41.51
ACR 08	10	348	44.31
CSR 07	10	214	27.25
CCR 03	10	191	24.28

3.4.7. Resistividad eléctrica

Por medio de la Tabla 14, perteneciente a la norma (AASHTO T358, 2017), se relacionan y clasifican los hormigones de acuerdo a la penetración del ion cloruro a los 7 y 28 días, obteniéndose los resultados de la Tabla 48:

Tabla 48. Penetración de Iones Cloruro de acuerdo a la resistividad

Probeta	R+ [kΩ]	R- [kΩ]	R prom [kΩ]	Resistividad [kΩ*cm]	Penetración de Iones Cloruro	R+ [kΩ]	R- [kΩ]	R prom [kΩ]	Resistividad [kΩ*cm]	Penetración de Iones Cloruro
	7 días					28 días				
Hormigón patrón	1.82	1.85	1.84	9.18	Alto	2.41	2.43	2.42	12.10	Moderado
Arena con adición	1.73	1.68	1.71	8.53	Alto	2.45	2.49	2.47	12.35	Moderado
Arena con sustitución	1.63	1.67	1.65	8.25	Alto	2.40	2.43	2.42	12.08	Moderado
Cemento con adición	1.74	1.74	1.74	8.70	Alto	2.65	2.62	2.64	13.18	Moderado
Cemento con sustitución	1.65	1.63	1.64	8.20	Alto	2.39	2.40	2.40	11.98	Alto

En base a los resultados anteriores, la edad de la muestra tiene efectos significativos en los resultados de la prueba, dando mayores valores de resistividad, lo cual provoca la disminución de la penetración de iones cloruro en las probetas de hormigón (AASHTO T 358, 2017).

3.5. FACTIBILIDAD DEL HORMIGÓN

Para el análisis de factibilidad, se estudió las hormigoneras cercanas a la planta de beneficio y se optó por escoger la que cuenta con menor recorrido, siendo ésta la planta de hormigón Holcim ubicada en la ciudad de Machala. La distancia entre ambos puntos es de 97.1 km aproximadamente y su tiempo de viaje se estima en 1 h 49 min, como se observa en la Ilustración 45.



Ilustración 45. Distancia entre la planta de beneficio "Matamoros" y hormigonera más cercana.

El estudio de factibilidad se basó en el análisis de precios unitarios de cada uno de los materiales presentes en la mezcla, tanto del hormigón tradicional como del alternativo. Luego, se calculó el precio unitario por metro cúbico de hormigón, para cada una de las mezclas presentadas. Estos resultados se detallan en las siguientes tablas:

- HORMIGÓN PATRÓN

Tabla 49. Análisis de precios unitarios para el hormigón patrón

Materiales					
Descripción	Unidad	Costo unitario [USD]	Cantidad	Total	
Cemento	saco	8	13.00	104.00	
Arena	m³	23	0.40	9.10	
Grava	m³	25	0.32	7.99	
Agua	m³	0.83	0.17	0.14	
Aditivo	m³	264	0.01	2.27	
Relave	m³	0	0.00	0.00	
				Subtotal	123.51
Transporte					
Descripción	Unidad	Costo unitario [USD]	Cantidad	Distancia [km]	Total
Transporte de relave minero en volqueta 12 m3/viaje	m³-km	0.2	0	97.1	0.00
				Subtotal	0.00
Mano de obra					
Descripción	Unidad	Costo unitario [USD]	Cantidad	Rendimiento	Total
Chofer de volqueta	Hora	5.31	0	0.8	0.00
				Subtotal	0.00



Total	123.51
--------------	--------

- HORMIGÓN CON ADICIÓN DE RELAVE POR PORCENTAJE DE ARENA

Tabla 50. Análisis de precios unitarios para el hormigón con adición de relave por porcentaje de arena

Materiales					
Descripción	Unidad	Costo unitario [USD]	Cantidad	Total	
Cemento	saco	8	13.00	104.00	
Arena	m³	23	0.40	9.10	
Grava	m³	25	0.32	7.99	
Agua	m³	0.83	0.17	0.14	
Aditivo	m³	264	0.01	2.27	
Relave	m³	0	0.04	0.00	
				Subtotal	123.51
Transporte					
Descripción	Unidad	Costo unitario [USD]	Cantidad	Distancia [km]	Total
Transporte de relave minero en volqueta 12 m3/viaje	m³-km	0.2	0.0374	97.1	0.73
				Subtotal	0.73
Mano de obra					
Descripción	Unidad	Costo unitario [USD]	Cantidad	Rendimiento	Total
Chofer de volqueta	Hora	5.31	1.67	0.8	7.09
				Subtotal	7.09
				Total	131.33

- HORMIGÓN CON SUSTITUCIÓN DE ARENA POR RELAVE

Tabla 51. Análisis de precios unitarios en hormigón con sustitución de arena por relave

Materiales					
Descripción	Unidad	Costo unitario	Cantidad	Total	
		[USD]			
Cemento	saco	8	13.00	104.00	
Arena	m³	23	0.36	8.19	
Grava	m³	25	0.32	7.99	
Agua	m³	0.83	0.17	0.14	
Aditivo	m³	264	0.01	2.27	
Relave	m³	0	0.04	0.00	
				Subtotal	122.60
Transporte					
Descripción	Unidad	Costo unitario	Cantidad	Distancia [km]	Total
		[USD]			
Transporte de relave minero en volqueta 12 m3/viaje	m³-km	0.2	0.0374	97.1	0.73
				Subtotal	0.73
Mano de obra					
Descripción	Unidad	Costo unitario	Cantidad	Rendimiento	Total
		[USD]			
Chofer de volqueta	Hora	5.31	1.67	0.8	7.09



Subtotal	7.09
-----------------	------

Total	130.42
--------------	--------

- HORMIGÓN CON ADICIÓN DE RELAVE POR PORCENTAJE DE CEMENTO

Tabla 52. Análisis de precios unitarios para el hormigón con adición de relave por porcentaje de cemento

Materiales					
Descripción	Unidad	Costo unitario [USD]	Cantidad	Total	
Cemento	saco	8	13.00	104.00	
Arena	m³	23	0.40	9.10	
Grava	m³	25	0.32	7.99	
Agua	m³	0.83	0.17	0.14	
Aditivo	m³	264	0.01	2.27	
Relave	m³	0	0.02	0.00	
			Subtotal	123.51	
Transporte					
Descripción	Unidad	Costo unitario [USD]	Cantidad	Distancia [km]	Total
Transporte de relave minero en volqueta 12 m3/viaje	m³-km	0.2	0.0221	97.1	0.43
			Subtotal	0.43	
Mano de obra					
Descripción	Unidad	Costo unitario [USD]	Cantidad	Rendimiento	Total
Chofer de volqueta	Hora	5.31	1.67	0.8	7.09
			Subtotal	7.09	
			Total	131.03	

- HORMIGÓN CON SUSTITUCIÓN DE CEMENTO POR RELAVE

Tabla 53. Análisis de precios unitarios para hormigón con sustitución de cemento por relave

Materiales					
Descripción	Unidad	Costo unitario	Cantidad	Distancia	Total
		[USD]			
Cemento	saco	8	12.00		96.00
Arena	m³	23	0.40		9.10
Grava	m³	25	0.32		7.99
Agua	m³	0.83	0.17		0.14
Aditivo	m³	264	0.01		2.27
Relave	m³	0	0.02		0.00
				Subtotal	115.51
Transporte					
Descripción	Unidad	Costo unitario	Cantidad	Distancia	Total
		[USD]			
Transporte de relave minero en volqueta 12 m3/viaje	m³-km	0.2	0.0221	97.1	0.43
				Subtotal	0.43
Mano de obra					
Descripción	Unidad	Costo unitario	Cantidad	Rendimiento	Total
		[USD]			
Chofer de volqueta	Hora	5.31	1.67	0.8	7.09

Subtotal	7.09
Total	123.03

En las tablas anteriores se puede observar el costo total de las mezclas, mediante el análisis de precios unitarios, tomando como referencia la planta hormigonera Holcim de Machala a una distancia de 97.1 km desde la planta de beneficio “Matamoros”, cantón Portovelo-El Oro. A partir de esto, se determinó un costo de transporte, el cual incrementa el presupuesto de las mezclas a comparación del hormigón patrón. Por el contrario, la mezcla de cemento con sustitución resultó ser ligeramente más económica.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. CONCLUSIONES

En conclusión, se ha determinado la influencia del uso de materiales mineros de desecho procedentes de la planta de beneficio “Matamoros” en la fabricación de muestras de hormigón simple; encontrando que las propiedades físico mecánicas del hormigón alternativo con sustitución de arena, se vieron mejoradas en parámetros de resistencia a compresión y densidad, lo que representa un aumento en su calidad a comparación del hormigón patrón. En el resto de parámetros analizados, los cambios percibidos son poco significativos, por lo que el relave constituye un componente que no afecta a las mismas, desde el punto de vista técnico; no siendo así desde el punto de vista económico, ya que, dependiendo de las condiciones particulares del sitio de fabricación del hormigón, podría no ser factible su utilización; de esta manera se restringe el beneficio a la mejora de las condiciones del entorno y la salud de los habitantes aledaños.

En base a la caracterización de materiales tradicionales, los ensayos están basados en la Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC) y sus análogas *American Society for Testing and Materials* (ASTM). Se generó una granulometría controlada, tomando los valores dentro de los límites máximos y mínimos, reduciendo las variables que pueden ser un problema, tanto en el proceso de realización de especímenes como en el análisis de resultados. A partir de esta granulometría, se determinó que el agregado grueso es un material pasante el tamiz $\frac{3}{4}$ " con tamaño máximo nominal de 19 mm o 0.5 in; y el agregado fino alcanza un módulo de finura de 2.69, el cual se encuentra dentro del rango establecido de 2.3 a 3.1 especificado en la normativa NTE INEN-872 (2011). Al comparar los datos obtenidos en los ensayos con los proporcionados por la empresa

Holcim S.A., se concluye que cumple de manera satisfactoria ya que, son similares entre sí y cumple con los parámetros detallados en la norma anterior.

Con respecto a la caracterización del relave, se realizó la granulometría por cribado, obteniéndose un tamaño máximo de 2.38 mm y, debido a que el tamaño de las partículas predominantes era de tipo fino, se realizó una granulometría por hidrómetro, lográndose una distribución uniforme de tamaños con un comportamiento asintótico hacia los porcentajes que tienden a cero. A partir de esto se concluye que, el relave es un material particular que no obedece a ninguna granulometría definida. De la misma manera, mediante el ensayo de límites de Atterberg, se determinó que el relave analizado pasa de consistencia sólida a líquida, donde su límite líquido corresponde a una humedad del 18.19% y su límite de contracción a 13.31%. Debido a que el material no tiene límite plástico se reporta al relave como “NO PLÁSTICO”. Finalmente, en base a la tabla 2.4 “Clasificación de suelos AASHTO para subrasante de carreteras” de Das (2013), el relave se asemeja a un material tipo A3 correspondiente a una arena fina. Dicha tabla se encuentra en el Anexo 1.

Se seleccionó un rango de relaciones agua/cemento desde 0.29 a 0.35, utilizando los aditivos ViscoCrete 4100 y 20 HE, para el diseño de un mortero patrón, a partir de los cuales se optó por la mezcla con mejor trabajabilidad y baja segregación. La mezcla elegida fue la diseñada con una relación agua/cemento de 0.31 con el 2% de aditivo ViscoCrete 4100, dando una fluidez de 130%, y en base a esto, se realizó el ensayo de compresión, obteniéndose una resistencia de 75.24 MPa a los 7 días y de 86.23 MPa a los 28 días.

Para el diseño de un mortero alternativo, este se basó en el mortero patrón realizando adiciones y sustituciones de relave minero de 5%, 10%, 15% y 20% en el agregado fino y en el cemento, obteniéndose: mortero con adición de relave por porcentaje de arena, mortero con sustitución de relave por arena, mortero con adición de relave por porcentaje de cemento, mortero con sustitución de relave por cemento. Estas mezclas fueron sometidas al ensayo de compresión, dando resultados de 50.44 MPa a 69.42 MPa a los 7 días y 70.96 MPa a 91.40 MPa a los 28 días para el 10%, concluyéndose que este porcentaje de adición y sustitución de relave por arena, mantiene o supera la resistencia del mortero patrón; a diferencia de los morteros con modificación de cemento, cuyas resistencias están por debajo del mismo.

Finalmente, con respecto al porcentaje óptimo, se partió del análisis de la resistencia a compresión de morteros, concluyéndose que el porcentaje de reemplazo con el cual las mezclas presentaban mejores resistencias alrededor del 10% en casi todos los casos, tanto para la modificación de arena como para la modificación en la cantidad de cemento. Es por ello que, este porcentaje de relave, tanto en adición y sustitución, fue utilizado en los casos estudiados para el diseño de hormigón.

En cuanto al diseño y elaboración de mezclas de hormigón, se partió del método proporcionado por el ACI 211.1, diseñándose un hormigón patrón para una resistencia esperada de 40 MPa y alcanzándose 35.95 MPa, mismo que se utilizó como base para las modificaciones en la mezcla. Los componentes modificados en hormigones, fueron los mismos que se variaron en

morteros alternativos, con la diferencia que el porcentaje utilizado únicamente es el de 10%; ya que, el mortero es un material análogo al hormigón, sirvió de referencia para probar las distintas variaciones de conducta ante la modificación de sus componentes. Las mezclas fueron sometidas a varios ensayos, para determinar cuál de ellas tiene mejor comportamiento y resistencia. Con lo que se concluye que, el diseño satisface los requisitos detallados en el método propuesto por la guía de diseño ACI 211.1 del *American Concrete Institute*, cumpliendo un comportamiento adecuado bajo las condiciones particulares de uso.

Con respecto a las propiedades físico-mecánicas del hormigón se obtuvo que: en cuanto al ensayo de trabajabilidad, para el hormigón patrón se alcanzó un valor de 180 mm y para las muestras estudiadas se obtuvieron valores entre 127 y 260 mm; y según la norma ASTM C143 / C143M (2020), se concluye que estas muestras tienen consistencia “LIQUIDA”, lo que las caracteriza como hormigones autocompactantes. Para el ensayo de compresión en los casos estudiados, las resistencias a los 7 días varían de 27 MPa a 43 MPa, y de 24 MPa a 45 MPa a los 28 días; concluyéndose que, las mezclas con modificación de arena presentaron resistencias mayores a la dosificación patrón, a diferencia de las mezclas con variación de cemento. En base al ensayo de absorción y densidad, se obtuvieron densidades entre 2.135 y 2.395, concluyéndose que éstos son hormigones livianos y de densidades bajas, ya que no están en el rango entre 2.55 y 2.75 según Jeria (2020). En cuanto al ensayo de abrasión, se obtuvieron valores entre 24% y 36%, que según la norma ASTM C33 / C33M (2018), todos estos hormigones presentan buen comportamiento ante agentes abrasivos ya que no superan el 50% de desgaste.

En lo que se refiere al análisis de las propiedades físico-mecánicas, se realizó el ensayo no destructivo de velocidad de pulso ultrasónico, ejecutado en hormigones a los 7 días de curado, donde se obtiene que la velocidad de transmisión de la onda se encuentra entre $3690 \frac{m}{s}$ y $4160 \frac{m}{s}$, y un tiempo de 48.9 μs y 59.2 μs , en relación con el hormigón patrón que alcanzó valores de $4000 \frac{m}{s}$ y 50 μs ; y para hormigones con 28 días de curado, la velocidad está entre $3750 \frac{m}{s}$ y $4170 \frac{m}{s}$, y un tiempo de 48 μs y 53.3 μs , en relación con el hormigón patrón que obtuvo valores de $4280 \frac{m}{s}$ y 46.7 μs ; a partir de lo cual se concluye que, todas las probetas se las puede clasificar con la condición de “BUENO” según los rangos propuestos por Saint-Pierre et al. (2016). Para el análisis de ataque de sulfatos, tomando en cuenta que el ensayo, no se llegó al tiempo recomendado de 56 días, según Koch & Steinegger (1960), no se puede llegar a conclusiones definitivas. Sin embargo, mediante el ensayo de velocidad de pulso, se obtuvo que la velocidad en probetas sometidas al ataque de sulfatos es menor a comparación de las expuestas a curado normal. Finalmente, para el ensayo de resistividad eléctrica, se basó en la penetración de iones cloruro, obteniéndose valores entre 8 $k\Omega \cdot cm$ y 13 $k\Omega \cdot cm$ siguiendo la norma AASHTO T358 (2017), con la cual se concluyó que la penetración de las muestras pasa de “ALTO” a “MODERADO” desde 7 a 28 días, ya que su permeabilidad se reduce, al igual que la penetración de iones cloruro, según la edad de curado (AASHTO T 358, 2017).

Con relación a la factibilidad, se analizan los precios unitarios por producción y transporte de relave, dando un costo para el hormigón patrón de 123.51 USD, y para los casos de estudio, se obtuvieron costos entre 123 USD y 131 USD. Estos precios responden al caso particular, donde la

planta beneficio “Matamoros” se encuentra a 97.1 Km aproximadamente de la hormigonera más cercana de la ciudad de Machala, es decir a 1h 49min. Al comparar los valores, se concluye que, el uso de relave como sustitución a los materiales tradicionales no es económicamente factible, ya que el transporte de los mismos incrementa su costo de producción, a excepción de la mezcla con sustitución de cemento, que, si bien puede ser más económica, no alcanzó buenos resultados en sus propiedades a comparación del hormigón patrón. Tomando en cuenta las ventajas de mejora y mantenimiento de las propiedades físico mecánicas, y considerando el perjuicio económico, la implementación de relave en el hormigón puede ser factible al ejecutarse políticas de transporte contrarrestando sus desventajas; con lo que, a largo plazo se asume que los beneficios podrían influir en el desarrollo de la sociedad, implicando la mejora de la salud de poblaciones aledañas, la conservación de las fuentes hídricas y la mitigación del daño ambiental.

4.2. RECOMENDACIONES

Se recomienda la gestión de entidades privadas o municipalidades del sector, para un futuro desarrollo de la metodología de reemplazo de materiales tradicionales por residuos de relave en la industria aurífera, de manera que, se logre reducir el impacto ambiental en lugares cercanos a los puntos de procesamiento de minerales metálicos, como son: el cantón Portovelo, Camilo Ponce Enríquez y otros.

Además, los programas de mitigación ambiental con los que cuentan las empresas dedicadas a la explotación minera, podrían incluir el transporte de estos materiales contaminantes hacia plantas de premezclado o sitios encargados para su aprovechamiento, en lugar de los recursos destinados a llevar estos materiales hacia botaderos; de esta manera, los costos podrían verse disminuidos con respecto al hormigón patrón de manera significativa.

A partir de este trabajo de titulación, se da paso a futuros proyectos de investigación, ya que los relaves mineros son materiales poco investigados. Es por ello que se plantean dos líneas de estudio: La primera, se enfoca en el análisis de factibilidad, para determinar con mayor certeza que la mitigación de los daños causados por los relaves en el entorno es significativa. Y la segunda, se centra en un estudio químico de los relaves, para normar su uso y aplicación, verificando que sus componentes no generen reacciones perjudiciales para la salud, al momento de implementarlo en hormigones y en nuevas tecnologías de reutilización.

Para el ataque de sulfatos, se recomienda que las probetas de hormigón se encuentren en contacto con este compuesto por un mayor lapso de tiempo, con el fin de determinar eficazmente su influencia en el hormigón y sobre todo, establecer el deterioro que puede llegar a causar.

Como recomendación final, desde el punto de vista de sostenibilidad ambiental, se debe realizar un análisis para la evaluación del ciclo de vida completo del hormigón, tanto del patrón como alternativo, para su comparación. Este procedimiento recomendado, debería incluir un análisis desde la etapa de: extracción de materias primas, procesamiento, reutilización, reciclado y final disposición; es por esta razón que, se cree que el relave beneficiaría de manera significativa a reducir parámetros como la huella hídrica y de carbono, consumo energético y otros; tanto para las plantas de beneficio como para potenciales hormigoneras, que implementen estos procesos.

BIBLIOGRAFÍA

- AASHTO T 358. (2017). Surface resistivity indication of concrete's ability to resist chloride ion penetration. *American Association of State Highway and Transportation Officials*.
- ACI 211.1. (2009). *Standard practice for selecting proportions for normal heaavyweight, and mass concrete*.
- Andrade, C., & D'Andrea, R. (2011). La resistividad eléctrica como parámetro de control del hormigón y de su durabilidad. *Alconpat*, 2(Mayo-Agosto), 93–101. [http://www.mda.cinvestav.mx/alconpat/revista/documentos/Revista ALCONPAT, Volumen 1, Numero 1, Enero-Abril 2011/Revista ALCONPAT, Volumen 1, Numero 1, Enero-Abril 2011.pdf](http://www.mda.cinvestav.mx/alconpat/revista/documentos/Revista%20ALCONPAT,%20Volumen%201,%20Numero%201,%20Enero-Abril%202011/Revista%20ALCONPAT,%20Volumen%201,%20Numero%201,%20Enero-Abril%202011.pdf)
- ASTM C 1157. (2020). *Standard performance specification for hidraulic cement. 1, 4*. <http://www.astm.org>.
- ASTM C 597. (2010). Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete¹. *United States: American Society for Testing and Material.*, 04(02), 3–6. https://kupdf.net/download/astm-c-597-02_5c2a4423e2b6f58d2afbfa15_pdf
- ASTM C109/109M-16a. (2016). Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (Using 2-in. or cube specimens). *Annual Book of ASTM Standards*, 1–10. <https://doi.org/10.1520/C0109>
- ASTM C131/C131M – 14. (2014). Standard test method for resistance to megradation of small-size coarse aggregate by abrasion and impact in the los angeles aachine. *American Society for Testing and Materials, i*, 1–5. <https://doi.org/10.1520/C0131>
- ASTM C143/C143M. (2012). *Standard test method for slump of hydraulic-cement concrete. i(Reapproved)*, 1–4. <https://doi.org/10.1520/C0143>
- ASTM C150/C150M. (2019). Standard specification for portland cement. *October*, 73(Reapproved), 1–2. <https://doi.org/10.1520/C0150>
- ASTM C29. (2007). *Determinación de peso unitario de agregado grueso y agregado fino*. 30.
- ASTM C39/C39M –14. (2014). *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. 3–9. <https://doi.org/10.1520/C0039>
- ASTM C642-13. (2013). *Método de ensayo. Determinación de la densidad, la absorción de agua y los vacíos en el concreto endurecido*. 502.
- ASTM D 427. (2004). *Standard Test Method for Shrinkage Factors of Soils by the Mercury Method. 04*, 3–6.
- ASTM D 854 – 06. (2006). Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer. *Annual Book of ASTM Standards, i*, 1–7.
- ASTM D422. (2002). Standard Test Method for Particle-Size Analysis. *ASTM INTERNATIONAL*, 14, 1–8.
- Cheng, Y., Huang, F., Li, W., Liu, R., Li, G., & Wei, J. (2016). Test research on the effects of mechanochemically activated iron tailings on the compressive strength of concrete.



Construction and Building Materials, 118, 164–170.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.020>

Coronel, K., & Balseca, E. (2011). Ataque de los sulfatos a los hormigones de Alto Desempeño. *Facultad De Ingenieria*.

Das, B. M. (2013). *Fundamentos de ingeniería geotécnica* (4th Editio). Cengage Learning ©.

Domínguez Andrade, J. M. (2013). *La minería a gran escala en Ecuador: Una perspectiva de desarrollo*.

Enciclopedia_Salvat. (2004). Enciclopedia Salvat. In *Libro 4* (p. 3200).

Esmaeili, J., & Aslani, H. (2019). Use of copper mine tailing in concrete: strength characteristics and durability performance. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 21(3), 729–741. <https://doi.org/10.1007/s10163-019-00831-7>

Gao, S., Cui, X., Kang, S., & Ding, Y. (2020). Sustainable applications for utilizing molybdenum tailings in concrete. *Journal of Cleaner Production*, 266, 122020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122020>

Gehlot, T., Sankhla, D. S. S., Gehlot, D. S. S., & Gupta, A. (2016). Study of Concrete Quality Assessment of Structural Elements Using Ultrasonic Pulse Velocity Test. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 13(05), 15–22. <https://doi.org/10.9790/1684-1305071522>

Guevara Fallas, G., Hidalgo Madrigal, C., Pizarro García, M., Rodríguez Valenciano, I., Rojas Vega, L. D., & Segura Guzmán, G. (2012). Efecto de la variación agua/cemento en el concreto. *Revista Tecnología En Marcha*, 25(2), 80–86. <https://doi.org/10.18845/tm.v25i2.1632>

Ince, C. (2019). Reusing gold-mine tailings in cement mortars: Mechanical properties and socio-economic developments for the Lefke-Xeros area of Cyprus. *Journal of Cleaner Production*, 238, 117871. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117871>

INEN 691. (2005). Norma Técnica Mecánica de Suelos Método de Casa Grande. *Instituto Ecuatoriano de Normalización*, 1–14.

INEN 692. (2005). Norma Técnica Ecuatoriana. Mecánica de Suelos Determinación del Límite Plástico. *Instituto Ecuatoriano de Normalización*.

Irassar, E. F., Sota, J. D., & Batic, O. R. (1988). Evaluación de la resistencia a los sulfates de cemento con ceniza volante (utilizando el método de Koch & Steinegger). *Materiales de Construcción*, 38(212), 21–35. <https://doi.org/10.3989/mc.1988.v38.i212.822>

Ishibashi, I., & Hazarika, H. (2010). Soil Mechanics Fundamentals. In *Soil Mechanics Fundamentals and Applications*. <https://doi.org/10.1201/b16655>

Jeria, R., Laboratorio, H., & De Vialidad, N. (2017). *Curso Laboratorista Vial Clase C*.

Jiménez, J. P. (2017). *Comportamiento físico-mecánico del hormigón simple fabricado con areanas de relave de la planta de tratamiento y beneficio “Reina del Cisne”, código 390354, del cantón Portovelo, provincia de El Oro*. UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA.

Juárez Badillo, E., & Rico Rodríguez, A. (2005). *Mecánica de suelos, Tomo I: Fundamentos de la*



Mecánica de Suelos.

- Kosmatka, S. H., & Kerkhoff, W. (2014). Diseño y control de mezclas de Concreto. In *Journal of Experimental Botany*.
- Leon Condo, L. A., Campoverde Tenesaca, J. L., & Cruzat Contreras, C. A. (2017). Estudio fisicoquímico en tuberías de hormigón en agua con ph alcalino elevado. In *Journal of Chemical Information and Modeling*. Universidad de Cuenca.
- Mahmood, A. A., & Elektorowicz, M. (2015). A Review of Sustainable Management of Mine Tailings. *Applied Mechanics and Materials*, 773–774, 1256–1260. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.773-774.1256>
- Marín Alvarado, S. A. (2011). *Aporte dinámico de cianuro, mercurio, plomo y arsénico en los cauces naturales de los ríos Calera y Amarillo en el distrito minero Portovelo-Zaruma*. Universidad Técnica Particular de Loja.
- NTE INEN-872. (2011). Áridos Para Hormigón. Requisitos. *Instituto Ecuatoriano de Normalización*, 16. <https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/872-1.pdf>
- NTE INEN 152. (2012). *Cemento portland. requisitos*. 14.
- NTE INEN 1855-1. (2015). Hormigones. Hormigón premezclado. Requisitos. *Instituto Ecuatoriano de Normalización*.
- NTE INEN 2380. (2011). Cemento hidráulico. Requisitos de desempeño para cementos hidráulicos. *Instituto Ecuatoriano de Normalización*, 1(Primera Edición), 5. <http://181.112.149.203/buzon/normas/2380.pdf>
- NTE INEN 488. (2009). Cemento Hidráulico. Determinación de la Resistencia a la Compresión de 50 mm de Arista. *Instituto Ecuatoriano de Normalización*, 19.
- NTE INEN 856:2010. (2010). Áridos. Determinación de la densidad, densidad relativa (gravedad específica) y absorción del árido fino. *Review of the Styrene Assessment in the National Toxicology Program 12th Report on Carcinogens*, 1–178. <https://doi.org/10.17226/18725>
- NTE INEN 857:2010. (2010). Áridos. Determinación de la densidad relativa(Gravedad específica) y absorción del árido grueso. *Instituto Ecuatoriano De Normalización*, 1(Primera Edición), 1–14. <http://apps.normalizacion.gob.ec>
- NTE INEN 860. (2011). Áridos. Determinación del valor de la degradación del árido grueso de partículas menores a 37,5 mm mediante el uso de la máquina de los ángeles. *Instituto Ecuatoriano de Normalización*, 10.
- Oblasser, A., & Chaparro, E. (2008). Estudio comparativo de la gestión de los pasivos ambientales mineros en Bolivia, Chile, Perú y Estados Unidos. In *Ingeniare Revista chilena de ingeniería* (Vol. 17, Issue 3). <http://www.eclac.org/publicaciones/xml/9/19539/lcl2169e.pdf>
- Oviedo, R., Moina, E., Naranjo, J., & Barcos, M. (2017). Contaminación por metales pesados en el sur del Ecuador asociada a la actividad minera. *Bionatura*, 2(4), 437–441. <https://doi.org/10.21931/rb/2017.02.04.5>
- Paredes Pozo, D. C. (2013). *¿Después de la minería que? : análisis del impacto socioeconómico y*



ambiental de la minería : caso South American Development Company (SADCO - CIMA), Portovelo y Zaruma - El Oro - Ecuador. 74.
<http://repositorio.flacsoandes.edu.ec/handle/10469/5943>

Saint-Pierre, F., Philibert, A., Giroux, B., & Rivard, P. (2016). Concrete Quality Designation based on Ultrasonic Pulse Velocity. *Construction and Building Materials*, 125, 1022–1027.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.158>

Siddique, S., & Jang, J. G. (2020). Assessment of molybdenum mine tailings as filler in cement mortar. *Journal of Building Engineering*, 31(November 2019), 101322.
<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101322>

Sika Ecuatoriana S.A. (2015). *Sika® ViscoCrete® -4100*.

Simonsen, A. M. T., Solismaa, S., Hansen, H. K., & Jensen, P. E. (2020). Evaluation of mine tailings' potential as supplementary cementitious materials based on chemical, mineralogical and physical characteristics. *Waste Management*, 102, 710–721.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.11.037>

Vargas, F., & Rigamonti, L. (2020). Environmental evaluation of treated tailing as supplementary cementitious material. *Procedia CIRP*, 90, 280–284.
<https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.02.008>

Vargas Santacruz, K. J. (2018). *El sector minero y su impacto económico y ambiental en el cantón Zaruma, período 2013-2017*. [UNIVERSIDAD DE GUAYAQUIL].
<https://doi.org/http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/34555>

ANEXOS

Anexo 1. Clasificación de suelos AASHTO para subrasante de carreteras.

Clasificación general	Materiales granulares (35% o menos del total de la muestra pasada por el núm. 200)						
	A-1			A-2			
Grupo de clasificación	A-1-a	A-1-b	A-3	A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7
Análisis de tamiz (porcentaje de paso)							
Núm. 10	50 máx.						
Núm. 40	30 máx.	50 máx.	51 mín.				
Núm. 200	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.
Características de la fracción de paso núm. 40							
Límite líquido				40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.
Índice de plasticidad	6 máx.		NP	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.
Tipos comunes de materiales significativos constituyentes	Fragmentos de roca, grava y arena		Arena fina	Limo o grava arcillosa y arena			
Clasificación general de la subrasante	Excelente a bueno						

Clasificación general	Materiales granulares (35% o menos del total de la muestra pasada por el núm. 200)				
					A-7 A-7-5* A-7-6†
Grupo de clasificación		A-4	A-5	A-6	
Análisis de tamiz (porcentaje de paso)					
Núm. 10					
Núm. 40					
Núm. 200		36 mín.	36 mín.	36 mín.	36 mín.
Características de la fracción de paso núm. 40					
Límite líquido		40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.
Índice de plasticidad		10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.
Tipos comunes de materiales significativos constituyentes		Suelos limosos		Suelos arcillosos	
Clasificación general de la subrasante	Regular a malo				

*Para A-7-5, $PI \leq LL - 30$

†Para A-7-6, $PI > LL - 30$

Anexo 2. Ficha técnica del agregado grueso.

 LABSCON Laboratorio de Suelos y Concretos Diseño Control de Calidad y Fiscalización	
PROYECTO: CONTROL DE CALIDAD	
SOLICITA: ING. PABLO ORBE - HOLCIM	
AGREGADO : GRAVA NATURAL	
FECHA: 28 DE FEBRERO DEL 2020	PROCEDENCIA: ROOKAZUL

MEMORIA FOTOGRAFICA





Holcim Ecuador S.A.

Granulometría de Agregado Grueso

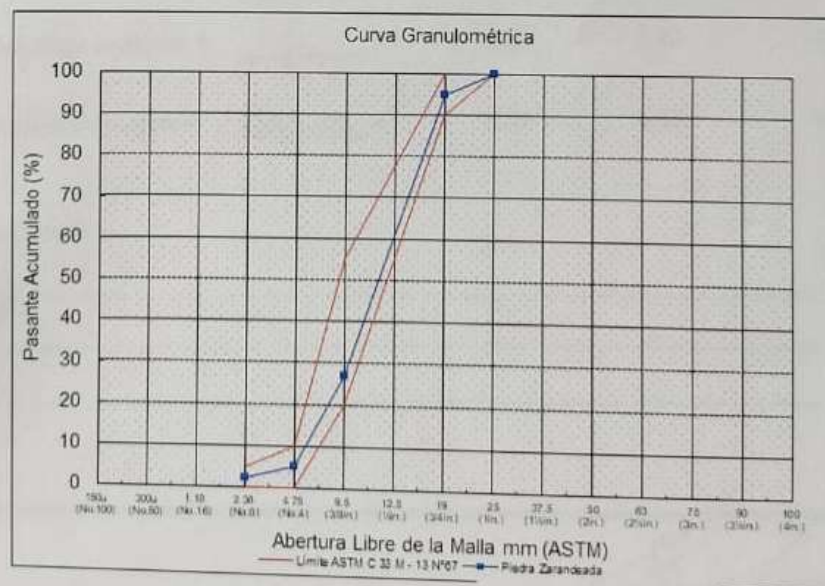
KMAT-H00-RC05

Piedra 1: P57

Piedra 2: P67

Piedra 3: P78

Planta:	Cuenca	Norma de Ensayo: NTE INEN 696			
Agregado:	Piedra Zarandeada			Fecha de Muestreo:	2019-12-27
Fuente:	RAZUL			Fecha de Ensayo:	2019-12-27
Muestra No:	1			Hora:	0:00
Masa inicial (g):	3000.0			Realizado Por:	Darwin peñañiel
Tamiz		Retenido	Retenido	Retenido	Pasante
INEN	ASTM	Parcial (g)	Parcial (%)	Acumulado (%)	Acumulado (%)
100 mm	4 in.	---	---	---	---
90 mm	3½ in.	---	---	---	---
75 mm	3 in.	---	---	---	---
63 mm	2½ in.	---	---	---	---
50 mm	2 in.	---	---	---	---
37.5 mm	1½ in.	---	---	---	---
25 mm	1 in.	0.0	0.0	0	100
19 mm	¾ in.	160.1	5	5	95
12.5 mm	½ in.	---	---	---	---
9.5 mm	3/8 in.	2030.0	68	73	27
4.75 mm	No. 4	654.9	22	95	5
2.36 mm	No. 8	85.1	3	98	2
1.18 mm	No. 16	---	---	---	---
300 µm	No. 50	---	---	---	---
150 µm	No. 100	---	---	---	---
Bandeja		69.4	2	100	0
Masa final (g):	2999.5	Módulo de Finura		6.65	
Pérdida ≤0.5%	Ensayo válido				



Responsable

Supervisor de calidad

Pablo Orbe C.

**LABSCON**

Laboratorio de Suelos y Concretos

Diseño Control de Calidad y Fiscalización

PROYECTO: CONTROL DE CALIDAD

SOLICITA: ING. PABLO ORBE - HOLCIM

AGREGADO : GRAVA NATURAL

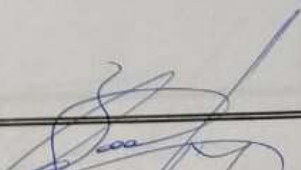
FECHA: 28 DE FEBRERO DEL 2020

PROCEDENCIA: ROOKAZUL

P E S O V O L U M E T R I C O S U E L T O N O R M A : I N E N 8 5 8**DATOS****E N S A Y O S**

	1	2	3	4
PESO DEL MATERIAL (g)	14.764	14.809	14.837	14.834
VOL. DEL RECIPIENTE (cm ³)	9.969	9.969	9.969	9.969
P. VOLUMET. SUELTO (kg/m ³)	1.481	1.486	1.488	1.488
VALOR PROMEDIO	1.486	kg/m ³		

Observaciones:





PROYECTO: CONTROL DE CALIDAD

SOLICITA: ING. PABLO ORBE - HOLCIM

AGREGADO : GRAVA NATURAL

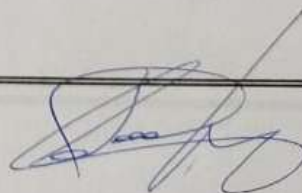
FECHA: 28 DE FEBRERO DEL 2020

PROCEDENCIA: ROOKAZUL

P E S O V O L U M E T R I C O V A R I L L A D O N O R M A : I N E N 8 5 8**DATOS****E N S A Y O S**

	1	2	3	4
PESO DEL MATERIAL (g)	15.657	15.657	15.646	15.663
VOL. DEL RECIPIENTE (cm ³)	9.969	9.969	9.969	9.969
P. VOLUMET. SUELTO (kg/m ³)	1.571	1.571	1.569	1.571
VALOR PROMEDIO	1.570	kg/m ³		

Observaciones:





PROYECTO: CONTROL DE CALIDAD

SOLICITA: ING. PABLO ORBE - HOLCIM

AGREGADO : GRAVA NATURAL

FECHA: 28 DE FEBRERO DEL 2020

PROCEDENCIA: ROOKAZUL

PESOS ESPECIFICOS Y ABSORCION NORMA: INEN 856

A =	1.500,7	1.501,1	(Peso del material superficie saturada seca)
B =	8.127,3	8.127,9	(Peso del pignómetro + agua + material)
C =	7.215,0	7.215,1	(Peso del pignómetro + agua)
D =	1.447,0	1.447,4	(Peso del material seco)

PROMEDIO

Peso específico seco =	$\frac{D}{A - (B - C)}$	=	2,46	2,46	2,46
Peso espec. superf. saturad	$\frac{A}{A - (B - C)}$	=	2,55	2,55	2,55
Peso específico aparente =	$\frac{D}{D - (B - C)}$	=	2,71	2,71	2,71
% de absorción de agua =	$\frac{100(A - D)}{D}$	=	3,71	3,71	3,71

Observaciones :





TITANIUM ROAD
Expertos en suelos, concretos y asfaltos.

TITANIUMROAD Cía. Ltda.

Solicita: **Holcim**

Ensayo: **ABRASION**

Norma: **ASTM C -131**

Fecha de Muestreo: **21/01/2020**

Muestreado por: **Lab Pedro Arce**

Revisado por: **Ing. Flavio Albarracín**

Material: **Canto Rodado 3/4**

Procedencia: **Minera Rokazul**

METODO DIAMETRO		A	B	C	D
Pasa el tamiz	Retenido en Tamiz	CANTIDAD DE MATERIAL (gramos)			
1 1/2"	1"	(1250±25)			
1"	3/4"	(1250±25)			
3/4"	3/8"	(1250±10)	(2500±10)		
3/8"	3/8"	(1250±10)	(2500±10)		
3/8"	1/4"			(2500±10)	
1/4"	Nº 4			2500	
Nº 4	Nº 8			(2500±10)	
PESO TOTAL		(5000±10)	(5000±10)	(5000±10)	(5000±10)
Nº de Esferas		12	11	8	6
Nº de Revoluciones		500	500	500	500
Tiempo de rotación (minutos)		15	15	15	15

Peso Inicial: **5000**

Peso Final: **3975**

% Desgaste = $\frac{P_{inicial} - P_{final}}{P_{inicial}} \times 100$ = **20,50%**

PEDRO ARCE
LABORATORISTA

FLAVIO ALBARRACIN LUISACA
INGENIERO - CONTROL CALIDAD

Anexo 3. Ficha técnica del agregado fino.

	
PROYECTO: CONTROL DE CALIDAD	
SOLICITA: ING. PABLO ORBE - HOLCIM	
AGREGADO : ARENA	
FECHA: 28 DE FEBRERO DEL 2020	PROCEDENCIA: ROOKAZUL

MEMORIA FOTOGRAFICA





Holcim Ecuador S.A.

Granulometría de agregado fino

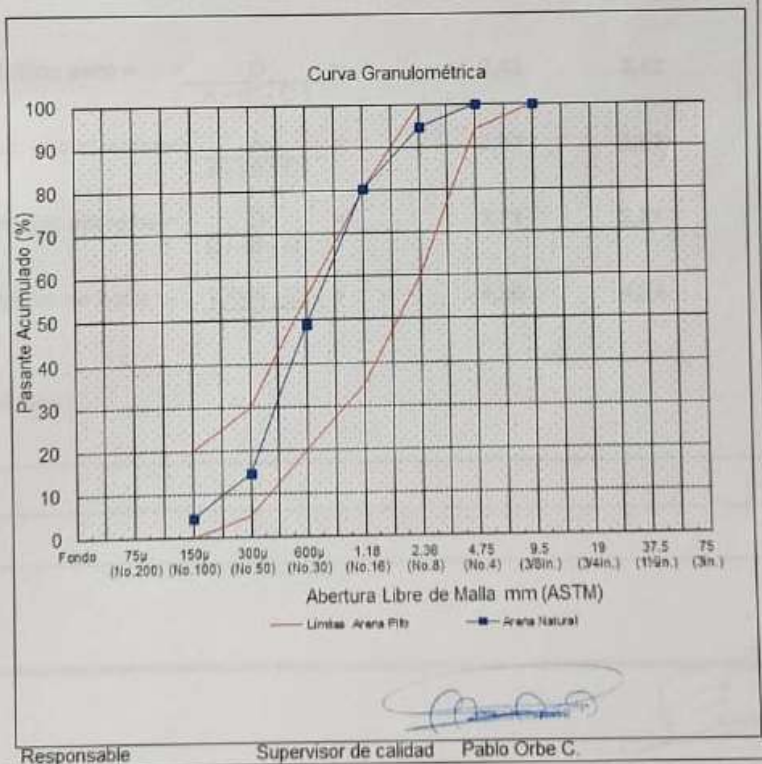
HPFO-H00-RC01

Arena 1:

Arena 2: A. natural

Arena 3: -

Planta:	Holcim Cuenca				
Agregado:	Arena Natural			Muestreo fecha:	2019-12-27
Fuente:	RAZUL			Ensayo fecha:	2019-12-27
Muestra No:	1			Hora	
Masa inicial (g)	1000.0			Realizado por	P. Orbe
Tamiz		Retenido	Retenido	Retenido	Pasante
INEN	ASTM	Parcial (g)	Parcial (%)	Acumulado (%)	Acumulado (%)
9,50 mm	3/8 in.	0.0	0	0	100
4,75 mm	No. 4	2.6	0	0	100
2,36 mm	No. 8	51.7	5	5	95
1,18 mm	No. 16	144.2	14	20	80
600 µm	No. 30	312.6	31	51	49
300 µm	No. 50	340.5	34	85	15
150 µm	No. 100	104.7	10	96	4
Bandeja		43.7	4	100	0
Masa final (g):	1000.0		Módulo de Finura :	2.57	
Pérdida ≤0.3% Ensayo válido					





PROYECTO: CONTROL DE CALIDAD

SOLICITA: ING. PABLO ORBE - HOLCIM

AGREGADO : ARENA

FECHA: 28 DE FEBRERO DEL 2020

PROCEDENCIA: ROOKAZUL

P E S O V O L U M E T R I C O S U E L T O N O R M A : I N E N 8 5 8**DATOS****E N S A Y O S**

	1	2	3	4
PESO DEL MATERIAL (g)	4.289	4.292	4.286	4.278
VOL. DEL RECIPIENTE (cm ³)	2.988	2.988	2.988	2.988
P. VOLUMET. SUELTO (kg/m ³)	1.435	1.436	1.434	1.432
VALOR PROMEDIO	1.434	kg/m ³		

Observaciones:





PROYECTO: CONTROL DE CALIDAD

SOLICITA: ING. PABLO ORBE - HOLCIM

AGREGADO : ARENA

FECHA: 28 DE FEBRERO DEL 2020

PROCEDENCIA: ROOKAZUL

P E S O V O L U M E T R I C O V A R I L L A D O N O R M A : I N E N 8 5 8

DATOS

E N S A Y O S

	1	2	3	4
PESO DEL MATERIAL (g)	4.711	4.724	4.719	4.717
VOL. DEL RECIPIENTE (cm ³)	2.988	2.988	2.988	2.988
P. VOLUMET. SUELTO (kg/m ³)	1.577	1.581	1.579	1.579
VALOR PROMEDIO	1.579	kg/m ³		

Observaciones:



PROYECTO: CONTROL DE CALIDAD

SOLICITA: ING. PABLO ORBE - HOLCIM

AGREGADO : ARENA

FECHA: 28 DE FEBRERO DEL 2020

PROCEDENCIA: ROOKAZUL

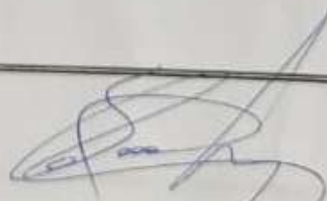
PESOS ESPECIFICOS Y ABSORCION NORMA: INEN 856

A =	500,0	500,0	(Peso del material superficie saturada seca)
B =	955,8	956,1	(Peso del pignómetro + agua + material)
C =	657,7	657,8	(Peso del pignómetro + agua)
D =	475,4	475,6	(Peso del material seco)

PROMEDIO

Peso específico seco =	$\frac{D}{A - (B - C)}$	2,35	2,36	2,36
Peso espec. superf. saturad	$\frac{A}{A - (B - C)}$	2,48	2,48	2,48
Peso específico aparente =	$\frac{D}{D - (B - C)}$	2,68	2,68	2,68
% de absorción de agua =	$\frac{100(A - D)}{D}$	5,17	5,13	5,15

Observaciones :



Anexo 4. Ficha técnica del cemento Holcim Premium tipo HE.

Especificaciones

Especificaciones técnicas de Holcim Premium Tipo HE.

Requisitos químicos

No se especifica la composición química para el cemento. Sin embargo, el cemento debe ser analizado para propósitos informativos.

Requisitos físicos

Notas:

1. La información que consta en el cuadro adjunto corresponde al promedio de los datos obtenidos en el período de ensayos en curso. Los datos son del cemento típico despachado por Holcim. Los despachos individuales pueden tener variaciones.
2. (A) Límite no especificado por la NTE INEN 2380. Resultado reportado sólo como información.

	INEN 2380	Valor referencial
Cambio de longitud por autoclave, % máximo	0.80	-0.04
Tiempo de fraguado, método de Vicat		
no menos de, minutos	45	150
no más de, minutos	420	
Contenido de aire del mortero, en volumen, %		3
Resistencia a la compresión, MPa, mínimo		
1 día	12	14
3 días	24	25
7 días	-	32
28 días	-	40
Expansión en barras de mortero 14 días, % máx.	0.020	0.001

Calidad

Los cementos de alta resistencia temprana Tipo HE cuyos requisitos de desempeño están contemplados en la Norma NTE INEN 2380, son aptos para todo tipo de estructuras, sobre todo donde se requieran ser puestas en servicio rápidamente. También se aplican en la construcción de estructuras masivas, obras portuarias, pavimentos, puentes, etc.

El cemento Holcim Premium Tipo HE es un producto de alta calidad que supera ampliamente los requisitos establecidos en la Norma NTE INEN 2380, brindando seguridad y confianza al sector de la construcción en el desarrollo de sus proyectos.

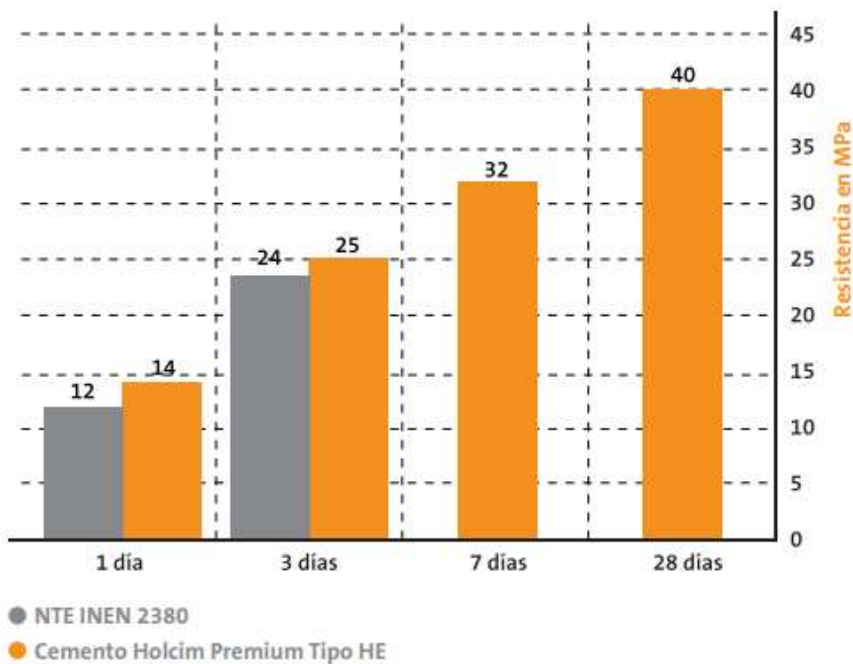
Resistencia

El desarrollo de resistencia del hormigón de cemento hidráulico se debe a varios factores, tales como las características físicas y químicas del cemento, la relación agua/cemento, relación de cemento/agregado, la granulometría, textura superficial, forma, resistencia y rigidez de las partículas del agregado; así como el uso de aditivos, condiciones de curado y el medio ambiente.

La razón de la rápida ganancia de resistencia no debe confundirse con la razón de la rapidez de fraguado; en efecto, cementos de uso general como el Tipo GU y cementos de alta resistencia inicial como el Tipo HE pueden tener tiempos de fraguado muy similares, aunque sus resistencias iniciales sean diferentes. En el caso del cemento Tipo HE las resistencias serán superiores.

Por su adecuada formulación, el cemento Holcim Premium Tipo HE permite elaborar hormigones en obras que demandan altas resistencias iniciales a la compresión.

Comparativo de resistencias



Anexo 5. Ficha técnica del aditivo ViscoCrete 4100.

					
HOJA TÉCNICA DE PRODUCTO Sika® ViscoCrete 4100					
ADITIVO REDUCTOR DE AGUA DE ALTO RANGO					
DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO	Sika ViscoCrete 4100 es un aditivo reductor de agua de alto rango e hiperplastificante, fabricado con los polímeros policarboxilatos de nuestra Tecnología Sika ViscoCrete. Diseñado para cumplir con todos los requerimientos de la Norma ASTM C-494. Tipos A y F.				
USOS	• Sika ViscoCrete 4100 puede ser usado, tanto en hormigón premezclado, así como en prefabricados, adicionado en la planta como un reductor de agua de alto rango, proporciona excelente plasticidad mientras mantiene la trabajabilidad por más de una hora. Los tiempos de fraguado controlados del Sika ViscoCrete 4100 lo hacen ideal para aplicaciones tanto horizontales como verticales. • Sika ViscoCrete 4100 es ideal para producción de hormigones autocompactados (SCC).				
VENTAJAS	Reductor de agua: Sika ViscoCrete 4100 con pequeñas dosificaciones, se obtienen reducciones de agua entre 10-15% y con altas dosificaciones se pueden lograr reducciones de agua de hasta un 45%. Sika ViscoCrete 4100 es aplicable para todos los niveles de reducción de agua. Alta plasticidad: la acción superplastificante del Sika ViscoCrete 4100 permite obtener altos asentamientos, hormigones fluidos con alto mantenimiento de la trabajabilidad que facilitan la colocación con el mínimo vibrado aún cuando las relaciones agua-cemento sean tan bajas como 0,25 Sika ViscoCrete 4100 plastifica el hormigón dando alta fluidez, pero manteniendo la cohesión, evitando de esta manera sangrado o segregación. Larga trabajabilidad y control del fraguado: Sika ViscoCrete 4100 está formulado para mantener la trabajabilidad por más de una hora, manteniendo los tiempos de fraguado normales. La acción combinada de reductor de agua de alto rango y superplastificante del Sika ViscoCrete 4100, proporciona al hormigón endurecido los siguientes beneficios: • Las altas resistencias finales permiten flexibilidad en los diseños de ingeniería y economía en las estructuras. • Bajas relaciones agua cemento producen hormigones más durables, más densos y menos permeables. • La alta plasticidad permite reducir los defectos de la superficie del hormigón y mejora la apariencia estética.				
DATOS TÉCNICOS	<table><tr><td>ASPECTO:</td><td>Líquido traslúcido</td></tr><tr><td>DENSIDAD:</td><td>1.1 g/cc aprox.</td></tr></table>	ASPECTO:	Líquido traslúcido	DENSIDAD:	1.1 g/cc aprox.
ASPECTO:	Líquido traslúcido				
DENSIDAD:	1.1 g/cc aprox.				

MODO DE EMPLEO

Dosis: Las dosis varían de acuerdo al tipo de material usado, condiciones ambientales y a los requerimientos de un proyecto específico.

Sika Ecuatoriana recomienda usar dosis entre 0,19% a 0,9% del peso del cemento. Dosis mayores a las recomendadas pueden usarse cuando están especificados materiales, tales como microsilica, condiciones ambientales extremas. Para mayor información comuníquese con el Departamento Técnico de Sika.

Mezclado: Para mejores resultados de superplastificación, adicionar el Sika ViscoCrete 4100 directamente a la mezcla fresca de hormigón en el mixer y dejar mezclándose por lo menos 60 segundos. El Sika ViscoCrete 4100 también puede adicionarse a la mezcla fresca directamente en la planta al final del ciclo de mezclado.

Combinación con otros aditivos: Sika ViscoCrete 4100 es muy efectivo sólo o combinado con otros aditivos de Sika. Si se usa con ciertos aditivos Sikament puede afectar la plasticidad del hormigón fresco.

Combinación con microsilica: Sika ViscoCrete 4100 es particularmente recomendable para el uso con microsilica por su capacidad de reducción de agua y mayor control de la plasticidad.

PRESENTACIÓN

Tambores de 230 kg y al granel.

ALMACENAMIENTO

12 meses en su envase original, bien sellado y bajo techo.

SEGURIDAD**Medidas generales de protección e higiene.**

Prever una ventilación suficiente o escape de gases en el área de trabajo.

Evitar el contacto con los ojos y la piel.

Protección preventiva de la piel con pomada protectora.

Quitarse inmediatamente la ropa manchada.

No fumar, no comer o beber durante el trabajo. Lavarse las manos antes de los descansos. Protección de las manos con guantes de goma de butilo/nitrilo.

Protección de los ojos con gafas herméticamente cerradas. Protección corporal.

Ecología

No verter directamente sobre vertientes de agua o el suelo, actuar de acuerdo a las regulaciones locales.

Toxicidad

No peligroso.

Transporte

Mercancía no peligrosa.

NOTA LEGAL

La información y en particular las recomendaciones sobre la aplicación y uso final de los productos Sika son proporcionados de buena fe, basados en el conocimiento y experiencia actuales de Sika respecto a sus productos, siempre y cuando éstos sean adecuadamente almacenados y manipulados, así como aplicados en condiciones normales de acuerdo a las recomendaciones Sika. En la práctica, las diferencias en los materiales, sustratos y condiciones de la obra son tan particulares que de esta información, cualquier recomendación escrita o cualquier otro consejo no se puede deducir ninguna garantía respecto a la comercialización o adaptabilidad del producto a una finalidad en particular, así como ninguna responsabilidad que surja de cualquier relación legal. El usuario del producto debe probar la conveniencia del mismo para un determinado propósito. Sika se reserva el derecho de cambiar las propiedades de sus productos. Se debe respetar los derechos de propiedad de terceros. Todas las órdenes de compra son aceptadas de acuerdo con nuestras actuales condiciones de venta y despacho. Los usuarios deben referirse siempre a la edición más reciente de la Hoja Técnica local, cuyas copias serán facilitadas a solicitud del cliente.

Sika Ecuatoriana S.A. dispone de un sistema de gestión de la calidad y ambiental certificado de acuerdo a las normas ISO 9001:2015 e ISO 14001:2015 respectivamente, por SGS.

Sika Ecuatoriana S.A. <https://ecu.sika.com>

Durán.- Km. 3 1/2 vía Durán - Tambo (Casilla 10093) PBX (593-4) 2812700 Fax (593-4) 2801229
Quito.- Av. Naciones Unidas entre Iñaquito y Núñez de Vela, Edificio Metropolitano, PBX (593-4) 2812700
Cuenca.- Av. Ordóñez Lasso y Los Claveles, Edif. Palermo Tel: +5937 4 089725 - 4102829

Hoja técnica de producto
Sika ViscoCrete 4100
Edición N°1 12-2015
Documento N° 011301011000000201

BUILDING TRUST

