

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**DISEÑO DE RELLENO MINERO QUE UTILIZA RELAVE DE
ORO Y COBRE COMO REEMPLAZO DE AGREGADO FINO**

Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Civil

AUTOR:

Carlos Gerardo Tipian Orozco

ASESOR:

Laura Marina Navarro Alvarado

Lima, Marzo, 2023

Informe de Similitud

Yo, Laura Marina Navarro Alvarado,

docente de la Facultad de Ciencias e ingeniería... de la Pontificia

Universidad Católica del Perú, asesor(a) de la tesis/el trabajo de investigación titulado

DISEÑO DE RELLENO MINERO QUE UTILIZA RELAVE DE ORO Y COBRE COMO REEMPLAZO DE AGREGADO FINO del/de la autor(a)/ de los(as) autores(as) Carlos Tipian Orozco.....,

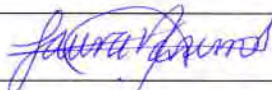
.....,

.....,

dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 18%. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el 21/02/2023.
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis o Trabajo de Suficiencia Profesional, y no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lugar y fecha: Lima ...14/03/2023.....

Apellidos y nombres del asesor / de la asesora: <u>Navarro, Laura Marina</u>	
DNI:18144134	Firma 
ORCID:	

RESUMEN

La presente investigación busca crear un concreto ecológico el cual aprovecha el relave minero en su composición. Este relave minero representa un peligro para el medio ambiente debido a la concentración de metales tóxicos presentes en su composición. Actualmente no existe un uso comercial de este material por lo que son aislados en depósitos especiales al término de las actividades mineras en la zona.

Para aprovechar el desecho minero en la fabricación de concreto se reemplazará el agregado fino por cierto porcentaje de agregado minero. Para estimar el buen comportamiento del concreto con relave minero en su composición, se analizarán las propiedades mecánicas del concreto endurecido, específicamente la resistencia a la compresión axial y permeabilidad de este. Se dispondrán de las propiedades físicas de los agregados para realizar las dosificaciones correspondientes de las mezclas a analizar. Finalmente se compararán los resultados para calcular el porcentaje óptimo de relave minero que se puede utilizar en las mezclas de diferentes relaciones agua-cemento de modo que no afecte considerablemente dichas propiedades.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres: Carlos Tipian Muñante y Geovana Orozco Rojas, mi hermano Daniel Tipian Orozco y mi familia quienes me apoyaron toda mi vida.

A Aitana, Ángel, Benito, Giancarlo, Jemima, Jimmy, José y Karly quienes me apoyaron en la realización de la tesis.

A la Ingeniera Laura Navarro Alvarado por asesorarme durante toda la investigación y hacer esta tesis posible.



TABLA DE CONTENIDOS

CAPÍTULO 1	1
1. Introducción.....	1
1.1 OBJETIVOS.....	2
1.1.1 Objetivo general	2
1.1.2 Objetivos específicos.....	2
1.2 HIPÓTESIS	2
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	3
1.4 ALCANCES.....	3
CAPÍTULO 2	5
2. Estado del arte	5
2.1 ANTECEDENTES	5
2.1.1 Industria minera.....	5
2.1.2 Contaminación por relaves mineros	6
2.1.3 Relleno Minero.....	8
2.2 USO DE RELAVE MINERO.....	8
2.2.1 Geopolimerización	8
2.2.2 Sistema de relleno en minas	9
2.2.3 Materiales de construcción	9
2.2.4 Concreto de alta resistencia	10
CAPÍTULO 3	14
3. Marco Teórico	14
3.1 METODOLOGÍA APLICADA	14
3.2 ENSAYOS PREVIOS.....	14
3.2.1 Agregado Grueso.....	14
3.2.2 Agregado Fino	22
3.2.3 Relave minero.....	29
3.3 DOSIFICACIÓN DE UNA MEZCLA	33
3.3.1 Datos iniciales	33
3.3.2 Granulometría de agregado fino con relave minero	35
3.3.3 Curva de Fuller.....	37
3.3.4 Relación de agregados.....	38
3.3.5 Contenido de Agregados	40
3.4 ENSAYOS DE CONCRETO FRESCO.....	43
3.4.1 Ensayo de Temperatura	44
3.4.2 Ensayo de Slump	44
3.4.3 Ensayo de Peso Unitario.....	45

3.4.4	Ensayo de Contenido de Aire	46
3.4.5	Encofrado de Probetas	47
3.5	ENSAYOS DEL CONCRETO ENDURECIDO	47
3.5.1	Ensayo de resistencia a la compresión.....	48
3.5.2	Ensayo de permeabilidad del concreto	49
CAPÍTULO 4		51
4.	Resultados.....	51
4.1	DOSIFICACIÓN DE LAS MEZCLAS	51
4.2	CONCRETO FRESCO	51
4.2.1	Trabajabilidad.....	51
4.2.2	Temperatura.....	52
4.2.3	Slump	54
4.2.4	Contenido de Aire.....	55
4.2.5	Peso Unitario	56
4.3	CONCRETO ENDURECIDO	57
4.3.1	Ensayo de Compresión	57
4.3.2	Ensayo de permeabilidad.....	61
4.3.3	Resistencia a la compresión vs Peso Unitario	64
4.3.4	Permeabilidad vs Peso unitario.....	65
4.3.5	Resistencia a la compresión vs Permeabilidad	66
5.	CONCLUSIONES.....	68
6.	RECOMENDACIONES	70
7.	Bibliografía.....	71
APÉNDICE A. PANEL FOTOGRÁFICO.....		75

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Inversión minera en el Perú 2005-2019.....	5
Figura 2. Derrame minero en Samanco	7
Figura 3. Derrame minero en Recuay	7
Figura 4. Tamizadora de agregado grueso	15
Figura 5. Curva Granulométrica del agregado grueso	17
Figura 6. Equipo para el ensayo de Peso específico y Absorción del agregado grueso	18
Figura 7. Ensayo de Peso Unitario del agregado grueso.....	20
Figura 8. Tamices para el agregado fino.....	23
Figura 9. Curva Granulométrica del agregado fino	25
Figura 10. Ensayo de Peso Unitario del agregado fino.....	27
Figura 11. Curva granulométrica del relave minero	30
Figura 12. Ensayo de peso específico y absorción del relave minero.....	30
Figura 13. Muestras de Humedad.....	32
Figura 14. Curva Granulométrica de agregado fino con 10% de relave minero.....	37
Figura 15. Curva Granulométrica de Fuller y mezcla de agregados.....	40
Figura 16. Ensayo de temperatura del concreto fresco	44
Figura 17. Ensayo de Slump del concreto fresco.....	45
Figura 18. Ensayo de Peso Unitario del concreto fresco	46
Figura 19. Ensayo de Contenido de Aire del concreto fresco.....	47
Figura 20. Ensayo de compresión axial	48
Figura 21. Permeámetro de carga variable	49
Figura 22. Concreto fresco	52
Figura 23. Temperatura por mezcla.....	53
Figura 24. Slump por mezcla.....	54
Figura 25. Contenido de aire por mezcla	55
Figura 26. Peso Unitario por mezcla	57
Figura 27. Resistencia a la compresión promedio por mezcla.....	60
Figura 28. Curva de resistencia a la compresión promedio por mezcla a 28 días.....	61
Figura 29. Permeabilidad promedio por mezcla	64
Figura 30. Resistencia a la compresión vs peso unitario	65
Figura 31. Permeabilidad vs Peso Unitario	66
Figura 32. Resistencia a la compresión vs Permeabilidad	67

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Ensayo de granulometría de la piedra.....	16
Tabla 2. Huso 67 de la piedra.....	17
Tabla 3. Ensayo de peso específico y humedad de absorción del agregado grueso.....	19
Tabla 4. Ensayo de peso unitario del agregado grueso.....	21
Tabla 5. Ensayo de humedad del agregado grueso.....	22
Tabla 6. Ensayo de granulometría del agregado fino.....	23
Tabla 7. Huso normalizado de agregado fino.....	24
Tabla 8. Ensayo de peso específico y humedad de absorción del agregado fino.....	26
Tabla 9. Ensayo de peso unitario del agregado fino.....	27
Tabla 10. Ensayo de humedad natural del agregado fino.....	28
Tabla 11. Ensayo de granulometría del relave minero.....	29
Tabla 12. Ensayo de peso específico y absorción del relave minero.....	31
Tabla 13. Ensayo de peso unitario del relave minero.....	32
Tabla 14. Ensayo de humedad natural del relave minero.....	33
Tabla 15. Datos iniciales de diseño del concreto.....	34
Tabla 16. Características físicas de los agregados.....	34
Tabla 17. Requisitos aproximados de agua de mezclado y contenido de aire para diferentes revenimientos y tamaños máximos de agregado.....	35
Tabla 18. Porcentaje que pasa la malla.....	38
Tabla 19. Granulometría de mezcla de agregados.....	39
Tabla 20. Dosificación de mezcla de 0.7 de a/c con 10% de relave minero sin corrección por humedad.....	42
Tabla 21. Dosificación de la mezcla de a/c de 0.7 con 10% de relave minero corregido por humedad	43
Tabla 22. Dosificaciones de mezclas de concreto para a/c de 0.7.....	51
Tabla 23. Temperatura ambiente.....	52
Tabla 24. Temperatura de la mezcla.....	52
Tabla 25. Ensayo de Slump por cada mezcla.....	54
Tabla 26. Ensayo de contenido de aire de cada mezcla.....	55
Tabla 27. Ensayo de peso unitario de cada mezcla.....	56
Tabla 28. Ensayo de compresión axial de cada probeta.....	58
Tabla 29. Ensayo de permeabilidad de cada probeta.....	62

LISTA DE SÍMBOLOS

<i>T.M.</i>	= Tamaño máximo
<i>M.F.</i>	= Módulo de finura
<i>w_a</i>	= Humedad de saturación
<i>w_o</i>	= Humedad natural
<i>P.E.</i>	= Peso Específico
<i>P.U.</i>	= Peso Unitario
<i>f'_c</i>	= Resistencia a la compresión del concreto
<i>a/c</i>	= Relación agua-cemento



CAPÍTULO 1

Introducción

La extracción de recursos mineros es considerada como una de las principales industrias del país pues el Perú es uno de los principales exportadores de materia prima mineral en el mundo. Esta actividad ha tenido un crecimiento acelerado cada año, en consecuencia, el número de minas de explotación de minerales aumentó considerablemente en los últimos años. El proceso de extracción de minerales consiste en la explotación en la que se obtiene la roca mineralizada de la mina correspondiente; a continuación, se realiza un proceso de concentración en la que se tritura la roca mineralizada mediante el uso de agua, aire y agentes químicos y se separa del mineral que se quiere obtener, el material restante de este proceso se denomina relave minero. Finalmente, estos relaves mineros son llevados a depósitos especiales de relaves para su futuro aislamiento (Consejo Minero, 2017).

En la actualidad no existe un uso comercial de este material sobrante y puede representar un gran peligro ambiental si no se maneja adecuadamente; en consecuencia, se han dado numerosos casos de desastres medioambientales por mala gestión en el aislamiento de estos relaves peligrosos los cuales contaminan el suelo y agua, y pueden afectar directamente a la vida animal, vegetal y humana que dependen de aguas superficiales para sobrevivir. Estos desechos poseen una alta concentración de metales pesados como hierro, cobre, plomo, entre otros; los cuales son considerados tóxicos pues puede afectar directamente al sistema inmune del organismo.

Este proyecto de investigación busca aprovechar el uso de desechos mineros en sustitución de agregado fino en mezclas para relleno minero. Este material es usado en minas

para mejorar la estabilidad perdida en la mina debido a las excavaciones, así como el sellado de esta al término de las actividades mineras.

Para determinar el buen comportamiento de este material, se estudiarán los resultados de los ensayos de resistencia a la compresión axial y permeabilidad; para ello, se añadirán diferentes concentraciones de relave minero en la composición de relleno fluido para una relación a/c de 0.7 mediante el procedimiento correcto sujeto a las normas estándares que se realizan en el país.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo general

Diseñar un relleno minero con relave minero en su dosificación y analizar cómo afecta las propiedades mecánicas del relleno minero

1.1.2 Objetivos específicos

- Analizar la resistencia a la compresión del relleno minero con diferentes porcentajes de relave minero como reemplazo de agregado fino para una relación a/c de 0.7
- Analizar la permeabilidad del relleno minero con diferentes concentraciones de relave minero como reemplazo de agregado fino para una relación a/c de 0.7
- Determinar el porcentaje óptimo de desecho minero presente en la dosificación del relleno minero de modo que no afecte considerablemente las propiedades mecánicas del concreto

1.2 HIPÓTESIS

Es posible utilizar relaves mineros como reemplazo de agregado fino en proporciones de modo de que no alteren considerablemente las propiedades mecánicas del relleno minero.

1.3 JUSTIFICACIÓN

La importancia de esta investigación es diseñar una mezcla de concreto que sea ecológico, sustentable, y ayude a aprovechar el uso de relaves mineros. A pesar de que existen alternativas que usan el relave en la composición de diferentes materiales de construcción, el uso de este material supone una retroalimentación en el ciclo de actividades mineras en la última etapa de explotación minera (relleno de socavones), puesto que aprovecha el mismo agregado que se obtiene de la explotación de minerales. De obtener un buen comportamiento de un relleno fluido con relave minero en su dosificación, se aprovechará considerablemente este agregado en el sector de minería. En caso de no desarrollar un método de aprovechamiento de los desechos mineros, los desastres ambientales producidos por este agregado seguirán incrementándose; estos desastres representan un peligro latente a la flora, fauna, suelo y salud de las personas cuando este se mezcla con ríos, fuentes de agua o hábitats presentes en el medio ambiente.

1.4 ALCANCES

En esta investigación, se buscó estudiar el efecto de diferentes concentraciones de relave minero presente en el concreto mediante pruebas de resistencia a la compresión orientado a concreto no estructural debido a que no se realizó un análisis de sustancias químicas. A su vez se realizó un ensayo de permeabilidad orientado a concreto permeable debido a limitaciones en tiempo y presupuesto para realizar el ensayo pertinente a un concreto convencional.

El alcance de este proyecto se vio limitada por la cantidad de material minero que se pudo conseguir para realizar esta investigación. Para aprovechar de manera óptima todo el

relave minero disponible, se decidió realizar dosificaciones de un concreto patrón de 245 kg/cm² y 3 mezclas que presentan un porcentaje de presencia 5%, 10% y 15% de relave en reemplazo de agregado fino.



CAPÍTULO 2

Estado del arte

2.1 ANTECEDENTES

2.1.1 Industria minera

El sector de la minería es uno de las principales actividades económicas del Perú, pues representa el 14% del PBI del país (El Peruano, 2018). Dicha industria minera ha tenido un crecimiento progresivo desde el año 2016 (Figura 1) y específicamente en el mes de enero del 2019, tuvo un crecimiento del 48% con respecto al mismo del año anterior lo cual supone un aumento de 335 millones de dólares (El Peruano, 2019). A pesar de representar un sector muy importante para el país, se ha evidenciado numerosos casos de negligencia que ocasionaron contaminación del medio ambiente por la deposición de minerales contaminantes.

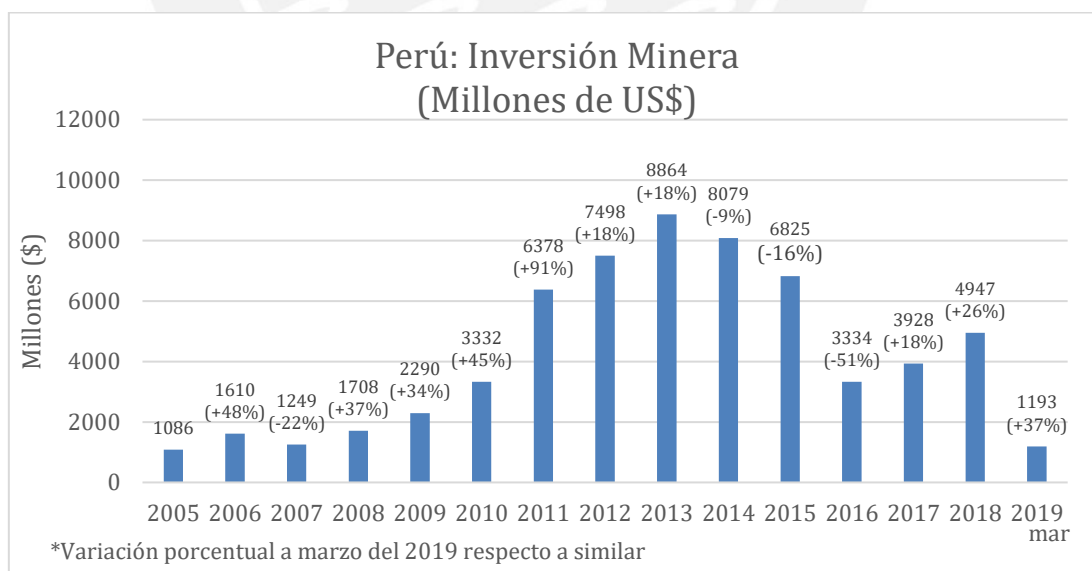


Figura 1. Inversión minera en el Perú 2005-2019

(Recuperado de: Ministerio de Energía y Minas (MINEM), 2019)

2.1.2 Contaminación por relaves mineros

El material remanente de la explotación minera puede contener altas concentraciones de elementos pesados como magnesio, cromo, hierro, cobre, zinc, cadmio, arsénico y plomo, los cuales no se degradan ni física ni químicamente resultando dañinos para el medio ambiente y/o seres vivos (Chiang, 1989). Al ser un material altamente tóxico, estos deben resguardarse en depósitos especiales aislados de modo que no interactúen directamente con el medio ambiente. A pesar de ello, existen diversos casos de negligencia por parte de las empresas mineras en el Perú que ocasionan desastres ambientales por contaminación de estos desechos mineros.

Áncash es una de las regiones que presenta mayor contaminación por la presencia relaves mineros en el medio ambiente. Tal es el caso del derrame registrado en el kilómetro 46 de la Panamericana Norte, en el ingreso del balneario Vesique en el distrito de Samanco, producto de la mina de la empresa M & S Transporte y Servicios Generales SRL (Huaraz Noticias, 2019). La Policía Nacional del Perú y el Ministerio Público establecieron la paralización de las actividades mineras hasta que la empresa garantice la contención del derrame minero con el fin de evitar que se produzca mayor contaminación en la zona, así como garantizar la seguridad de los trabajadores y los pobladores ubicados en zonas aledañas.



Figura 2. Derrame minero en Samanco

(Recuperado de: El Comercio, 2019)

También se dio el caso de una falla de la estructura del depósito de los relaves mineros que acabó con 50 mil metros cúbicos de relaves vertidos en la zona ubicada en el distrito Recuay, a cargo de la compañía minera Lincuna S.A. (Servindi, 2018). Este caso afectó 80 mil hectáreas de cultivo y afectó 110 familias que vivían en las zonas cercanas al desastre. Pese a que la empresa encargada fue notificada semanas antes del incidente sobre el peligro inminente que representaba el deficiente estado de la estructura del depósito, la empresa no tomó las medidas correspondientes para prevenir el desastre ambiental producido.



Figura 3. Derrame minero en Recuay

(Recuperado de: Observatorio de conflictos mineros en el Perú, 2018)

2.1.3 Relleno Minero

El relleno minero se utiliza para mejorar la sostenibilidad de la mina y sellar las excavaciones realizadas al finalizar las actividades mineras, por ende, mejora el proceso integral y de seguridad de los procesos de excavación. El uso de este tipo de relleno genera un menor impacto ambiental, un menor costo y mejora el ciclo de explotación minera.

2.2 USO DE RELAVE MINERO

En los últimos años se han desarrollado diversos estudios que buscan aprovechar el uso de relaves mineros en sistemas de relleno de minas y en la fabricación de diferentes materiales de construcción que utilizan este agregado en su composición.

2.2.1 Geopolimerización

Moukannaa et al. (2018) buscan reciclar el material minero con alto contenido de fosfato mediante la reacción química de este relave con metacaolin o cenizas volantes, este último es un producto importante para la fabricación de cemento, para obtener un geopolímero que podría reemplazar al cemento. Su estudio realizó ensayos de compresión en especímenes cúbicos de 5 cm³ con proporción de material minero con respecto a la ceniza volante o metacaolin de 50%. Los resultados de la investigación muestran una mejora en la resistencia a la compresión de los especímenes: cerca de 62 MPa en mezclas de relave de fosfato con cenizas volantes y 53 MPa en el caso de mezclas del relave minero con metacaolin. La geopolimerización de estas mezclas aprovecha en buena medida el contenido de relave de minero de fosfato y se podría utilizar como reemplazo del cemento para la elaboración de un concreto ecológico.

2.2.2 Sistema de relleno en minas

Peñaranda, Castañeda y Lezama (2015) desarrollaron un nuevo sistema de relleno para mejorar la estabilidad de los socavones de minas con el uso de mortero con presencia de relave minero y se concluye que este método permite aumentar la eficiencia de las actividades mineras. De esta manera, este nuevo método otorga un mejor sistema de seguridad en comparación al que se utiliza actualmente. Esta es una de las mejores alternativas en el aprovechamiento del material remanente de los procesos mineros, pues al utilizar el mismo desecho minero que se produce en el lugar, este proceso se convierte en una actividad sustentable, segura y ecológica.

2.2.3 Materiales de construcción

Taha et al. (2015) buscan reusar remanente minero de calamina y restos de vidrio en la fabricación de ladrillos, por lo cual estas unidades de albañilería son secadas y cocidas a 1020°C durante 5 horas, posteriormente se analizan sus propiedades físicas y mecánicas. Para los especímenes con presencia de relave de calamina, los resultados muestran que la porosidad y la capacidad de absorción de agua de las unidades aumentaron, cuando la concentración de agregado minero fue mayor; sin embargo, también se obtuvieron efectos negativos como el decaimiento a la resistencia a flexión y densidad. El estudio concluyó que para un porcentaje de 30% de relave de calamina en la composición de los ladrillos, se obtienen adecuadas propiedades físicas y mecánicas para el material, lo cual es un buen porcentaje y al ser un material que se usa comúnmente para la construcción de muros de albañería no estructurales, esta podría ser una buena solución para aprovechar este desecho.

Rojas y Ventura (2017) realizaron un estudio sobre la utilización de desecho minero en la elaboración de bloques de concreto “tipo ensamblable” para la construcción de viviendas de bajo costo. En su estudio, se concluyó que se puede reemplazar de manera significativa el agregado fino por relave minero; la concentración ideal de reemplazo de agregado fino fue de 50% y se obtuvieron valores para su resistencia a la compresión superiores a los 70 kg/cm² necesarios, según lo describe la norma correspondiente NTP 399.602:2017 (2017). Esta alternativa, para utilizar relave minero, es bastante viable pues se aprovecha gran cantidad de este material en la fabricación de este tipo de bloques de concreto.

Milla (2018) realiza un estudio para incorporar relave minero en la composición del adobe, el cual reemplaza tierra por relave minero para medir su resistencia a la compresión; este estudio supone que ante un aumento en la cantidad de relave minero - hasta un 30% donde llegó el estudio - se incrementa la resistencia a la compresión hasta en un 90% con respecto al adobe convencional. Esta investigación muestra mejorías en las características de resistencia del adobe tradicional debido a la presencia de este desecho, de modo que es una mejor alternativa al aprovechar grandes cantidades de relave minero.

Estas alternativas concluyen que se pueden utilizar relaves mineros en la fabricación de diversos materiales de construcción; sin embargo, estos materiales no son tan utilizados en el sector de construcción civil como el concreto, por lo que no generan un gran impacto ecológico en el aprovechamiento de este agregado.

2.2.4 Concreto de alta resistencia

Anicama (2010) propone reemplazar cemento por relave minero en concreto destinado para losas de piso o veredas, para este estudio realizó ensayos de resistencia a la compresión

con diferentes proporciones de relave minero provenientes de diferentes canteras en su dosificación. El autor concluye que se puede reemplazar en un porcentaje menor al 5% de cemento por relave minero sin alterar las propiedades físicas del concreto y hasta en un 25% de reemplazo de resistencia menores a 100 kg/cm^2 . Si bien se estudia diferentes relaves mineros provenientes de diferentes minas, la producción máxima promedio del agregado minero que se puede utilizar resultó ser de 5% lo cual no es significativo para poder considerarlo como una alternativa viable al momento de evaluar el proceso de obtención de este agregado en obra.

En el estudio de Onuaguluchi y Eren (2012), se reemplazó el desecho minero de cobre en lugar de arena en la dosificación de diferentes mezclas de concreto, obteniendo como resultado que con un porcentaje no mayor de 5% de relave minero de cobre presente en la mezcla de concreto mejora las propiedades físicas del concreto (resistencia a la abrasión, a la compresión axial y tensión). A su vez demostraron que la presencia de metales pesados en los lixiviados fue significativamente menor al límite que exige la norma correspondiente. Mejorar estas propiedades podría resultar muy útil en la utilización de este material en la construcción de obras civiles ubicadas en zonas de condiciones extremas por abrasión, pues se necesitan consideraciones especiales para ello.

Se señaló que el contenido de aire aumentó en relación al incremento de la concentración de relave minero. Esta característica ayuda contra el efecto de hielo y deshielo de modo que se puede utilizar en construcciones ubicadas a gran altura. Por otro lado, el slump se redujo conforme la mezcla tenía mayor concentración de material minero, esta reducción en el slump supone que la mezcla de concreto sea más difícil de trabajar y aumenta considerablemente el tiempo de vaciado. Una buena solución para reducir los aspectos

negativos del estudio sería añadir un aditivo plastificante que ayuda a mejorar la trabajabilidad de la mezcla.

Calderón y Umiña (2015) desarrollaron un experimento que consiste en la estabilización de una reacción química que incluye relave minero con material zeolítico y una solución alcalina activante con el fin de generar un geopolímero capaz de reemplazar al cemento. El proyecto de investigación muestra resultados favorables en la geopolimerización de la mezcla y se obtiene como valor máximo de resistencia a la compresión del concreto de 310 kg/cm^2 con una presencia de 55% de relave minero. En este proyecto, se logra utilizar gran porcentaje de relave remanente en dosificaciones de alta resistencia; sin embargo, el procedimiento para estabilizar el relave es muy extenso, complicado y puede variar conforme a las diferentes concentraciones de metales pesados presentes en el relave, en consecuencia, se tendría que realizar numerosos ensayos antes de poder utilizar la mezcla y no sería viable para el sector de construcción.

Cáceres & Larico (2017) diseñan mezclas de concreto con diferentes resistencias a la compresión, variando la concentración de relave minero como reemplazo de cemento. Así, concluyen que a medida que se requiera mayor resistencia a la compresión del concreto, menor será la proporción de presencia de relave minero en la mezcla. Para una resistencia a la compresión de $f^c=175 \text{ kg/cm}^2$ se puede adicionar hasta 6% de relave minero sin afectar sus propiedades, para $f^c=210 \text{ kg/cm}^2$ solo se puede usar hasta un 3% de este agregado, y para una resistencia de $f^c=245 \text{ kg/cm}^2$ no se logró llegar a la resistencia mínima. Esta investigación estima un bajo porcentaje de presencia de relave minero en las mezclas, en consecuencia, no se podría considerar como una mejor alternativa en comparación a la fabricación de concreto convencional.

En general, se logra utilizar una pequeña proporción de remanente minero en mezclas de concreto de alta resistencia; sin embargo, al momento de considerar el proceso de obtención de este agregado para utilizar en mezclas, puede aumentar el costo de fabricación del concreto por lo cual no sería conveniente su uso en obras.



CAPÍTULO 3

Marco Teórico

3.1 METODOLOGÍA APLICADA

La metodología de la presente tesis es cuantitativa pues se basa en la comparación de resultados de los ensayos de las mezclas patrón de concreto con las mezclas de concreto con relave minero incluido en la dosificación en diferentes porcentajes y así analizar el impacto de la implementación de relave minero en las mezclas. Los ensayos a realizar se basan en la resistencia a la compresión axial y permeabilidad. Estos ensayos se realizarán para porcentajes de reemplazo de arena por relave minero de 5%, 10% y 15% presente en la mezcla. La mezcla patrón a realizar tendrá una dosificación para asegurar una resistencia mínima de 245 kg/cm².

3.2 ENSAYOS PREVIOS

Para asegurar una correcta dosificación de las mezclas a realizar es necesario caracterizar los agregados (piedra chancada, arena y relave) y determinar sus propiedades. Estos ensayos previos se realizaron en el Laboratorio de Mecánica de Suelos de la PUCP.

3.2.1 Agregado Grueso

3.2.1.1 Granulometría

Se realiza el ensayo de granulometría para agregado grueso con el procedimiento indicado en la norma ASTM C33/C33M (2018). Se estima el peso de la muestra por cuarteo. Se coloca la muestra en la tamizadora por 3 minutos y se obtiene el peso retenido del agregado en cada tamiz (3", 2 1/2", 2", 1 1/2" 1", 3/4", 1/2", 3/8" y N°4).



Figura 4. Tamizadora de agregado grueso

Elaboración propia



Tabla 1. Ensayo de granulometría de la piedra**Elaboración propia**

Malla	mm	Material Retenido Acumulado	Material Retenido Acumulado (%)	Material Pasa Acumulado (%)
3"	76.1	0.000	0.0%	100.0%
2 1/2"	61	0.000	0.0%	100.0%
2	50.8	0.000	0.0%	100.0%
1 1/2"	38.1	0.000	0.0%	100.0%
1	25.4	0.000	0.0%	100.0%
3/4"	19	0.420	3.7%	96.3%
1/2"	12.7	7.373	65.5%	34.5%
3/8"	9.51	10.314	91.7%	8.3%
#4	4.76	11.249	100.0%	0.0%
<4		11.249	100.0%	0.0%
Total		11.249		

Inicialmente se tuvo un peso inicial del agregado de 11.325 kg, al determinar el porcentaje de error y el tamaño máximo del agregado, definido como la malla en retener el 15% de agregado, se obtiene:

$$Error (\%) = \frac{Peso_{inicial} - Peso_{final}}{Peso_{inicial}} * 100\% \quad (1)$$

De la ecuación 1 se obtiene un porcentaje de error del 1% y un tamaño máximo del agregado de 3/4".

Finalmente se obtiene la curva granulométrica del agregado grueso.

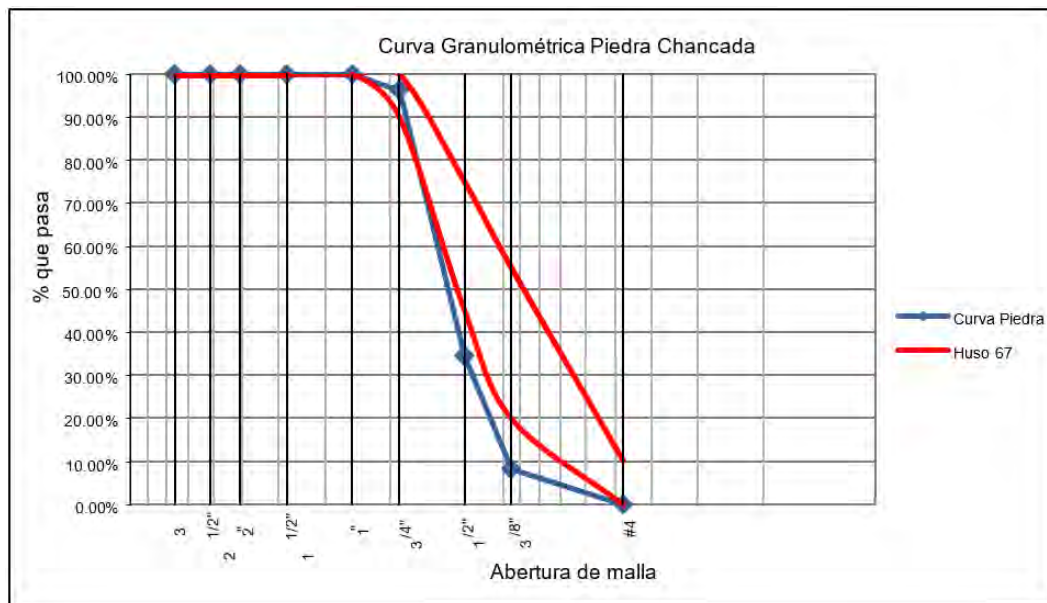


Figura 5. Curva Granulométrica del agregado grueso

Elaboración propia

Se compara este agregado grueso con el huso 67, el cual presenta los siguientes rangos para su granulometría.

Tabla 2. Huso 67 de la piedra

Elaboración propia

Malla	Pasa Min
2	-
1 1/2	-
1	100%
3/4	90%-100%
1/2	-
3/8	20%-55
4	0%-5%

3.2.1.2 *Peso Específico y Absorción*

Los procedimientos seguidos para estos ensayos se especifican en la norma ASTM C127 (2015) para el agregado grueso.

En primer lugar, se debe llegar al estado de saturación del agregado, por lo que se debe estar sumergido en agua al menos 24 horas para proceder a realizar cualquier ensayo. Una vez que el agregado esté saturado se procede a secar superficialmente la muestra para obtener el estado saturado superficialmente seco (SSS). Se determina el peso de la muestra SSS, se coloca en una cesta y se sumerge en agua, se obtiene el peso del agregado SSS sumergido para estimar el volumen de agua desplazada por el agregado. Se seca el agregado en el horno a $110^{\circ}\text{C} \pm 4^{\circ}\text{C}$ durante 24 horas y se obtiene el peso del agregado seco.



Figura 6. Equipo para el ensayo de Peso específico y Absorción del agregado grueso

Elaboración propia

Para determinar el peso específico y absorción del agregado se utilizan las siguientes fórmulas:

$$P.E. = \frac{Peso_{agregado\ seco}}{Peso_{agregado\ SSS} - Peso_{SSS\ sumergido}} \quad (2)$$

$$Agua\ de\ absorción = Peso_{agregado\ SSS} - Peso_{agregado\ seco} \quad (3)$$

$$wa = \frac{Agua\ de\ absorción}{Peso_{agregado\ seco}} \quad (4)$$

Tabla 3. Ensayo de peso específico y humedad de absorción del agregado grueso
Elaboración propia

	Muestra N°	
	1	2
Peso agregado SSS+ + bandeja (g)	2253	2459
Peso bandeja (g)	650	650
Peso agregado SSS (g)	1603	1809
Peso agregado SSS + cesta (g)	1775.1	1903
Peso cesta sumergida (g)	757.4	757.4
Peso agregado SSS Sumergido (g)	1017.7	1145.6
Peso agregado seco + bandeja (g)	1814	1960
Peso bandeja (g)	225.43	169.87
Peso agregado seco (g)	1588.57	1790.13
Volumen agregado SSS (L)	585.3	663.4
Peso Específico (ton/m ³)	2.714	2.698
Agua de absorción (g)	14.43	18.87
Humedad de absorción (%)	0.91%	1.05%

Reemplazando los datos obtenidos en las fórmulas 2, 3 y 4 se obtienen valores promedio para el peso específico de la piedra de 2.967 ton/m^3 y para la humedad de absorción de 0.98%.

3.2.1.3 *Peso Unitario*

Se realiza el procedimiento descrito en la norma ASTM C29/C29M, (2017). El peso unitario suelto se obtiene al llenar un recipiente de agregado hasta el tope, enrasar y determinar el peso del agregado. Para el peso unitario varillado se llena de agregado el recipiente en 3 capas, en cada capa se dan 25 golpes con varilla para luego enrasar la última capa, se estima el peso del agregado. Finalmente se divide el peso del agregado en el recipiente entre el volumen del recipiente para calcular el peso unitario.



Figura 7. Ensayo de Peso Unitario del agregado grueso

Elaboración propia

Tabla 4. Ensayo de peso unitario del agregado grueso**Elaboración propia**

	Suelto		Varillado	
	Peso agregado + recipiente (kg)	21.126	21.235	22.561
Peso recipiente (kg)	7.155	7.155	7.155	7.155
Peso agregado (kg)	13.971	14.08	15.406	15.281
Volumen recipiente (L)	0.00942	0.00942	0.00942	0.00942
Peso unitario (ton/m ³)	1483	1495	1635	1622

Se obtiene valores promedio para la piedra chancada de 1.489 ton/m³ para el peso unitario suelto y 1.629 ton/m³ para el peso unitario varillado.

3.2.1.4 *Humedad Natural*

Para este ensayo se siguió el procedimiento descrito en la norma ASTM C566 (2019). Se determina el peso del agregado en estado natural y se deja en el horno a una temperatura de 110°C +/- 4°C durante 24 horas. Se vuelve a pesar el agregado y se calcula el contenido de agua en la piedra.

$$Cantidad\ de\ agua = Peso_{agregado\ en\ EN} - Peso_{agregado\ seco} \quad (5)$$

$$w_o = \frac{Cantidad\ de\ agua}{Peso_{agregado\ seco}} \quad (6)$$

Tabla 5. Ensayo de humedad del agregado grueso**Elaboración propia**

Peso agregado en EN + bandeja (kg)	2.768	2.850
Peso de la bandeja (kg)	0.213	0.217
Peso agregado seco + bandeja (kg)	2.752	2.832
Cantidad de agua en el agregado (kg)	0.016	0.018
Peso agregado seco (kg)	2.539	2.615
Humedad Total (%)	0.63%	0.69%

De las fórmulas 5 y 6 se obtiene un contenido de humedad natural de la piedra promedio de 0.66%.

3.2.2 Agregado Fino

3.2.2.1 Granulometría

Para este ensayo la norma ASTM C33/C33M (2018) estipula que el agregado debe estar en estado seco para tamizarlo, se toma como mínimo 500 g de agregado fino y se tamiza por las mallas 3/8", N°4, N°8, N°16, N°30, N°50, N°100 Y N°200. Se pesa el peso de agregado retenido en cada malla y se estima su granulometría.



Figura 8. Tamices para el agregado fino

Elaboración propia

Tabla 6. Ensayo de granulometría del agregado fino

Elaboración propia

Malla	mm	Material Retenido Acumulado	Material Retenido Acumulado (%)	Material Pasa Acumulado (%)
3/8"	9.510	0	0.0%	100.0%
#4	4.760	13.96	2.1%	97.9%
#8	2.380	128.07	19.7%	80.3%
#16	1.190	273.55	42.1%	57.9%
#30	0.595	402.26	61.9%	38.1%
#50	0.297	528.22	81.3%	18.7%
#100	0.149	617.41	95.1%	4.9%
#200	0.074	642.93	99.0%	1.0%
<#200		649.39	100.0%	0.0%
Total		649.39		

Se comparan estos resultados con el huso normalizado para la arena para el diseño de mezclas (Tabla 7).

Tabla 7. Huso normalizado de agregado fino

Fuente: ASTM C33/C33M (2018)

Malla	Material Pasa Acumulado (%)
3/8"	100%-100%
#4	95%-100%
#8	80%-100%
#16	50%-85%
#30	25%-60%
#50	5%-30%
#100	0%-10%
#200	0%-3%

El peso inicial de este ensayo fue de 653.58, por lo tanto, el error de este ensayo fue 0.64%.

Para calcular el módulo de finura del agregado, se suman los porcentajes de material retenido en cada malla (3/8" a la N°100) y se divide entre 100. Se obtiene un módulo de finura de la arena de 3.02.

Finalmente, se obtiene la curva granulométrica de la arena.

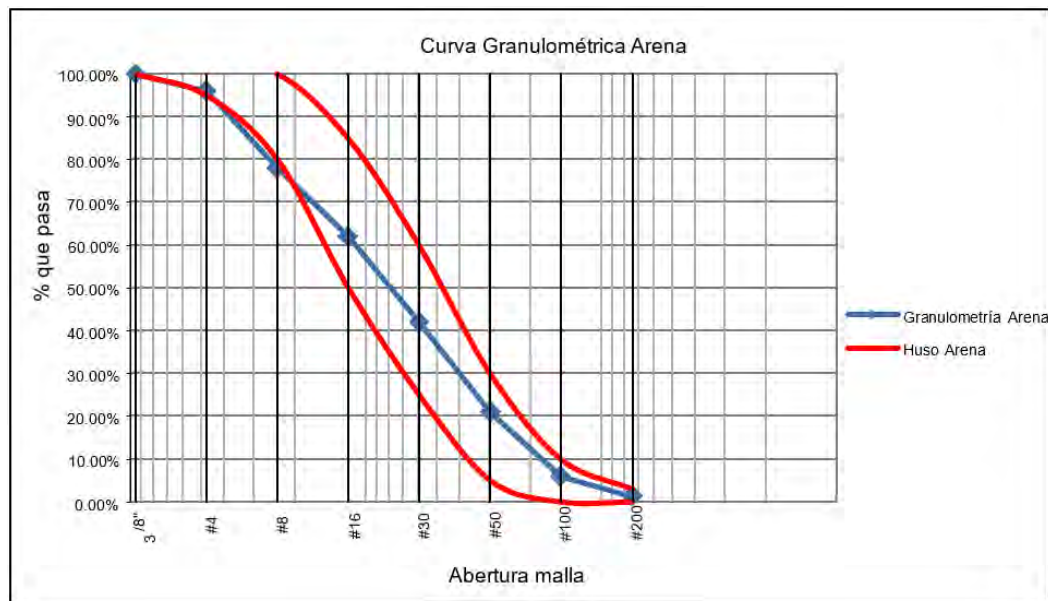


Figura 9. Curva Granulométrica del agregado fino

Elaboración propia

3.2.2.2 *Peso Específico y Absorción*

Según la norma ASTM C128 (2015) se debe obtener el agregado fino en el estado saturado superficialmente seco (SSS). Para ello, se añade agua al agregado, se vierte la arena en el molde sobre una superficie de vidrio, se dan 25 golpes con el pistón en la parte superior y se verifica si se desmorona con un golpe en la bandeja. Una vez alcanzado el estado SSS se toma una muestra de 500 g y se vierte en un picnómetro, se llena de agua y se procede a eliminar todo el aire atrapado. Se calcula el peso del picnómetro con arena y agua lleno hasta la marca y el peso del picnómetro con agua hasta la misma marca. Se lleva a un horno con temperatura de 110°C +/- 4°C durante 24 horas y se obtiene el peso del agregado.

Para calcular el peso específico y la humedad de absorción, se utilizan las siguientes fórmulas:

$$Volumen_{agregado\ SSS}$$

$$= Peso_{agregado\ SSS} + Peso_{picnómetro+agregado\ SSS+agua} - Peso_{picnómetro+agua} \quad (7)$$

$$P.E. = \frac{Peso_{agregado\ seco}}{Volumen_{agregado\ SSS}} \quad (8)$$

Tabla 8. Ensayo de peso específico y humedad de absorción del agregado fino
Elaboración propia

	Muestra N°		
	1	2	3
Peso agregado SSS (g)	500	500	500
Peso picnómetro + agregado SSS + agua (g)	970.00	970.04	970.58
Peso picnómetro + agua (g)	657.64	659.27	657.64
Peso agregado seco + bandeja (g)	716.11	718.07	716.99
Peso bandeja (g)	224.2	226.4	225.88
Peso agregado seco (g)	491.91	491.67	491.11
Volumen agregado SSS (L)	187.64	189.23	187.06
Peso Específico (ton/m ³)	2.622	2.598	2.625
Agua de absorción (g)	8.09	8.33	8.89
Humedad de absorción (%)	1.64%	1.69%	1.81%

Con el uso de las ecuaciones 3, 4, 7 y 8 se obtienen valores promedio para el peso específico de la arena de 2.615 ton/m³ y para la humedad de absorción de 1.72%.

3.2.2.3 *Peso Unitario*

El procedimiento realizado esta descrito en la norma ASTM C29/C29M (2017). Este procedimiento es parecido al ensayo para estimar el peso unitario de la piedra con la diferencia de que se utiliza un recipiente de menor volumen.



Figura 10. Ensayo de Peso Unitario del agregado fino

Elaboración propia

Tabla 9. Ensayo de peso unitario del agregado fino

Elaboración propia

	Suelto		Varillado	
	Peso agregado + recipiente (kg)	8.030	8.027	8.677
Peso recipiente (kg)	3.050	3.050	3.050	3.050
Peso agregado (kg)	4.980	4.977	5.627	5.640
Volumen recipiente (m3)	0.00315	0.00315	0.00315	0.00315
Peso unitario (kg/m3)	1581	1580	1786	1790

Se obtiene valores promedio del agregado fino de 1.580 ton/m³ para el peso unitario suelto y 1.788 ton/m³ para el peso unitario varillado.

3.2.2.4 *Humedad Natural*

El procedimiento para este ensayo está basado en la norma ASTM C566 (2019). Se selecciona una muestra de agregado fino y se estima su peso, se lleva al horno a una temperatura de 110 °C +/- 4 °C durante 24 horas. Se vuelve a pesar el agregado y se calcula el contenido de agua en la arena.

Tabla 10. Ensayo de humedad natural del agregado fino

Elaboración propia

Peso agregado en EN + bandeja (kg)	2.768	2.850
Peso de la bandeja (kg)	0.213	0.217
Peso agregado seco + bandeja (kg)	2.752	2.832
Cantidad de agua en el agregado (kg)	0.016	0.018
Peso agregado seco (kg)	2.539	2.615
Humedad Total (%)	0.630%	0.688%

De igual manera que la piedra chancada, se utilizan las fórmulas 5 y 6 para determinar la humedad natural promedio de la arena. Se obtiene un valor promedio de 0.66%.

Al ser el agregado fino susceptible a la humedad del ambiente se realizarán ensayos de humedad del agregado fino un día antes de la realización de las mezclas de concreto.

3.2.3 Relave minero

3.2.3.1 Granulometría

El procedimiento para estimar la granulometría del relave minero será el mismo que se siguió para el ensayo de granulometría de la arena descrita en la norma ASTM C33/C33M (2018).

Tabla 11. Ensayo de granulometría del relave minero
Elaboración propia

Malla	mm	Material Retenido Acumulado	Material Retenido Acumulado (%)	Material Pasa Acumulado (%)
3/8"	9.510	17.15	2.9%	97.1%
#4	4.760	100.54	16.8%	83.2%
#8	2.380	225.17	37.5%	62.5%
#16	1.190	343.72	57.3%	42.7%
#30	0.595	437.92	73.0%	27.0%
#50	0.297	507.9	84.6%	15.4%
#100	0.149	566.26	94.4%	5.6%
#200	0.074	591.24	98.5%	1.5%
<#200		600.12	100.0%	0.0%
Total		600.12		

El peso inicial de la muestra de relave minero fue de 600.74 g por lo que el error del ensayo fue de 0.10% y el módulo de finura del relave obtenido es 3.64.

Se obtiene la curva granulométrica del relave minero.

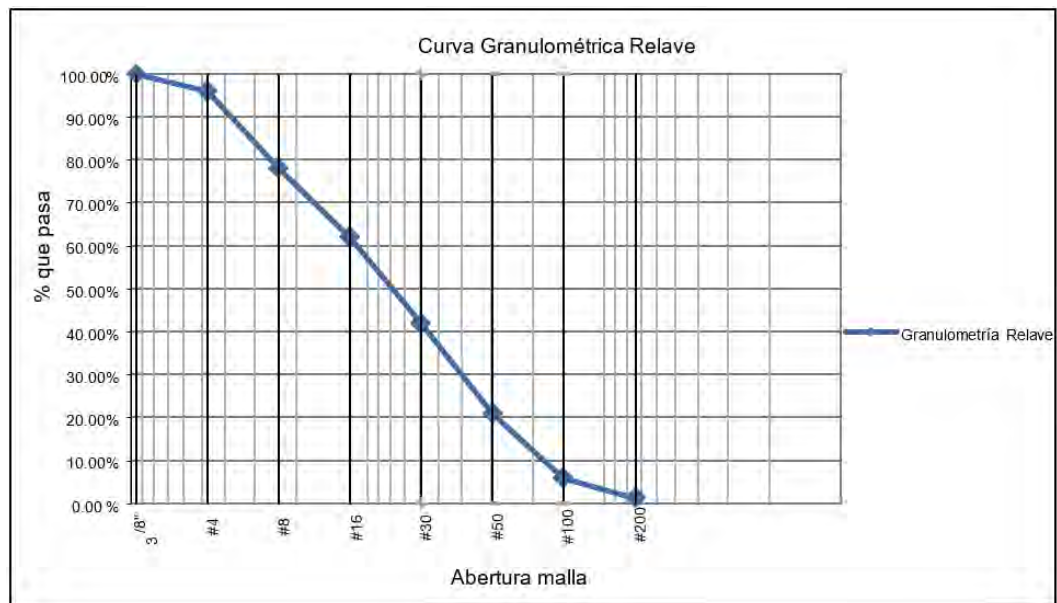


Figura 11. Curva granulométrica del relave minero

Elaboración propia

3.2.3.2 *Peso Específico y Absorción*

El procedimiento para estimar el peso específico y la humedad de absorción del relave minero será el mismo que el de la arena, estipulado en la norma ASTM C128 (2015).



Figura 12. Ensayo de peso específico y absorción del relave minero

Elaboración propia

Tabla 12. Ensayo de peso específico y absorción del relave minero**Elaboración propia**

	Muestra N°		
	1	2	3
Peso agregado SSS (g)	500	500	500
Peso picnómetro + agregado SSS + agua (g)	1006.04	1006.86	1009.96
Peso picnómetro + agua (g)	655.81	657.64	659.27
Bandeja para secado N°	T12	T5	T76
Peso agregado seco + bandeja (g)	675.63	672.97	717.4
Peso bandeja (g)	183.650	180.900	225.350
Peso agregado seco (g)	491.98	492.07	492.05
Volumen agregado SSS (L)	149.77	150.78	149.31
Peso Específico (ton/m ³)	3.285	3.263	3.295
Agua de absorción (g)	8.02	7.93	7.95
Humedad de absorción (%)	1.63%	1.61%	1.62%

Se obtiene un valor promedio para el peso específico del relave minero de 3.281 ton/m³ y una humedad de absorción de 1.62%.

3.2.3.3 *Peso Unitario*

El procedimiento realizado se basa en la norma ASTM C128 (2015) igual que el ensayo para el agregado fino.

Tabla 13. Ensayo de peso unitario del relave minero**Elaboración propia**

	Suelto		Varillado	
	Peso agregado + recipiente (kg)	10.075	10.078	10.614
Peso recipiente (kg)	3.050	3.050	3.050	3.050
Peso agregado (kg)	7.025	7.028	7.564	7.443
Volumen recipiente (m3)	0.00315	0.00315	0.00315	0.00315
Peso unitario (kg/m3)	2230	2231	2401	2363

Se obtiene un valor promedio de peso unitario suelto de 2.23 ton/m³ y un peso unitario varillado de 2.83 ton/m³ para el relave minero.

3.2.3.4 *Humedad Natural*

El procedimiento a realizar se detalla en la norma ASTM C566 (2019) y es igual al agregado fino.

**Figura 13. Muestras de Humedad****Elaboración propia**

Tabla 14. Ensayo de humedad natural del relave minero**Elaboración propia**

Peso agregado en EN + bandeja (g)	637.09	608.99	638.69
Peso de la bandeja (g)	137.09	109.39	138.69
Peso agregado seco + bandeja (g)	633.03	604.98	634.74
Cantidad de agua en el agregado (g)	4.060	4.010	3.950
Peso agregado seco (g)	495.94	495.59	496.05
Humedad Total (%)	0.819%	0.809%	0.796%

Se obtiene una humedad natural promedio del relave minero de 0.81%.

Al igual que el agregado fino el relave minero también es susceptible a la humedad del ambiente, en consecuencia, se realizarán ensayos de humedad un día antes de realizar las mezclas de concreto.

3.3 DOSIFICACIÓN DE UNA MEZCLA

Para realizar los ensayos correspondientes se debe realizar la dosificación de las mezclas para calcular la cantidad de materiales presentes: agua, cemento, agregado grueso, agregado fino, relave minero y aditivo. Debido a las características granulométricas de los agregados y el uso del agregado minero, estos no están dentro de los husos normalizados, por lo tanto, se utilizará el método de Fuller para estimar la cantidad de los materiales que se necesitarán.

3.3.1 Datos iniciales

Se realizará el procedimiento de una dosificación guía de una mezcla de concreto de relación a/c de 0.7 y una presencia de desecho minero del 10% de volumen de agregado fino.

Se toma como datos el slump de diseño, la relación a/c de la mezcla, el tipo de cemento a utilizar y las características físicas de los agregados (grueso, fino y relave).

Adicionalmente se utilizará el aditivo plastificante MasterRheobuild 1003 en una dosificación recomendada por el fabricante de 9 ml/kg de cemento para mejorar la trabajabilidad de la mezcla.

Tabla 15. Datos iniciales de diseño del concreto

Elaboración propia

Tipo de cemento	Slump	a/c	Plastificante (ml/kg de cemento)
Sol Tipo I de 3150 kg/m ³	6"-8"	0.7	9

Tabla 16. Características físicas de los agregados

Elaboración propia

Agregado	T.M.	M.F.	wa	wo	P.E. (seco)	P.U. Varillado	P.U. Suelto
Piedra	3/4" (19 mm)	-	0.98	0.66	2.70	1.63	1.49
Arena	-	3.02	1.83	5.31	2.62	1.79	1.58
Relave	-	3.64	1.62	0.81	3.28	2.23	3.28

A partir de los datos anteriores se estiman las cantidades de los componentes de la mezcla de concreto correspondiente.

Tabla 17. Requisitos aproximados de agua de mezclado y contenido de aire para diferentes revenimientos y tamaños máximos de agregado

Recuperado de: ACI 211.1-91 (2009)

Revenimiento (cm)	Agua en kg/m ³ de concreto para los tamaños máximos nominales en mm.						
	10	12.5	19	25	40	50	75
Concreto sin aire incluido							
3 a 5	205	200	185	180	160	155	145
8 a 10	225	215	200	195	175	170	160
5 a 18	240	230	220	205	185	180	170
	3.0	2.5	2.0	1.5	1.0	0.5	0.3
Concreto con aire incluido							
3 a 5	180	175	165	160	145	140	135
8 a 10	200	190	180	175	160	155	150
5 a 18	215	205	185	185	170	165	160
Promedio recomendado de contenido total de aire (%)							
Exposición							
Ligera	4.5	4.0	3.5	3.0	2.5	2.0	1.5
Moderada	6.0	5.5	5.0	4.5	4.5	4.0	3.5
Severa	7.5	7.0	6.0	6.0	5.5	5.0	4.5

De acuerdo a la tabla 17, para un slump de diseño de 6"-8" y un tamaño máximo del agregado grueso de 19 mm (3/4") se obtiene 220 kg de agua y la mezcla tendrá aproximadamente 1.5% de aire atrapado del volumen total. Adicionalmente se utiliza el aditivo plastificante MasterRheobuild 1003 para mejorar la trabajabilidad de la mezcla, según las especificaciones técnicas del aditivo se recomienda utilizar 9 ml por cada kilogramo de cemento a utilizar. Debido a la adición de este aditivo se disminuye en 10% el contenido de agua presente en la mezcla. Con la cantidad de agua necesaria y la relación agua-cemento de 0.7 se obtiene 283 kg de cemento.

3.3.2 Granulometría de agregado fino con relave minero

Se debe estimar la granulometría de la mezcla de arena con el relave minero para utilizar el método de Fuller. Al tener la proporción en volumen de relave minero/agregado fino y el peso específico de ambos agregados, es posible determinar la relación en peso de estos agregados:

$$\frac{w_{R.M.}}{w_a} = \frac{V_{R.M.} * P.E._{R.M.}}{V_a * P.E._a} \quad (9)$$

$$V_{R.M.} = 0.1 * V_a \quad (10)$$

Siendo:

w_a : Peso de la arena

V_a : Volumen de arena

$P.E._a$: Peso Específico de la arena

$w_{R.M.}$: Peso de relave minero

$V_{R.M.}$: Volumen de relave minero

$P.E._{R.M.}$: Peso Específico del relave minero

A partir de las ecuaciones 9 y 10 se obtiene para un porcentaje de reemplazo del 10% de volumen de arena como relave minero, un porcentaje de 12.55% del peso de arena como relave minero.

Con este valor se puede ponderar los valores de porcentajes que pasan cada malla en la curva granulométrica:

$$\frac{100}{(100 + 12.55)} * P_a + \frac{12.5}{(100 + 12.55)} * P_{R.M.} = P_{ag} \quad (11)$$

Siendo:

P_a : Porcentaje que pasa una malla de arena

$P_{R.M.}$: Porcentaje que pasa una malla de relave minero

Pag: Porcentaje que pasa de la mezcla de arena y relave minero

De la ecuación 11 se obtiene la curva granulométrica de la mezcla de agregado fino y 10% de relave minero.

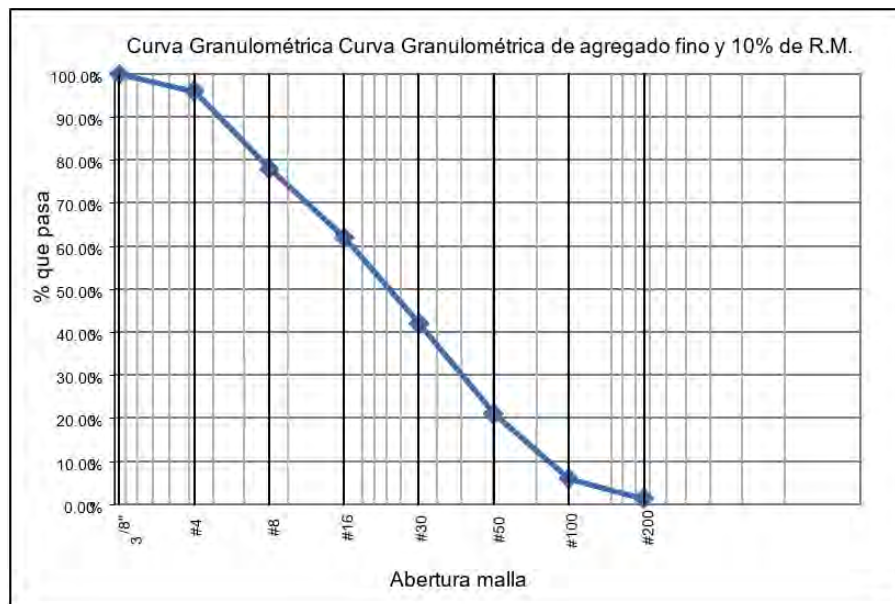


Figura 14. Curva Granulométrica de agregado fino con 10% de relave minero

Elaboración propia

Se obtiene el módulo de finura de cada mezcla de arena y relave minero:

Arena + Relave minero (5%): MF=3.06

Arena + Relave minero (10%): MF=3.09

Arena + Relave minero (15%): MF=3.12

3.3.3 Curva de Fuller

Para calcular la curva de Fuller se utiliza la siguiente fórmula:

$$Pd = \sqrt{\frac{d}{D}} \quad (12)$$

Siendo:

Pd: Porcentaje que pasa de la curva de Fuller

d: Tamaño de la abertura una malla de la mezcla de agregado fino con relave minero

D: Abertura del tamaño máximo del agregado grueso

Tabla 18. Porcentaje que pasa la malla

Elaboración propia

Pd = Porcentaje que pasan en malla "d"															
Malla ASTM	3"	2"	1-1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	#4	#8	#16	#30	#50	#100	#200	M.F
Abertura (mm)	76.2	50.8	38.1	25.4	19.05	12.7	9.525	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075	
Arena y relave: a		100.00	100.0	100.0	100.0	100.0	99.7	96.3	78.3	56.2	36.9	18.3	5.0	1.0	3.09
Grava: G	100.0	100.0	100.0	100.0	92.0	16.0	2.0	0.0	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	7.06

3.3.4 Relación de agregados

La relación entre agregado grueso y agregado fino con relave se determina con las siguientes fórmulas:

$$a + g = 100 \quad (13)$$

$$MF_a * a + MF_g * g = MF_1 * (a + g) \quad (14)$$

Siendo:

a: Porcentaje de la mezcla de arena con relave minero

g: Porcentaje de piedra

MF_a: Módulo de finura de la mezcla de arena con relave minero

MF_g: Módulo de finura de la piedra

MF₁: Módulo de finura de la curva de Fuller

Despejando ambas ecuaciones se obtiene: $a=0.45$, $G=0.55$.

Adicionalmente se agrega un 5% de agregado fino como factor de reajuste para la curva de Fuller.

Se obtiene: $a=0.50$, $G=0.50$.

Tabla 19. Granulometría de mezcla de agregados

Elaboración propia

Malla ASTM		2"	1-1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	#4	#8	#16	#30	#50	#100	#200
Fuller	1		100.0	100.0	86.6	70.7	61.2	43.2	30.5	21.6	15.4	10.9	7.7	5.4
M: a+G	0.45	0.55	100.0	100.0	95.6	53.8	46.0	43.3	35.2	25.3	16.6	8.2	2.3	0.5
M: a+G (correg)	0.50	0.50	100.0	100.0	96.0	58.0	50.9	48.1	39.2	28.1	18.4	9.2	2.5	0.5

De las ecuaciones 12, 13 y 14 se obtienen las curvas granulométricas de Fuller, mezcla de agregados y mezcla de agregados corregido:

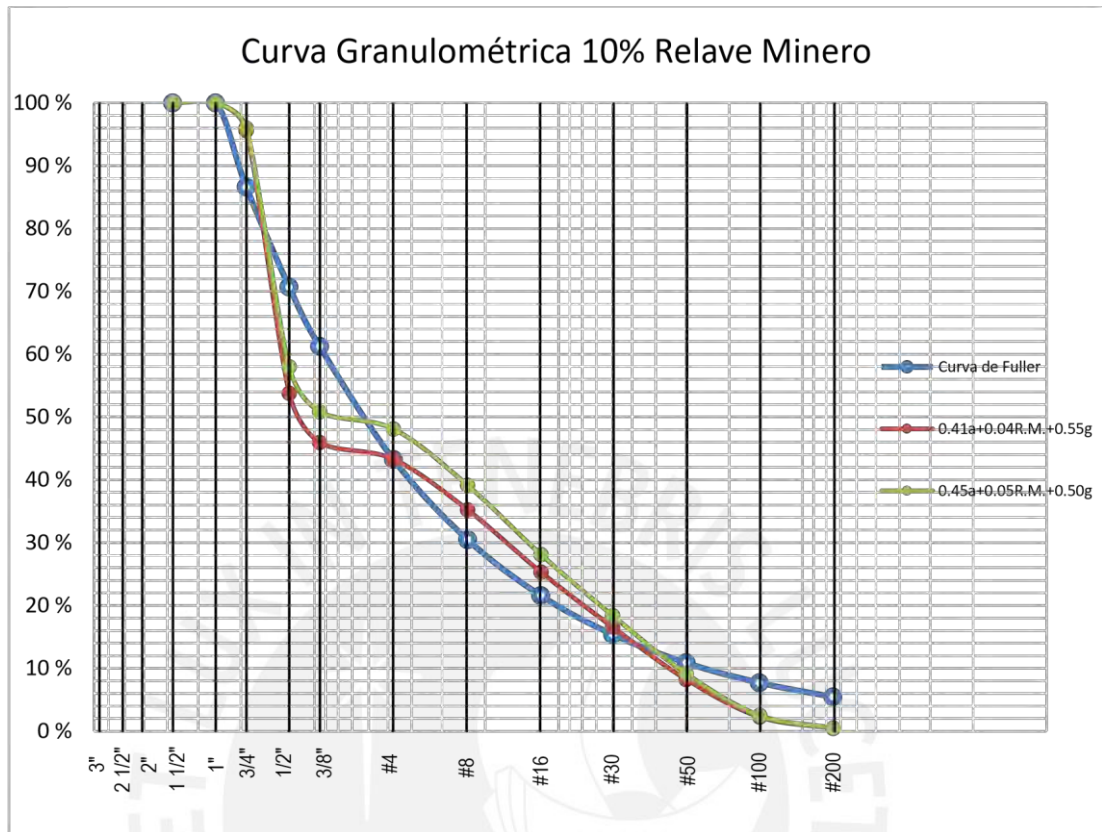


Figura 15. Curva Granulométrica de Fuller y mezcla de agregados

Elaboración propia

3.3.5 Contenido de Agregados

Se tienen los volúmenes del agua, cemento y aire

$$V_{agua} = \frac{P_{agua}}{\gamma_{agua}} = \frac{198 \text{ kg}}{1000 \text{ kg/m}^3} = 0.1980 \text{ m}^3 \quad (15)$$

$$V_{cemento} = \frac{P_{cemento}}{P.E._{cemento}} = \frac{283 \text{ kg}}{3150 \text{ kg/m}^3} = 0.0898 \text{ m}^3 \quad (16)$$

$$V_{aire} = 0.15 \text{ m}^3 \quad (17)$$

$$V_{aditivo} = 9 \text{ ml/kg} * 283 \text{ kg} = 0.0025 \text{ m}^3 \quad (18)$$

A partir de estos valores se calculan los volúmenes de los agregados.

$$\begin{aligned} V_{\text{agregado}} &= 1 - (V_{\text{agua}} + V_{\text{cemento}} + V_{\text{aire}} + V_{\text{aditivo}}) \\ &= 1 - (0.198 + 0.1057 + 0.015 + 0.0025) = 0.6947 \text{ m}^3 \end{aligned} \quad (19)$$

$$V_{\text{piedra}} = 0.50 * V_{\text{agregado}} = 0.50 * 0.6947 = 0.3473 \text{ m}^3 \quad (20)$$

$$P_{\text{piedra}} = V_{\text{piedra}} * P.E._{\text{piedra}} = 0.3473 * 2700 = 938 \text{ kg} \quad (21)$$

$$\begin{aligned} V_{\text{fino}} &= 1 - \sum V = 1 - (0.198 + 0.0898 + 0.015 + 0.0025 + 0.3473) \\ &= 0.3474 \text{ m}^3 \end{aligned} \quad (22)$$

Como en este caso se reemplazará 10% del agregado fino en relave, sus respectivos volúmenes serán:

$$V_{\text{fino}} = V_{\text{arena}} + V_{\text{relave}} = V_{\text{arena}} + V_{\text{arena}} + V_{\text{relave}} \quad (23)$$

$$V_{\text{arena}} = 0.3158 \text{ m}^3 \quad (24)$$

$$V_{\text{relave}} + 0.1 * V_{\text{arena}} = 0.0316 \text{ m}^3 \quad (25)$$

Sus respectivos pesos de estos dos últimos componentes serán:

Tabla 20. Dosificación de mezcla de 0.7 de a/c con 10% de relave minero sin corrección por humedad

Elaboración propia

a / A		0.50
W / C	0.7	
Agua (kg)	198	0.1980
Cemento (kg)	283	0.0898
Aire	---	0.015
Arena (kg)	840	0.3158
Relave (kg)	104	0.03158
Piedra (kg)	938	0.3473
Plastificante (ml)		0.002547
	2363	1.000

Sin embargo, esta dosificación supone que los agregados están en estado seco; sin embargo, en el medio ambiente, estos agregados tienen un porcentaje de agua en su interior, además de que, al mezclarse con el agua, estos absorben una fracción de esta para llegar al estado de saturación o proveen agua a la mezcla, por lo tanto, se debe realizar una corrección por humedad de modo que no absorba o ceda agua a la mezcla de concreto.

$$P_{\text{piedra saturada}} = P_{\text{piedra}} * (1 + w_{a_{\text{piedra}}}) = 938 * 1.0079 = 945.4 \text{ kg} \quad (28)$$

$$P_{\text{piedra húmeda}} = P_{\text{piedra}} * (1 + w_{o_{\text{piedra}}}) = 938 * 1.006 = 943.6 \text{ kg} \quad (29)$$

$$\begin{aligned} \text{Agua cedida}_{\text{piedra}} &= P_{\text{piedra saturada}} - P_{\text{piedra húmeda}} = 945.4 - 943.6 \\ &= 1.8 \text{ kg} \quad (30) \end{aligned}$$

$$P_{\text{arena saturada}} = P_{\text{arena}} * (1 + w_{a_{\text{piedra}}}) = 840 * 1.0183 = 855.4 \text{ kg} \quad (31)$$

$$P_{\text{arena húmeda}} = P_{\text{arena}} * (1 + w_{o_{\text{piedra}}}) = 840 * 1.043 = 876.1 \text{ kg} \quad (32)$$

$$\begin{aligned} \text{Agua cedida}_{\text{arena}} &= P_{\text{arena saturada}} - P_{\text{arena húmeda}} = 876.1 - 855.4 \\ &= -20.7 \text{ kg} \end{aligned} \quad (33)$$

$$P_{\text{relave saturada}} = P_{\text{relave}} * (1 + w_{a_{\text{relave}}}) = 104 * 1.0162 = 105.7 \text{ kg} \quad (34)$$

$$P_{\text{relave húmeda}} = P_{\text{relave}} * (1 + w_{o_{\text{relave}}}) = 104 * 1.0081 = 104.8 \text{ kg} \quad (35)$$

$$\begin{aligned} \text{Agua cedida}_{\text{relave}} &= P_{\text{relave saturada}} - P_{\text{relave húmeda}} = 104.8 - 105.7 \\ &= -0.8 \text{ kg} \end{aligned} \quad (36)$$

Se obtiene la dosificación corregida por humedad.

Tabla 21. Dosificación de la mezcla de a/c de 0.7 con 10% de relave minero corregido por humedad
Elaboración propia

Materiales	Componentes
Agua (kg)	9.00
Cemento (kg)	14.15
Arena (kg)	43.81
Relave (kg)	5.24
Piedra (kg)	47.18
Plastificante (ml)	127.35

Este procedimiento se debe realizar para las diferentes dosificaciones.

3.4 ENSAYOS DE CONCRETO FRESCO

Se deben realizar los ensayos de temperatura, peso unitario y contenido de aire para cada mezcla que se realice.

3.4.1 Ensayo de Temperatura

El procedimiento de este ensayo está especificado en la norma ASTM C1064/1064M (2017). Se toma la temperatura del ambiente y del concreto fresco al terminar de mezclar.



Figura 16. Ensayo de temperatura del concreto fresco

Elaboración propia

3.4.2 Ensayo de Slump

El procedimiento seguido para este ensayo se detalla en la norma ASTM C143/C143M (2015). Se vierte el concreto fresco en el cono de Abrams en 3 capas, cada una se varilla con 25 golpes y se enrasa la última capa. A continuación, se levanta el cono y se mide el asentamiento de la mezcla con respecto al cono (Figura 17).



Figura 17. Ensayo de Slump del concreto fresco

Elaboración propia

3.4.3 Ensayo de Peso Unitario

La norma especifica el procedimiento para realizar el ensayo de peso unitario para el concreto fresco. Se llena el envase en 3 capas de concreto, en cada capa se varilla con 25 golpes y se golpea con un martillo de goma cada extremo del envase. Finalmente se enrasa la última capa y se determina el peso del envase con concreto.



Figura 18. Ensayo de Peso Unitario del concreto fresco

Elaboración propia

3.4.4 Ensayo de Contenido de Aire

El procedimiento seguido para este ensayo se detalla en la norma ASTM C231/C231M (2017). Del mismo envase del ensayo de peso unitario se coloca el medidor de aire y se inyecta agua al envase hasta que no quede aire atrapado. A continuación, se cierran las llaves y se inyecta aire del medidor de presión hasta que el medidor indique 0%. Se abre la válvula y se obtiene el porcentaje de aire en la mezcla en el medidor.



Figura 19. Ensayo de Contenido de Aire del concreto fresco

Elaboración propia

3.4.5 Encofrado de Probetas

La norma ASTM C31/C31M (2019) detalla el procedimiento para encofrar los especímenes de las probetas que se ensayarán. Se vierte el concreto en 3 capas de la probeta, cada capa se varilla 25 veces y se golpea a cada lado con el martillo de goma. Se enrasa la última capa y se da el acabado final con una plancha. Después de 24 horas se procede a desencofrar las probetas y se dejan curar.

3.5 ENSAYOS DEL CONCRETO ENDURECIDO

Después de 28 días de curadas las probetas se proceden a realizar los ensayos de resistencia a la compresión axial y permeabilidad del concreto.

3.5.1 Ensayo de resistencia a la compresión

El procedimiento consiste en que una vez obtenida la mezcla del relleno fluido se vierte dicha mezcla en probetas de dimensiones 3" x 6" en 3 capas y varillarlas a 25 golpes cada capa, enrasar la última capa. Después de 24 horas se desencofra la probeta y se deja curar durante 28 días. Pasado este tiempo se deben desencofrar las probetas y ensayarlas en una máquina de compresión hidráulica en el Laboratorio de Estructuras Antisísmicas (LEDI) de la PUCP en la cual se aplicará una carga axial en toda en toda la superficie transversal de la probeta (Figura 20).



Figura 20. Ensayo de compresión axial

Elaboración propia

Esta carga axial va aumentando lentamente hasta que la probeta alcance el estado de rotura. De este ensayo se obtiene la fuerza máxima que resiste la probeta. Este ensayo se debe

realizar 3 veces para cada tanda de 3 tandas de cada mezcla que se realice para obtener un valor promedio de resistencia a la compresión de cada tanda.

Para este ensayo se sigue procedimiento descrito en la norma en la norma ASTM D4832-16 (2018).

3.5.2 Ensayo de permeabilidad del concreto

Según la norma ACI 522R-10 (2011), para estimar el coeficiente de permeabilidad se utiliza un permeámetro de carga variable (Figura 21) en el cual se coloca una probeta de 4"x8". Para asegurar que el agua no escurra por la superficie lateral de la probeta se asegura con un látex o material similar. Una vez asegurada la probeta en el permeámetro se procede a llenar el agua por encima de la muestra y en el tubo de drenaje para asegurar que la probeta se sature. Una vez saturada la muestra se cierra la válvula y se vierte agua en el cilindro graduado hasta una marca de columna inicial. A continuación, se procede a abrir la válvula y se mide el tiempo que tarda en escurrir el agua hasta una segunda marca en el cilindro graduado. Se registran los datos del tiempo y las mediciones de la columna de agua inicial y final.



Figura 21. Permeámetro de carga variable

Elaboración propia

Estos datos registrados se reemplazan en la fórmula de Darcy (37) para obtener el coeficiente de permeabilidad de cada probeta de concreto.

$$k = \frac{L * A1}{t * A2} * \ln\left(\frac{h2}{h1}\right) \quad (37)$$

Siendo:

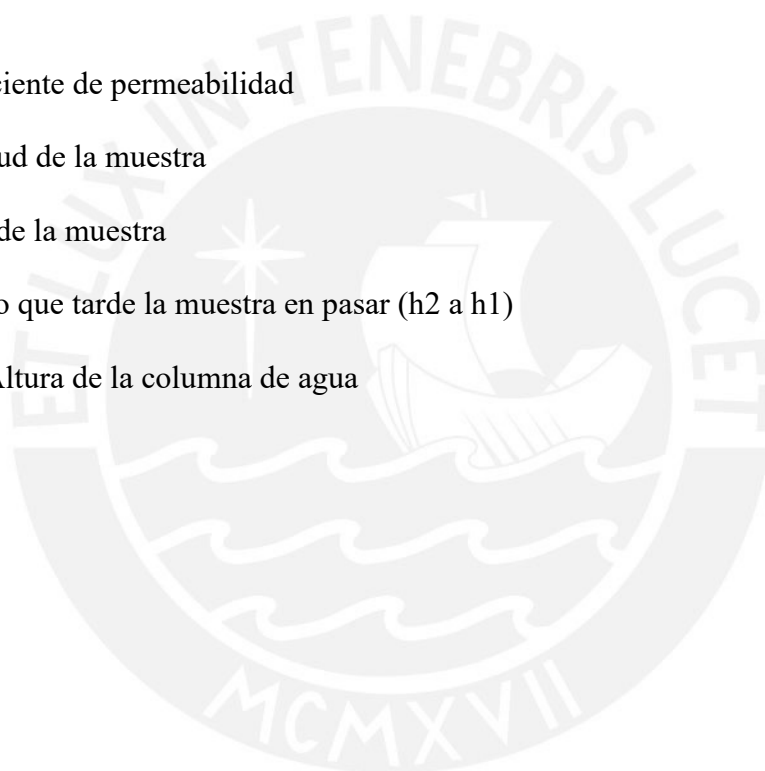
k: Coeficiente de permeabilidad

L: longitud de la muestra

A=Área de la muestra

t: Tiempo que tarde la muestra en pasar (h2 a h1)

h2, h1=Altura de la columna de agua



CAPÍTULO 4

Resultados

4.1 DOSIFICACIÓN DE LAS MEZCLAS

Se muestran las dosificaciones de todas las combinaciones de porcentaje de presencia de relave minero para la relación a/c de 0.7.

Tabla 22. Dosificaciones de mezclas de concreto para a/c de 0.7

Elaboración propia

Porcentaje de Relave Minero	Patrón (0%)	5%	10%	15%
Agua (kg)	8.94	9.01	9.00	9.06
Cemento (kg)	14.15	14.15	14.15	14.15
Arena (kg)	48.07	45.78	43.81	41.88
Relave (kg)	0.00	2.72	5.24	7.51
Piedra (kg)	47.22	47.22	47.18	47.18
Plastificante (ml)	127.35	127.35	127.35	127.35

4.2 CONCRETO FRESCO

4.2.1 Trabajabilidad

Gracias a la adición del aditivo plastificante MasterRheobuild 1003 se pudo mejorar la trabajabilidad de cada una de las mezclas (Figura 22).



Figura 22. Concreto fresco

Elaboración propia

4.2.2 Temperatura

Se registraron los siguientes datos del ensayo de temperatura.

Tabla 23. Temperatura ambiente

Elaboración propia

Mezcla	Patrón	Relave 5%	Relave 10%	Relave 15%
M1	18.6	18.2	19.6	19.3
M2	19.2	19.1	20.2	20.4
M3	18.3	21.5	17.6	20.2

Tabla 24. Temperatura de la mezcla

Elaboración propia

Mezcla	Patrón	Relave 5%	Relave 10%	Relave 15%
M1	21.7	20.1	22.3	20.9
M2	22.0	21.1	23.3	22.2
M3	23.5	23.3	23.3	22.6

Se compara la temperatura del concreto con el porcentaje de relave minero en la siguiente gráfica (Figura 23).

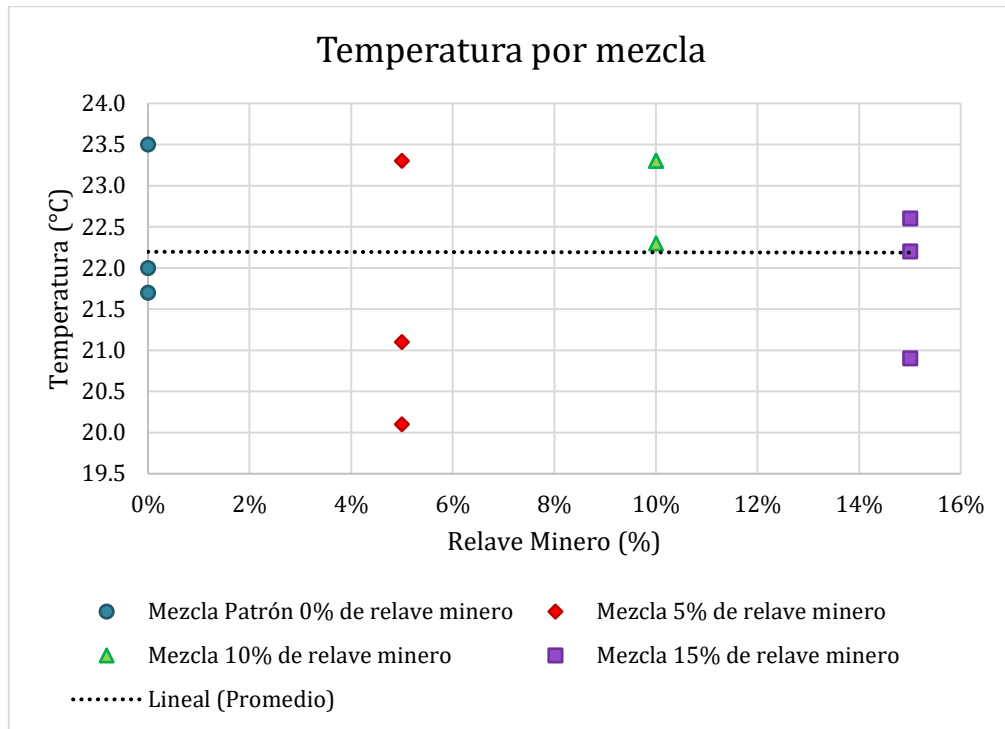


Figura 23. Temperatura por mezcla

Elaboración propia

En este ensayo no se vio un cambio significativo en la temperatura entre mezclas con diferentes contenidos de relave minero.

4.2.3 Slump

Se registraron los siguientes datos del ensayo de Slump

Tabla 25. Ensayo de Slump por cada mezcla

Elaboración propia

Mezcla	Patrón	Relave 5%	Relave 10%	Relave 15%
M1	6.5	9	8	7.5
M2	7	7.25	8	8.25
M3	7.25	8	8.5	8

Se ubican los resultados en la siguiente gráfica (Figura 24).

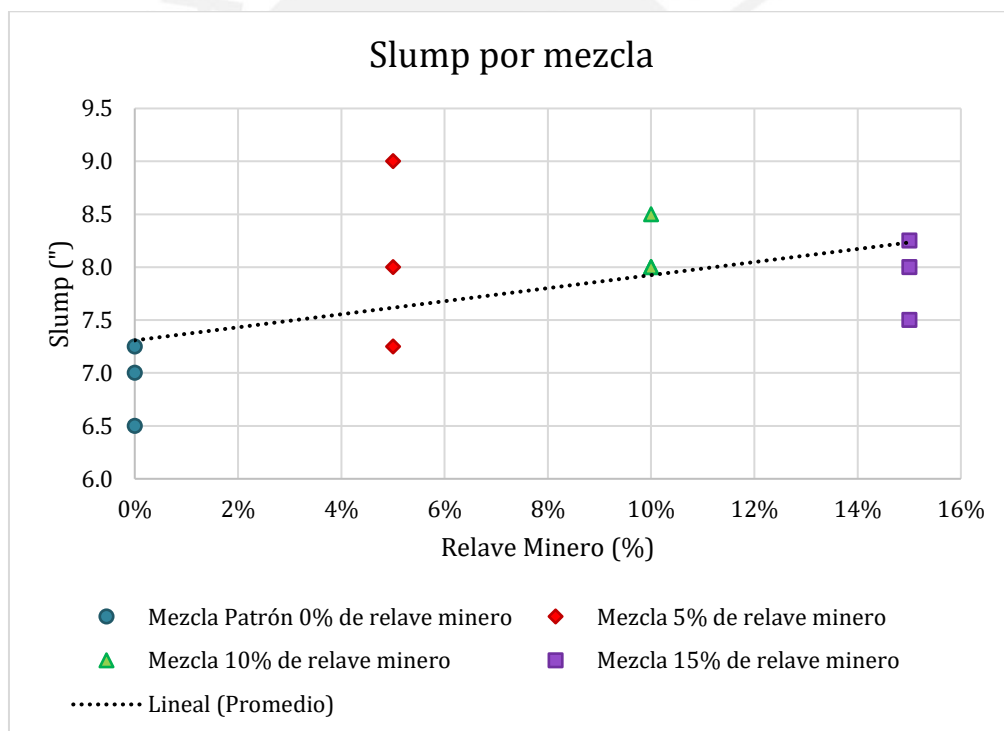


Figura 24. Slump por mezcla

Elaboración propia

Se observa que el Slump aumentó ligeramente con el incremento de la concentración de relave minero en la composición del concreto.

4.2.4 Contenido de Aire

Se registraron los siguientes datos del ensayo de contenido de aire.

Tabla 26. Ensayo de contenido de aire de cada mezcla

Elaboración propia

Mezcla	Patrón	Relave 5%	Relave 10%	Relave 15%
M1	1.8	2.2	2.0	1.8
M2	2.1	2.0	2.1	2.4
M3	2.0	2.3	2.0	2.0
Promedio	2.0	2.2	2.0	2.1

Se muestran los resultados del contenido de aire del concreto en la siguiente gráfica

(Figura 25).

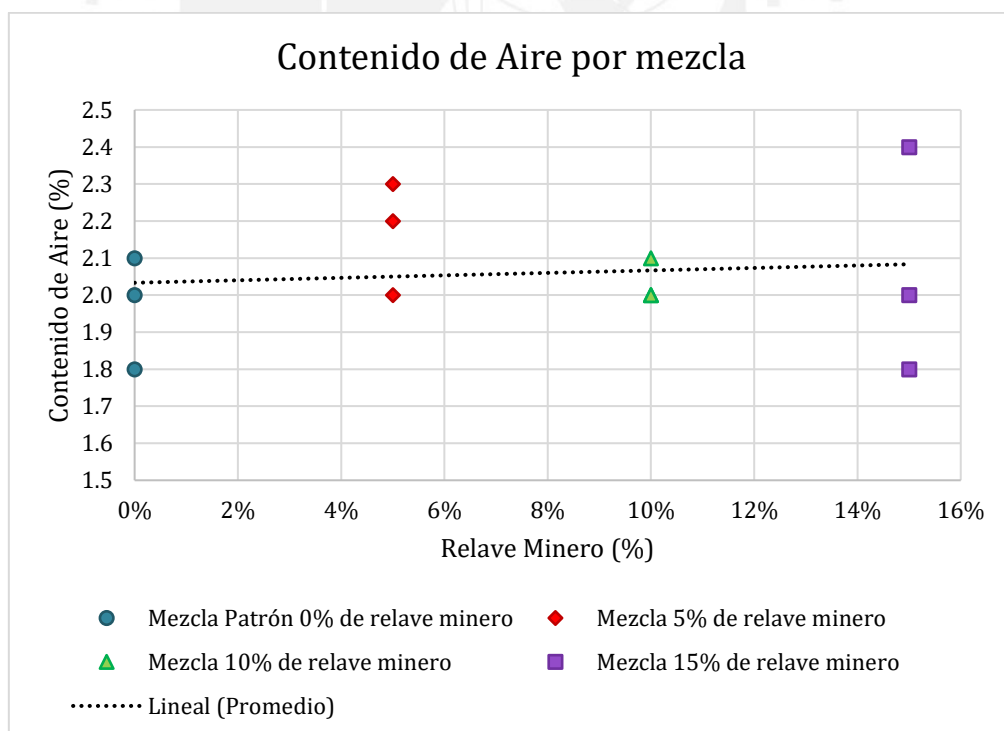


Figura 25. Contenido de aire por mezcla

Elaboración propia

No se obtuvieron diferencias significativas en el ensayo de contenido de aire entre mezclas de diferente porcentaje de relave minero.

4.2.5 Peso Unitario

Se utilizó un recipiente con un peso de 3.396 kg y 7.055 L para calcular el peso unitario del concreto fresco de cada mezcla.

Se registraron los siguientes datos del ensayo de peso unitario.

Tabla 27. Ensayo de peso unitario de cada mezcla

Elaboración propia

Mezcla	Patrón	Relave 5%	Relave 10%	Relave 15%
M1	2.379	2.382	2.394	2.408
M2	2.368	2.361	2.386	2.393
M3	2.359	2.400	2.394	2.402
Promedio	2.368	2.381	2.391	2.401

Se registran los resultados obtenidos del ensayo correspondiente en la Figura 26.

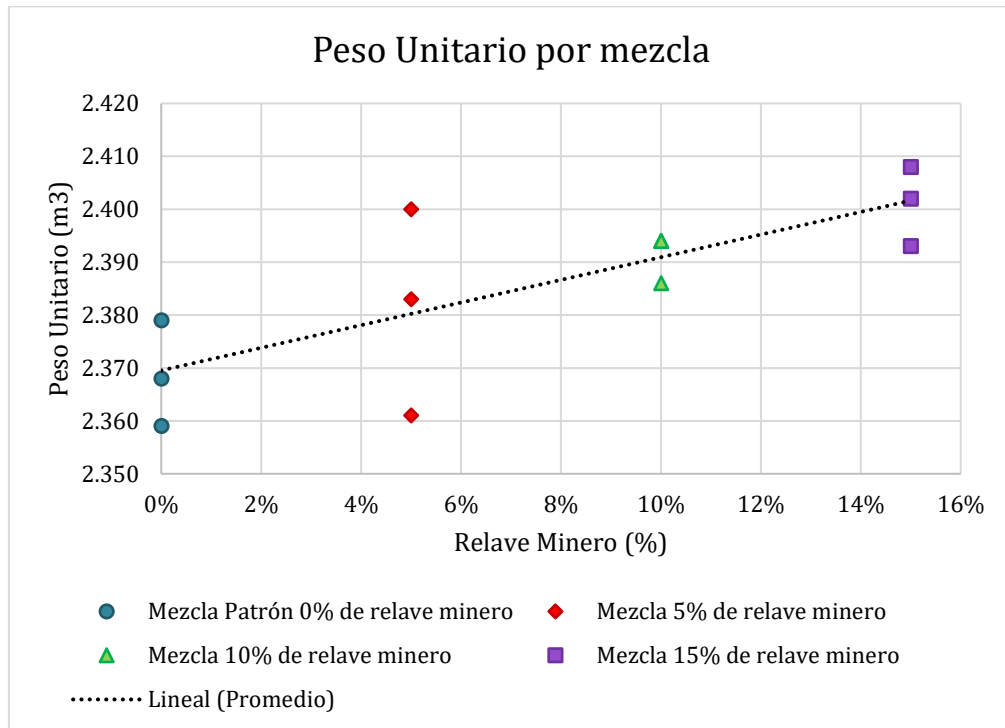


Figura 26. Peso Unitario por mezcla

Elaboración propia

Como se puede observar en la gráfica el peso unitario del concreto fresco aumenta conforme se incrementa el porcentaje de reemplazo de arena por relave minero.

4.3 CONCRETO ENDURECIDO

4.3.1 Ensayo de Compresión

Después de 28 días de vaciada la mezcla se realizan los ensayos de resistencia a la compresión axial. Se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 28. Ensayo de compresión axial de cada probeta**Elaboración propia**

Nomenclatura	Espécimen	Esfuerzo (kg/cm ²)	Esfuerzo promedio por mezcla (kg/cm ²)	Esfuerzo promedio por dosificación (kg/m ²)	Desviación Estándar	Coficiente de Variación			
0% RM M1	1	288	287	292	17.137	5.867%			
0% RM M1	2	277							
0% RM M1	3	296							
0% RM M2	1	317	290						
0% RM M2	2	276							
0% RM M2	3	277							
0% RM M3	1	312	299						
0% RM M3	2	310							
0% RM M3	3	276							
5% RM M1	1	280	284	281	6.691	2.378%			
5% RM M1	2	280							
5% RM M1	3	292							
5% RM M2	1	275	279						
5% RM M2	2	275							
5% RM M2	3	286							
5% RM M3	1	325	336						
5% RM M3	2	349							
5% RM M3	3	335							
10% RM M1	1	306	297	300	7.000	2.332%			
10% RM M1	2	287							
10% RM M1	3	297							
10% RM M2	1	306	302						
10% RM M2	2	295							

10% RM M2	3	305				
10% RM M3	1	301	301			
10% RM M3	2	296				
10% RM M3	3	308				
15% RM M1	1	330	326			
15% RM M1	2	320				
15% RM M1	3	329				
15% RM M2	1	317	316	320	9.275	2.902%
15% RM M2	2	320				
15% RM M2	3	310				
15% RM M3	1	301	317			
15% RM M3	2	326				
15% RM M3	3	324				

La mezcla 3 de la dosificación con 5% de relave minero presenta valores atípicos con un coeficiente de variación mayor al 6%; valor recomendado por la norma ACI-214 (1965) para pruebas en laboratorio, por lo que se decide eliminar las 3 muestras de los resultados.

Sin considerar dichos resultados se ubican los valores promedios de la resistencia a la compresión de cada mezcla (Figura 27).

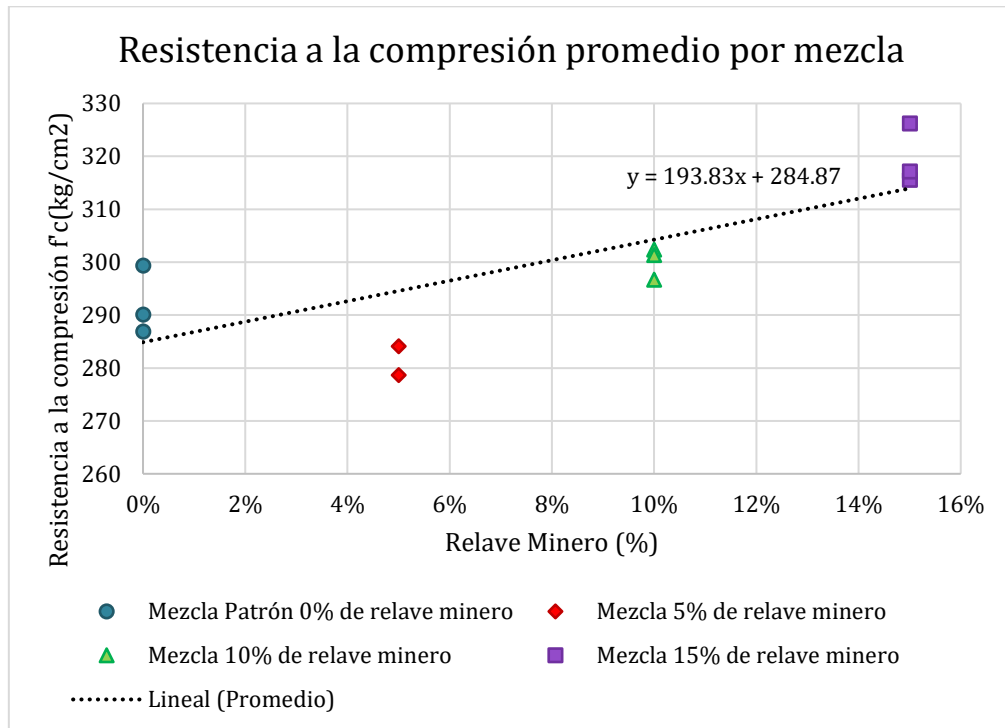


Figura 27. Resistencia a la compresión promedio por mezcla

Elaboración propia

Se puede observar que la resistencia a la compresión promedio del concreto tiene una distribución lineal con respecto al porcentaje de relave minero presente en la dosificación.

Se muestra la curva de resistencia a la compresión promedio por dosificación de concreto:

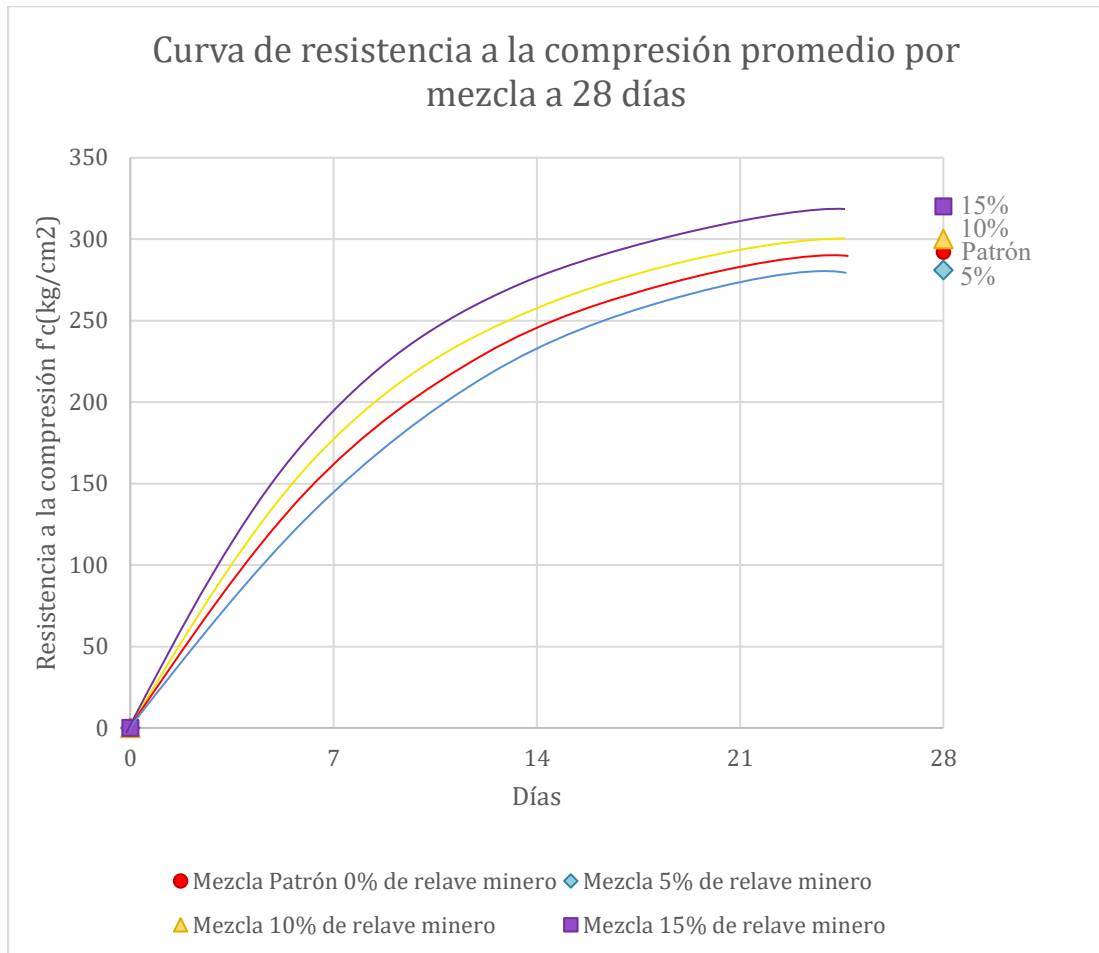


Figura 28. Curva de resistencia a la compresión promedio por mezcla a 28 días

4.3.2 Ensayo de permeabilidad

Después de 28 días de vaciada la mezcla se realiza el ensayo de permeabilidad. Se obtuvieron los siguientes resultados para cada probeta.

Tabla 29. Ensayo de permeabilidad de cada probeta**Elaboración propia**

Nomenclatura	Espécimen	Tiempo (s)	Permeabilidad (cm/s)	Permeabilidad promedio (cm/s)
0% RM M1	4	35.87	0.337	0.350
0% RM M1	5	32.84	0.368	
0% RM M1	6	35.04	0.346	
0% RM M2	4	31.98	0.379	0.342
0% RM M2	5	36.07	0.338	
0% RM M2	6	39.52	0.309	
0% RM M3	4	30.21	0.404	0.358
0% RM M3	5	40.12	0.304	
0% RM M3	6	33.02	0.366	
5% RM M1	4	34.02	0.360	0.362
5% RM M1	5	30.89	0.396	
5% RM M1	6	36.81	0.331	
5% RM M2	4	35.21	0.346	0.352
5% RM M2	5	33.02	0.370	
5% RM M2	6	35.97	0.339	
5% RM M3	4	42.19	0.289	0.294
5% RM M3	5	40.44	0.302	
5% RM M3	6	41.93	0.292	
10% RM M1	4	40.88	0.295	0.335
10% RM M1	5	32.51	0.376	
10% RM M1	6	36.24	0.334	
10% RM M2	4	35.31	0.343	0.326
10% RM M2	5	39.19	0.313	

10% RM M2	6	37.25	0.322	
10% RM M3	4	37.62	0.325	0.311
10% RM M3	5	38.42	0.313	
10% RM M3	6	40.78	0.296	
15% RM M1	4	36.84	0.331	0.306
15% RM M1	5	42.35	0.288	
15% RM M1	6	40.79	0.300	
15% RM M2	4	38.96	0.313	0.300
15% RM M2	5	47.25	0.256	
15% RM M2	6	36.79	0.331	
15% RM M3	4	41.91	0.291	0.294
15% RM M3	5	38.72	0.313	
15% RM M3	6	43.25	0.280	

De igual manera que el ensayo de compresión se decide eliminar la mezcla 5% RM M3 debido a que no muestra resultados representativos con las otras dos dosificaciones de iguales características.

Se exponen los resultados representativos del ensayo de permeabilidad en la siguiente gráfica (Figura 29).

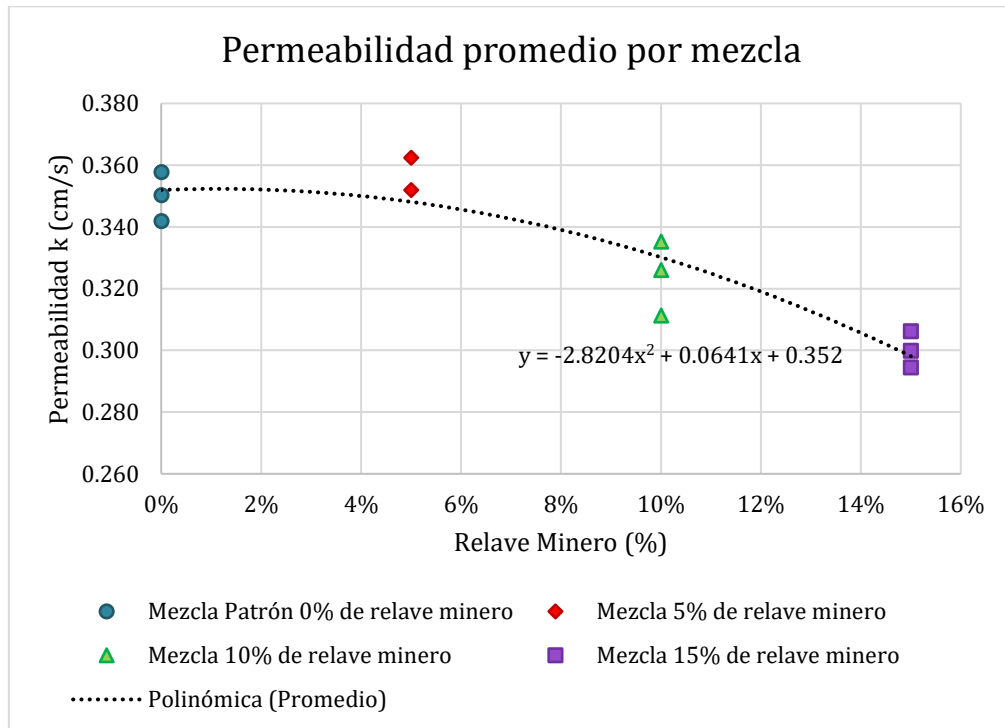


Figura 29. Permeabilidad promedio por mezcla

Elaboración propia

Como se puede observar, el coeficiente de permeabilidad decrece conforme aumenta el contenido de relave minero en la dosificación.

4.3.3 Resistencia a la compresión vs Peso Unitario

Se comparan los resultados del ensayo de resistencia a la compresión y peso unitario de cada mezcla en el siguiente gráfico (Figura 30):

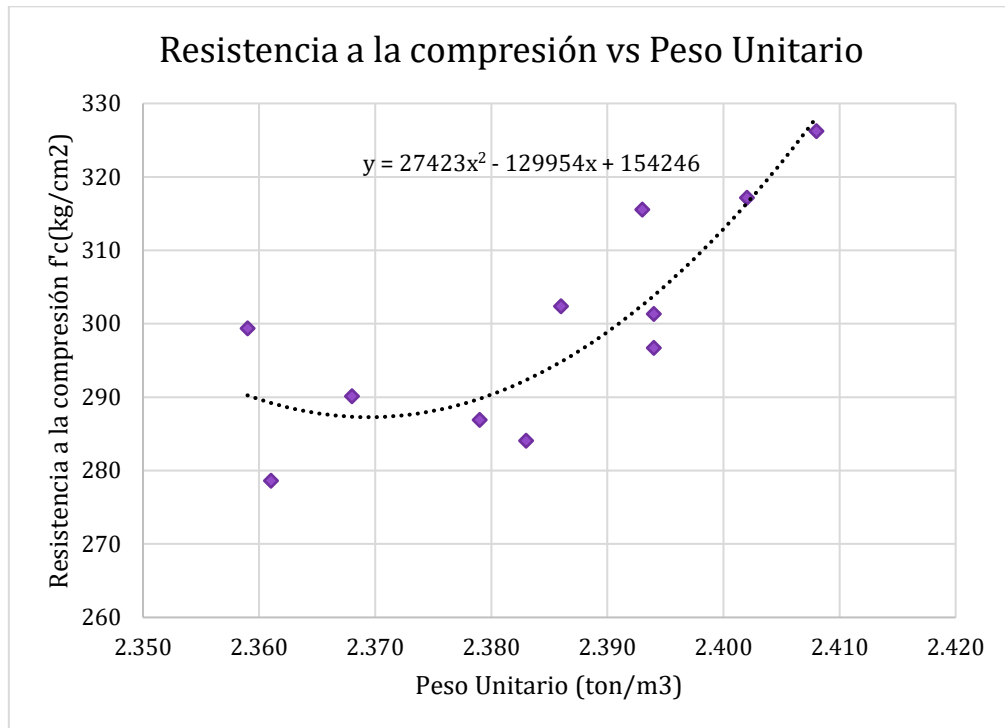


Figura 30. Resistencia a la compresión vs peso unitario

Elaboración propia

Se observa en la gráfica que a medida que el peso unitario del concreto aumenta, la resistencia también aumenta.

4.3.4 Permeabilidad vs Peso unitario

Se comparan los resultados del ensayo de permeabilidad y peso unitario de cada mezcla en el siguiente gráfico (Figura 31):

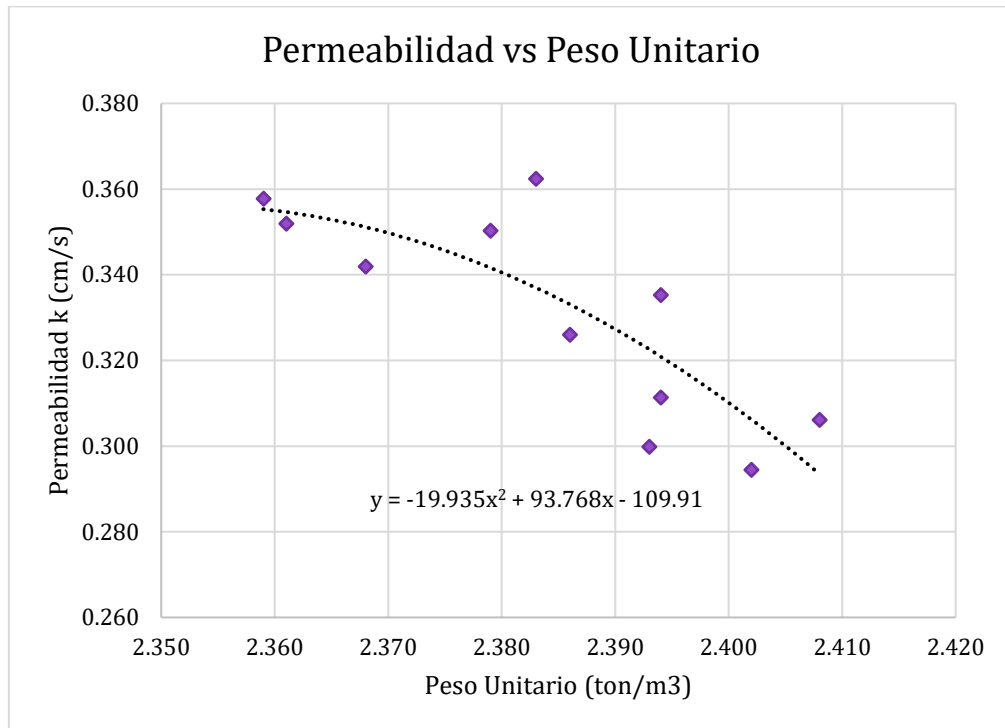


Figura 31. Permeabilidad vs Peso Unitario

Elaboración propia

Se observa que la permeabilidad disminuye conforme el peso unitario del concreto aumenta.

4.3.5 Resistencia a la compresión vs Permeabilidad

Se comparan los dos principales ensayos de cada mezcla del proyecto de investigación en la siguiente gráfica (Figura 32):

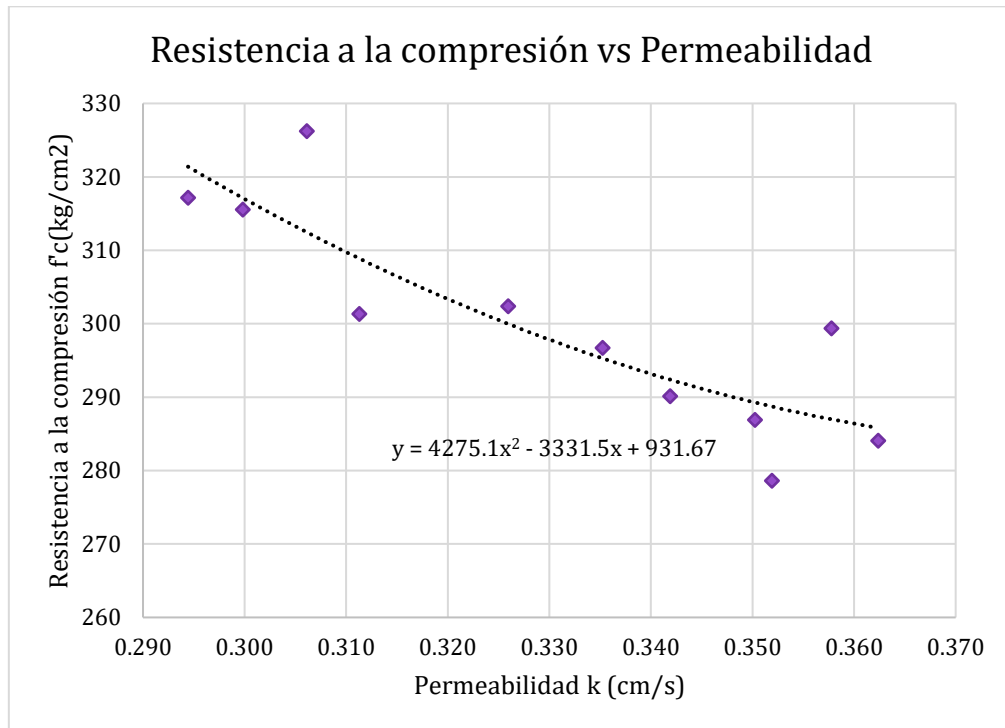


Figura 32. Resistencia a la compresión vs Permeabilidad

Elaboración propia

Se observa que la permeabilidad aumenta conforme la resistencia a la compresión disminuye.

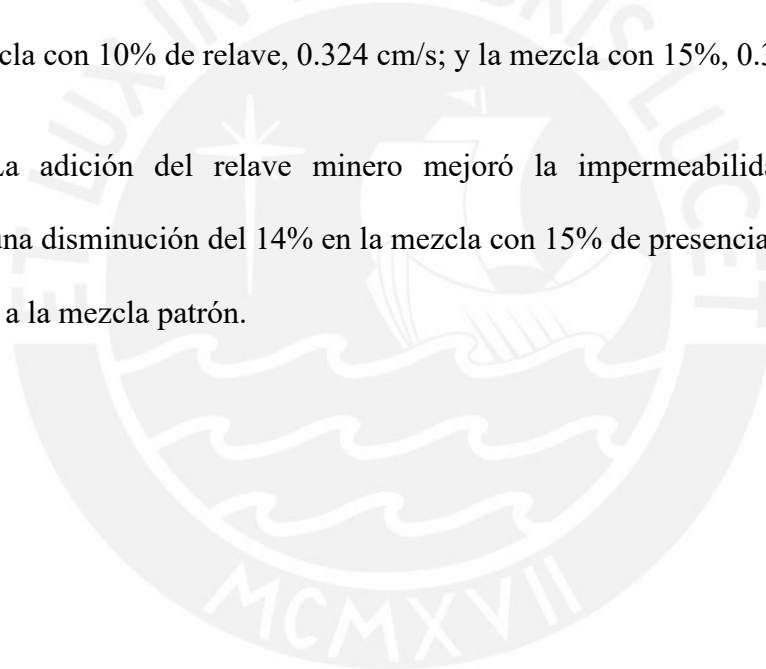
CONCLUSIONES

- El módulo de finura global de la mezcla patrón es de 5.62, para la mezcla con 5% de reemplazo de arena por relave minero tuvo un módulo de finura de 5.64, para un 10% de reemplazo su modulo es de 5.67 y para un 15% el módulo fue de 5.69; al comparar con el módulo de finura de la curva de Fuller de 6.23 se observa que los módulos de finura de las mezclas se acercan a dicho valor conforme aumenta el porcentaje de presencia de relave minero en su dosificación, se concluye que la cantidad de vacíos ha disminuido y por ende mejora el desempeño del concreto.
- El peso unitario del concreto fresco aumenta conforme presenta mayor presencia de relave minero en su dosificación ya que la mezcla patrón presentó un peso de 2.368 ton/m³, la mezcla de 5% de reemplazo de arena por relave minero presentó un peso de 2.381 ton/m³, la mezcla con 10% de reemplazo tuvo un peso de 2.391 ton/m³ y la mezcla con 15% un peso de 2.401 ton/m³.
- La mezcla patrón (0% de relave) tuvo una resistencia a la compresión axial promedio de 292 kg/cm²; para la mezcla con 5% de presencia de relave minero fue de 281 kg/cm²; la mezcla con 10% de relave, 300 kg/cm²; y la mezcla con 15%, 320 kg/cm². Se puede afirmar que la incorporación del relave minero fue favorable para la resistencia a la compresión del concreto, en especial para la mezcla con 15% de reemplazo de arena puesto que tuvo un aumento del 9.4% con respecto a la mezcla patrón. La variación de la resistencia para valores menores de reemplazo (5% y 10%) cae dentro de la variación del método de ensayo por lo que no se lo considera.

- A pesar que el ensayo de permeabilidad realizado en este estudio no fue el pertinente para un concreto convencional como el obtenido en los ensayos, se realizó dicho ensayo para evaluar de manera comparativa la tasa de infiltración de agua en el concreto obtenido y verificar el aumento de densidad del concreto y por ende el aumento de su resistencia.

- La mezcla patrón (0% de relave) tuvo una permeabilidad promedio de 0.350 cm/s, la mezcla con 5% de presencia de relave minero tuvo una permeabilidad de 0.357 cm/s; la mezcla con 10% de relave, 0.324 cm/s; y la mezcla con 15%, 0.300 cm/s.

- La adición del relave minero mejoró la impermeabilidad del concreto, obteniendo una disminución del 14% en la mezcla con 15% de presencia de relave minero con respecto a la mezcla patrón.



RECOMENDACIONES

- Se recomienda estudiar los efectos del relave minero en dosis mayores de reemplazo a las estudiadas, para así, calcular el porcentaje máximo de reemplazo en que la resistencia crece a su valor máximo.
- Se recomienda caracterizar completamente el tipo de relave minero en estudio, mediante ensayos de composición química de tal manera que se determine la presencia de sustancias que puedan afectar la durabilidad del concreto.
- Se recomienda realizar el ensayo de penetración máxima de agua mediante la norma BS-EN 12390-08 para calcular la permeabilidad del concreto a diferentes dosis de relave minero en su dosificación.
- Se recomienda investigar dosificaciones de concreto con relaciones a/c menores y mayores a las estudiadas en esta tesis para definir el efecto del relave minero en mezclas más pobres y más ricas en pasta.
- Realizar ensayos de flexión en vigas de concreto descritos en la norma ASTM-C78 y estimar la viabilidad del uso de relaves mineros en la construcción de pavimentos y losas.
- Se recomienda evaluar el efecto de la presencia de diferentes tipos de relave en la dosificación del concreto de modo que, se establezca una clasificación de los tipos de relaves que se pueden usar como agregado para concreto.

Bibliografía

- ACI 211.1-91. (2009). *211.1-91: Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete (Reapproved 2009)*.
- ACI 522R-10. (2011). *522R-10 Report on Pervious Concrete (Reapproved 2011)*.
- Anicama Acosta, G. A. (2010). Estudio Experimental Del Empleo De Materiales De Desecho De Procesos Mineros En Aplicaciones Prácticas Con Productos. *Pontificia Universidad Católica Del Perú*, 1–58. <http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/500>
- ASTM C1064/1064M. (2017). *Standard Test Method for Temperature of Freshly Mixed Hydraulic-Cement Concrete I*. https://doi.org/10.1520/C1064_C1064M-17
- ASTM C127. (2015). *Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate*. <https://compass-astm-org.ezproxybib.pucp.edu.pe/download/C127.32864.pdf>
- ASTM C128. (2015). *Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate*. <https://compass-astm-org.ezproxybib.pucp.edu.pe/download/C128.28201.pdf>
- ASTM C143/C143M. (2015). *Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete I*. https://doi.org/10.1520/C0143_C0143M-15A
- ASTM C231/C231M. (2017). *Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method I*. https://doi.org/10.1520/C0231_C0231M-17A
- ASTM C29/C29M. (2017). *Standard Test Method for Bulk Density (“Unit Weight”) and Voids*

- in Aggregate.* <https://compass-astm-org.ezproxybib.pucp.edu.pe/download/C29C29M.14644.pdf>
- ASTM C31/C31M. (2019). *Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field 1*. https://doi.org/10.1520/C0031_C0031M-19
- ASTM C33/C33M. (2018). *Standard Specification for Concrete Aggregates*. <https://compass-astm-org.ezproxybib.pucp.edu.pe/download/C33C33M.29995.pdf>
- ASTM C566. (2019). *Standard Test Method for Total Evaporable Moisture Content of Aggregate by Drying*. <https://compass-astm-org.ezproxybib.pucp.edu.pe/download/C566.31176.pdf>
- ASTM D4832-16 (2018). (2019). *Standard Test Method for Preparation and Testing of Controlled Low Strength Material*. 1–6. <https://doi.org/10.1520/D4832-16E01.1.7>
- Caceres Pachari, I. M., & Larico Tito, J. L. (2017). Evaluación de mezclas de concreto $f'c=175$, 210 y 245 kg/cm² con relave minero del Distrito de Ananea - Putina - Puno, 2017. *Universidad Nacional Del Altiplano*. <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/6692>
- Calderon Soncco, V., & Umiña Quispe, Y. (2015). Evaluacion de concretos geopolimericos mediante activacion alcalina de residuos mineros (relave) y zeolita natural. *Universidad Nacional de San Agustin de Arequipa*. <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/222>
- Chiang, A. (1989). Niveles de los metales pesados en organismos, agua y sedimentos marinos recolectados en la V Región de Chile. *Memorias Del Simposio Internacional Sobre Los Recursos Vivos, Serie CPPS*, 205–215.

El Peruano. (2018). *Aporte de la minería al PBI*. <https://elperuano.pe/noticia-aporte-de-mineria-al-pbi-65726.aspx>

El Peruano. (2019). *Inversiones mineras inician el 2019 con crecimiento de 48%*. <https://elperuano.pe/noticia-inversiones-mineras-inician-2019-crecimiento-48-76362.aspx>

Huaraz Noticias. (2019). *Paralizaron operaciones de empresa M&S transportes por derrame de relave*. <https://huaraznoticias.com/regionales/paralizaron-operaciones-de-empresa-m-s-transportes-por-derrame-de-relave>

Milla Lázaro, D. E. (2018). Resistencia a la compresión de una unidad de adobe empleando una prensa manual y sustituyendo el 10%, 20% y 30%, por relave minero de Ticapampa, en la provincia de Huaraz - 2017. *Universidad San Pedro*. <http://publicaciones.usanpedro.edu.pe/handle/USANPEDRO/5436>

Moukannaa, S., Loutou, M., Benzaazoua, M., Vitola, L., Alami, J., & Hakkou, R. (2018). Recycling of phosphate mine tailings for the production of geopolymers. *Journal of Cleaner Production*, 185, 891–903. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.03.094>

NTP 399.602:2017. (2017). *UNIDADES DE ALBAÑILERÍA. Bloques de concreto para uso estructural. Requisitos. 2º Edición*.

Onuaguluchi, O., & Eren, Ö. (2012). Copper tailings as a potential additive in concrete: consistency, strength and toxic metal immobilization properties. In *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences* (Vol. 19). http://i-rep.emu.edu.tr:8080/xmlui/bitstream/handle/11129/2331/IJEMS_19%282%29_79-

86.pdf?sequence=1

- Peñaranda Ampuero, José Antonio; Castañeda Ames, Silvia Pamela; Lezama Mendieta, J. M. (2015). *Sistema de Relleno con Mortero de Relave para Mejorar la Confiabilidad del Sostenimiento en la Minería Subterránea | Sinergia e Innovación*. <https://revistas.upc.edu.pe/index.php/sinergia/article/view/433>
- Rojas Huamaní, L. E., & Ventura Huaman, L. E. (2017). Utilización del relave minero para la elaboración de bloques de concreto tipo ensamblable. *Universidad Nacional de Huancavelica*. <http://repositorio.unh.edu.pe/handle/UNH/1326>
- Servindi. (2018). *Derrame minero en Recuay deja más de 110 familias damnificadas | Servindi - Servicios de Comunicación Intercultural*. <https://www.servindi.org/actualidad-noticias/08/03/2018/derrame-minero-en-ricuay-deja-mas-de-110-familias-afectadas>
- Taha Yassine, M., Hakkou, R., Mansori, M., & Benzaazoua, M. (2015). Reuse of treated calamine process mine tailings and glass wastes in fired bricks making Dissolution behaviour of aluminosilicate minerals abundant in Abitibi's mine tailings for synthesis of geopolymer paste backfill View project valorization of phosphate. *WASCON 2015-Santander*, 10–12. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2830.3524>

APÉNDICE A. PANEL FOTOGRÁFICO



Foto A 1. Agregado grueso para la elaboración de concreto



Foto A 2. Agregado fino para la elaboración del concreto



Foto A 3. Relave minero para la elaboración del concreto



Foto A 4. Muestras de humedad en el Laboratorio de Estructuras Antisísmicas (LEDI)



Foto A 5. Mezcla de agregados



Foto A 6. Inyección de agua en el medidor de aire



Foto A 7. Vaciado y varillado de las probetas de concreto



Foto A 8. Enrasado de las probetas de concreto



Foto A 9. Desencofrado de las probetas de concreto



Foto A 10. Curado de las probetas de concreto



Foto A 11. Ensayo de permeabilidad del concreto



Foto A 12. Vaciado de agua en el permeámetro de carga variable



Foto A 13. Falla por compresión de la probeta de concreto