UNIVERSIDAD PERUANA DE CIENCIAS APLICADAS

FACULTAD DE INGENIERIA

PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA CIVIL

Propuesta de uso de relaves de mina polimetálica en la fabricación de
unidades de albañilería - caso ex unidad minera Mercedes 3

TESIS

Para optar el título profesional de Ingeniero Civil

AUTOR

Cárdenas Ticlavilca, Félix José (0000-0002-8019-8306)

ASESOR

Tacza Zevallos, John Nelinho (0000-0002-1763-9375)

Lima, 21 de febrero de 2019

DEDICATORIA

Esta tesis está dedicada en principio a mi hijo, que fue el que me dio todas las fuerzas, la razón de mi esfuerzo, a mi esposa, a mis padres y hermanos que gracias a ellos a su paciencia consejos fueron un soporte importante para no detenerme ni rendirme en esta segunda carrera.

RESUMEN

La presente tesis de tipo experimental propone la utilización de relave polimetálico de la Ex Unidad Minera Mercedes 3, que es uno de las 892 unidades que actualmente son pasivos ambientales mineros, para la fabricación de unidades de albañilería en el tipo de bloque de concreto estructural. La viabilidad de utilizar relaves de minería polimetálica como material de agregado para la fabricación de ladrillos fue investigado en este estudio. Se ha tratado el tema de la contaminación ambiental producto de los pasivos ambientales y componentes mineros. Se mencionan estudios similares para la fabricación de bloques de concreto con relave de minería de hierro. Un tema importante que se ha tomado en cuenta es el área de influencia ambiental de la relavera, situación poblacional y vivienda en la zona de estudio.

Se realizó el diseño por dosificación de material y posteriormente se desarrolla el diseño de mezcla con el método del ACI.

Se ensayaron los agregados incluido el relave, pruebas de toxicidad del relave y finalmente pruebas mecánicas de resistencia a la compresión.

Uno de los puntos importantes es el nivel de toxicidad del relave, que se comprueba en última instancia con la mezcla de los demás agregados y cemento portland tipo I.

Por último, se muestra datos relativos a costo del bloque de concreto con relave y el costo del bloque normal con las mismas características.

Palabras clave: Relave; Bloque de concreto; Diseño de concreto; Geopolímero.

Proposed use of polymetallic mine tailings in the manufacture of masonry units - case
former mining unit "Mercedes 3"

ABSTRACT

This experimental thesis proposes the use of polymetallic tailings from the former Mercedes 3 Mining Unit, which is one of the 892 units that are currently mining environmental liabilities, for the manufacture of masonry units in the type of structural concrete block. The feasibility of using polymetallic mining tailings as an aggregate material for the manufacture of bricks was investigated in this study. The issue of environmental pollution caused by environmental liabilities and mining components has been addressed. Similar studies are mentioned for the manufacture of concrete blocks with iron mining tailings. An important issue that has been taken into account is the area of environmental influence of the relavera, population situation and housing in the study area.

The design was done by material dosing and then the mixing design was developed with the ACI method.

The aggregates were tested including tailings, tailings toxicity tests and finally mechanical tests of compressive strength.

One of the important points is the level of toxicity of the tailings, which is ultimately verified with the mixture of the other aggregates and portland type I cement.

Finally, data relating to the cost of the concrete block with tailings and the cost of the normal block with the same characteristics are shown. El resumen debe:

Keywords: Tails; Concrete block; Concrete design; Geopolymer

TABLA DE CONTENIDOS

1	INTRODUCCIÓN.....	1
2	OBJETO DE LA INVESTIGACIÓN	3
2.1	TEMA DE INVESTIGACIÓN	3
2.1.1	El tema.....	3
2.1.2	Justificación.....	3
2.1.2.1	Impactos que producen los relaves.....	3
2.1.3	Antecedentes.....	7
2.2	EL PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN	10
2.2.1	Situación problemática	10
2.2.2	Problemas a resolver.....	11
2.3	OBJETIVOS.....	11
2.3.1	Objetivo general	11
2.3.2	Objetivos específicos.....	11
2.4	CAMPO DE ACCIÓN DE LA ORGANIZACIÓN OBJETIVO	12
2.5	ALCANCES	13
3	MARCO TEORICO.....	14
3.1	LOS RELAVES DE MINERÍA POLIMETÁLICA	14
3.1.1	El mineral	14
3.1.2	El relave.....	14
3.1.2.1	Generación de relaves.....	15
3.1.2.2	Regulación de estándares ambientales	16
3.1.2.3	Alternativas para encapsular los metales en los relaves	19
3.2	INVESTIGACIONES CON RELAVES MINEROS	22
3.2.1	Caso en la India	22
3.2.2	Caso en Australia.....	24
3.3	POBLACIÓN INVOLUCRADA.....	26
3.3.1	Población	26
3.3.2	Viviendas material predominante.....	27
3.4	UNIDAD DE ALBAÑILERÍA	27
3.4.1	El ladrillo	28

3.4.1.1	Control de calidad del ladrillo	28
3.4.1.2	Pruebas	29
3.4.2	Bloque de concreto	30
3.4.2.1	Normas de fabricación de bloque de concreto.....	31
3.4.2.2	Características de los muros con bloques de concreto	33
3.4.2.3	Agregados para bloque de concreto.....	33
3.5	DISEÑO DE MEZCLAS	36
3.5.1	Tipos de diseño de mezcla.....	36
3.5.1.1	Método ACI.....	36
3.5.1.2	Método Fuller	37
3.5.1.3	Método Walker	37
3.5.1.4	Método de módulo de fineza	37
3.5.2	Diseño de mezcla del ACI.....	38
4	FABRICACIÓN DE LA UNIDAD DE ALBAÑILERIA.....	46
4.1	REQUISITOS TÉCNICOS Y DISEÑO DE MEZCLA.....	46
4.1.1	Requisitos técnicos	46
4.1.2	Diseño de mezcla del concreto	46
4.1.2.1	Caracterización de los agregados	46
4.1.2.2	Dosificación de concreto con agregado de relave	51
4.1.2.3	Resultados de densidad.....	55
4.1.2.4	Cálculo de la relación agua cemento (a/c).....	58
4.1.2.5	Resultados de resistencia a compresión de especímenes.....	60
4.1.2.6	Resistencia en el tiempo	62
4.1.2.7	Cálculo de f'_c , de acuerdo a la relación a/c.....	65
4.1.2.8	Relación AG/AF optimo.....	67
4.1.2.9	Diseño de mezclas con ACI	73
4.1.2.10	Elaboración de bloque de concreto.....	84
4.2	ENSAYOS DE BLOQUES DE CONCRETO	86
4.2.1	Absorción	86
4.2.2	Peso unitario	87
4.2.3	Ensayo a compresión	87
4.2.4	Ensayos de calidad ambiental.....	89

5	ANÁLISIS COSTO BENEFICIO	91
5.1	MANO DE OBRA	91
5.2	ANÁLISIS DE COSTO UNITARIO	92
6	ANÁLISIS COSTO BENEFICIO	95
6.1	CONCLUSIONES	95
6.2	RECOMENDACIONES	95
7	BIBLIOGRAFÍA	97
8	GLOSARIO.....	99
9	ANEXOS	100

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Límites Máximos Permisibles para la descarga de efluentes líquidos para actividades minero metalúrgicas	17
Tabla 2 Proporción para mezcla	22
Tabla 3 Centro poblado mas cercano a la EUM Mercedes 3	27
Tabla 4 Material de construcción de las viviendas en Huallanca.....	27
Tabla 5 NTP 399.602 (2002) Bloques de Concreto para uso estructural	31
Tabla 6 NTP 399.600 (2002) Bloques de Concreto para uso no estructural	32
Tabla 7 Clase de unidades de albañilería para fines estructurales.....	32
Tabla 8 Aspectos que influyen en el concreto	33
Tabla 9 Ensayo granulométrico	35
Tabla 10 Factor de corrección	41
Tabla 11 Resistencia a la compression requerida.....	41
Tabla 12 Volúmen unitario de agua	42
Tabla 13 Relación agua cemento por compresión.....	42
Tabla 14 Relación agua cemento por durabilidad	43
Tabla 15 Contenido de aire atrapado.....	44
Tabla 16 Peso del agregado grueso por unidad de volumen del concreto.....	45
Tabla 17 Ensayo de ABA de la muestra de relave	48
Tabla 18 Contenido metálico comparados con el límite EPA.....	49
Tabla 19 Resultados comparados con los estandares de calidad para suelo	49
Tabla 20 Resultados comparados con los Estándares de Calidad para Agua.....	50
Tabla 21 Dosificación 1 en volumen: Concreto con relave (10% de arena gruesa), arena gruesa y confitillo	52
Tabla 22 Dosificación 2 en volumen: Concreto con relave (25% de arena gruesa), arena gruesa y confitillo	52
Tabla 23 Dosificación 3 en volumen: Concreto con relave (50% de arena gruesa), arena gruesa y confitillo	53
Tabla 24 Dosificación 1 en gramos: Concreto con relave (10% de arena gruesa), arena gruesa y confitillo	54
Tabla 25 Dosificación 2 en gramos: Concreto con relave (25% de arena gruesa), arena gruesa y confitillo	54

Tabla 26 Dosificación 3 en gramos: Concreto con relave (50% de arena gruesa), arena gruesa y confitillo	55
Tabla 27 Densidades de la dosificación 1: Concreto con relave (10% de arena gruesa), arena gruesa y confitillo.	56
Tabla 28 Densidades de la dosificación 2: Concreto con relave (25% de arena gruesa), arena gruesa y confitillo.	56
Tabla 29 Densidades de la dosificación 3: Concreto con relave (50% de arena gruesa), arena gruesa y confitillo.	57
Tabla 30 Relación agua cemento de la dosificación 1.....	59
Tabla 31 Relación agua cemento de la dosificación 2.....	59
Tabla 32 Relación agua cemento de la dosificación 3.....	60
Tabla 33 Resistencia a la compresión de la dosificación 1	61
Tabla 34 Resistencia a la compresión de la dosificación 2	61
Tabla 35 Resistencia a la compresión de la dosificación 3	62
Tabla 36 Evolución de la resistencia de la dosificación 1	63
Tabla 37 Evolución de la resistencia de la dosificación 2.....	63
Tabla 38 Evolución de la resistencia de la dosificación 3.....	64
Tabla 39 Comparación cada relación de la dosificación 1.	69
Tabla 40 Comparación cada relación de la dosificación 2.	71
Tabla 41 Comparación cada relación de la dosificación 3.	73
Tabla 42 Factor de corrección	76
Tabla 43 Cálculo resistencia requerida.....	77
Tabla 44 Resistencia agregada	77
Tabla 45 Volúmen unitario de agua	78
Tabla 46 Contenido de aire atrapado.....	79
Tabla 47 Volúmenes absolutos sin agregados.....	85
Tabla 48 Resultados de compresión de las muestras con dosificación D3-4	88
Tabla 49 Resultados de compresión de las muestras con cálculos del ACI.....	89
Tabla 50 Resultados de ensayos de contenido metálico del lixiviado.....	90
Tabla 51 Tiempo que demanda las actividades de elaboración de bloque de concreto	92
Tabla 52 Volúmenes de material utilizados	92
Tabla 53 Dimensiones del bloque de concreto	93

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Proyecto de ley 1974/2012.....	8
Figura 2 Ubicación de los Pasivos Ambientales de la EUM “Mercedes 3”	13
Figura 3 Esquema de procesamiento de cobre	16
Figura 4 Modelo de informe de ensayo análisis ABA.....	18
Figura 5 Promedio de resultados de compression en 7 y 28 días	23
Figura 6 Resistencia en el tiempo de agregado normal y con relave	25
Figura 7 Ubicación de centros poblados cercanos.....	26
Figura 8 Tipos de ladrillo	27
Figura 9 Ladrillos de arcilla con eflorescencia.....	29
Figura 10 Prueba de eflorescencia.....	30
Figura 11 Terraza de vivienda	30
Figura 12 Curva granulométrica.....	35
Figura 13 Relación entre el factor de compresión y a/c	65
Figura 14 Relación $f'c$ y a/c de la dosificación 1: Concreto con relave (10% de arena gruesa), arena gruesa y confitillo.	65
Figura 15 Relación $f'c$ y a/c de la dosificación 2: Concreto con relave (25% de arena gruesa), arena gruesa y confitillo.	66
Figura 16 Relación $f'c$ y a/c de la dosificación 3: Concreto con relave (50% de arena gruesa), arena gruesa y confitillo.	66
Figura 17 Dosificación 1: Concreto con relave (10% de arena gruesa), arena gruesa y confitillo-R1.	67
Figura 18 Dosificación 1: Concreto con relave (10% de arena gruesa), arena gruesa y confitillo-R2.	68
Figura 19 Dosificación 1: Concreto con relave (10% de arena gruesa), arena gruesa y confitillo-R3.	68
Figura 20 Dosificación 2: Concreto con relave (25% de arena gruesa), arena gruesa y confitillo-R1	69
Figura 21 Dosificación 2: Concreto con relave (25% de arena gruesa), arena gruesa y confitillo-R2	70
Figura 22 Dosificación 2: Concreto con relave (25% de arena gruesa), arena gruesa y confitillo-R3	70

Figura 23 Dosificación 3: Concreto con relave (50% de arena gruesa), arena gruesa y confitillo-R1.	71
Figura 24 Dosificación 3: Concreto con relave (50% de arena gruesa), arena gruesa y confitillo-R2.	72
Figura 25 Dosificación 3: Concreto con relave (50% de arena gruesa), arena gruesa y confitillo-R3.	72
Figura 26 Bloque propuesto para el trabajo de investigación	84
Figura 27 Análisis de precios unitarios	94

ÍNDICE DE FOTOS

Foto 1 Contaminación de cuerpos hídricos por relave minero.....	5
Foto 2 Contaminación del suelo por relave minero.....	6
Foto 3 Contaminación del material particulado por el relave	6
Foto 4 Ensayo de compresión de bloque de 200x150x400mm	23
Foto 5 Relavera PAM 13319	47
Foto 6 Material de relave PAM 13319	47
Foto 7 Peso de probeta para la prueba de absorción.....	87
Foto 8 Ensayo de compresión del bloque de concreto	88
Foto 9 Material triturado para ensayos finales de calidad ambiental	89

ÍNDICE DE FORMULAS

Fórmula 1 Resistencia a la compresión requerida	40
Fórmula 2 Desviación estandar para datos mayores a 30.....	40
Fórmula 3 Desviación estandar para datos entre 15 y 29	41
Fórmula 4 Cálculo contenido de cemento	44
Fórmula 5 Cálculo de agregado grueso	45
Fórmula 6 Cálculo de relación agua - cemento	58
Fórmula 7 Resistencia a la compresión requerida	75
Fórmula 8 Desviación estándar para datos mayores a 30.....	76
Fórmula 9 Desviación estándar para datos entre 15 a 29	76
Fórmula 10 Contenido de cemento Fuente: ACI.....	79

Fórmula 11 Cálculo de volúmen de agregado grueso Fuente: ACI	80
Fórmula 12 Cálculo de volúmen de agregado fino.....	80
Fórmula 13 Peso seco de agregado grueso	81
Fórmula 14 Peso seco de agregado fino	81
Fórmula 15 Peso húmedo del agregado grueso	81
Fórmula 16 Peso húmedo del agregado fino	82
Fórmula 17 Agua en el agregado grueso	82
Fórmula 18 Agua en el agregado fino	83
Fórmula 19 Agua en el relave	83

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1 - Caracterización de agregados	101
Anexo 2 - Ensayo químico mineralógico al relave.....	105
Anexo 3 - Cálculos de mezcla	118
Anexo 4 - Ensayos químicos al bloque de concreto	136
Anexo 5 - Panel fotográfico	145
Anexo 6 - Trabajos en laboratorio y solicitudes realizadas.....	157
Anexo 7 – Encuestas	165
Anexo 8 - Análisis de precios unitarios.....	174

1 INTRODUCCIÓN

El presente Estudio de Investigación tiene por finalidad presentar una solución para el uso de los relaves mineros como insumo para la fabricación de unidades de albañilería que podría desarrollarse en las zonas aledañas a Pasivos Ambientales Mineros (PAMs) para los próximos años.

Los PAMs son componentes mineros abandonados que pudieron ser originados producto de la exploración, explotación o refinación de minerales, estos componentes han sido abandonados, generan un problema ambiental y visual. En el Perú existen 892 Ex Unidades Mineras según el último inventario realizado por el Ministerio de Energía y Minas el año 2018, distribuidos a lo largo del territorio nacional con 8 794¹ PAMs de los cuales 341 de estos componentes son relaves mineros.

La minería es una actividad extractiva que consiste en la recuperación selectiva de minerales y otros materiales obtenidos de la corteza terrestre, la cual en muchos casos, implica la extracción física de grandes cantidades de suelo y roca, para recuperar sólo pequeños volúmenes del producto deseado. En enero de 2016 se han explotado en el Perú aproximadamente 62 MMC de roca para la extracción de Oro, plata, cobre, entre otros. Los residuos que generaron estas explotaciones son de aproximadamente 59 MMC casi el 96% del material removido, acumulándose en depósitos de desmontes, depósitos de relaves, depósitos de escorias o pads de lixiviación según sea su tecnología de extracción y del mineral a recuperar.

Elegimos este tema por ser de interés nacional en la constante contaminación ambiental que generan los relaves desde hace muchos años, como es la contaminación por material particulado, contaminación al agua y suelos. Sabemos que la actividad minera es una de las actividades más importantes en nuestro país y por la que hemos tenido un notable crecimiento económico en los últimos años, no obstante que, para las poblaciones aledañas a los yacimientos mineros y una minoría de la población, la minería es enemiga pública del medio ambiente y el desarrollo local. Sin embargo, en el actual contexto ecológico de la minería moderna se viene desarrollando cuidados especiales en el manejo de los procesos de

¹ Ministerio de Energía y Minas 2018

extracción de mineral y sus derivados con el fin de que sean amigables con el medio ambiente y no generen impactos negativos significantes a la población.

El presente trabajo de investigación no plantea la eliminación total de los depósitos de relaves o relaveras, es decir que esta propuesta de uso de relaves es solo con el fin de utilizar un porcentaje del relave como agregado en la fabricación de unidades de albañilería. Así mismo se propone soluciones a la problemática ambiental nacional, mediante un valor agregado que se le daría al relave para que se permita su utilización en las construcciones civiles.

2 OBJETO DE LA INVESTIGACIÓN

2.1 Tema de investigación

2.1.1 El tema

El tema del proyecto de investigación se titula:

Propuesta de uso de relaves de mina polimetálica en la fabricación de unidades de albañilería - caso Ex Unidad Minera Mercedes 3.

2.1.2 Justificación

Actualmente existen propuestas para uso de desmontes de construcción para reciclarlos y usarlos como agregados en concretos, en lo que se refiere a los desechos mineros se tiene muy poca investigación probablemente a que la actividad minera es solo destinada a la explotación del mineral y no se enfoque en otros temas. Sin embargo, es un punto importante ya que en el tiempo ha habido problemas ambientales producto de los componentes mineros y también porque es una actividad económica importante por este motivo es necesario buscar soluciones ingenieriles para aprovechar recursos en los que la población utilice, como es el caso de usar los relaves. Se toma el caso de la Ex Unidad Mercedes 3, ya que es una relavera que se encuentra en la cabecera del centro poblado de Huallanca y al pie del río Santa Rosa, cuyas aguas en época de avenidas sube al relave, es por esta razón la importancia de buscar dar solución al impacto que genera la relavera de la Ex Unidad Mercedes 3.

2.1.2.1 Impactos que producen los relaves

Desde hace décadas los problemas ambientales de las empresas mineras justamente son por los desechos que estas producen, sean sólidos o líquidos, producto de un mal manejo por falta de procedimientos o guías de manejo de materiales peligrosos, la falta de normativa sancionadora que obligue al cumplimiento de buenas prácticas y sobre todo falta de compromiso al cuidado del medio ambiente. Con el tiempo hemos aprendido a consecuencia de enfermedades, pérdidas de vidas, pérdidas de infraestructura a tener mejor control en los procesos y disposición de residuos. La minería ha ido cambiando con el paso de los años, las mejoras tecnológicas y la preocupación medioambiental durante el proceso del mineral han sido más estrictos, pero aún nos quedan las consecuencias de aquellos sucesos que nos hicieron aprender a hacer buenas prácticas en toda esta industria, como es el caso de las minas abandonadas o pasivos ambientales mineros, minas que han realizado operaciones sin ningún control normativo ni ambiental y que perduran en el tiempo. Algunos de estas

relaveras uno más significativo que otro genera problemas importantes en la población y el ecosistema.

El hecho que la minería formal utilice o siga los lineamientos de buenas prácticas ambientales no garantiza que los componentes mineros no impacten al medio en un futuro, esto dependerá del mantenimiento vigilancia y control de los mismos a través del tiempo.

Vale la pena recalcar que aún existe en nuestro medio la minería informal que es la que más daño causa al medio ambiente y dentro del grupo de daños esta la población, esto debido a que ejecutan sus actividades extractivas en espacios prohibidos como riberas de ríos, zonas de amortiguamiento de áreas naturales protegidas entre otros. Además de eso no, cumplen con las exigencias administrativas, técnicas, sociales, ambientales y legales. Por otro lado, también existe la minería “artesanal” aproximadamente 70 mil mineros², que está compuesto por grupos de mineros antes informales y lograron un permiso administrativo con condicional de cumplimientos ambientales y se les otorga la autorización para explotar mineral, este mecanismo no siempre funciona porque los informales pasan a ser artesanales, pero en la mayoría de los casos no cumplen sus compromisos ambientales.

a. Impactos Ambientales

Son los efectos que los relaves podrían provocar en el espacio físico y el entorno donde se ubican, de manera que impactan directamente al aire, suelo, agua y al paisaje en condiciones normales de operación. Por otro lado estos impactos son mayores o catastróficos si llegara a romperse o perder estabilidad la relavera o depósito de relaves.

El primer impacto es el paisaje, ya que debido a su acumulación ocupan grandes áreas de cobertura vegetal, esta cobertura es desbrozada para dar lugar a los grandes depósitos de relaves, modificando su relieve, hay que tener en cuenta que los depósitos de relaves son componentes mineros que permanecerán para siempre en donde se sitúen. Visto de este modo se trataría de terrenos o colinas que dejaran de existir.

El segundo importante sería el impacto al agua, que se da en el agua superficial y el agua subterránea pudiendo contaminar los acuíferos, ríos cercanos, esto se produce a la filtración productos de las lluvias sobre el depósito de relaves o por desborde de los relaves a cuerpos de agua. Esta contaminación también ocurre por los conductos que transportan el relave.

² Gamarra 2006

En el caso de la contaminación al aire se produce por la erosión propia del clima, lo cual genera material particulado viajando por el aire por grandes distancias. Finalmente, el material particulado que se traslada mediante el viento se asienta sobre cultivos, áreas verdes o en viviendas de las comunidades campesinas. Entonces el relave compromete toda un área más allá de su espacio físico, es por esto que en los estudios ambientales se considera un área directa e indirecta que podría contaminar el depósito de relave de cualquier unidad minera.

En las siguientes fotos se pueden ver los tipos de contaminación generados por los relaves.

Foto 1 Contaminación de cuerpos hídricos por relave minero.

Elaboración propia

Foto 2 Contaminación del suelo por relave minero.

Elaboración propia

Foto 3 Contaminación del material particulado por el relave

Elaboración propia

b. Impactos sociales

Estos son los referidos a todos los impactos causados a la salud y económica a consecuencia de los impactos que generaron los relaves.

Los relaves también originan efectos en los modos de vida de las poblaciones humanas, es más delicado cuando se trata de salud de las personas. La composición toxica de los relaves agrava el riesgo de que las personas sufran alteraciones a la salud altamente nocivas.

La medicina reconoce numerosas enfermedades por el contacto con el material proveniente de relaves mineros. Por otro lado, también tiene que ver con aspectos económicos ya que al contaminar las fuentes de agua del que se abastecen las poblaciones al verse contaminadas, provoca perturbación al estilo de vida de las personas.

El fin de este estudio es encontrar la metodología adecuada que utilice el relave sin afectar el medio ambiente, de tal manera que se genere menos contaminación, es así que se propone el de utilizar los relaves para la fabricación de ladrillos de tal manera que se encuentre un uso sostenible a las poblaciones cercanas de las unidades mineras.

2.1.3 Antecedentes

Lima

Según los estudios realizados por el Docente Alfonso Romero de la UNMSM se podrían construir más de 5 millones de vivienda hechos con ladrillos de relaves.

“Podríamos evitar que la actividad minera siga contaminando los valles y ríos del país fabricando ladrillos a bajo costo y con seguridad para las personas que decidan construir sus casas con estos materiales.” (Alfonso Romero, 2010)³.

En ese sentido, el investigador adelantó que la universidad presentará un proyecto de ley al Congreso para que se autorice la construcción de viviendas y caminos con relaves mineros procesados.

Por otro lado, siguiendo la iniciativa de Alfonso Romero, en enero del 2012, el congresista de la republica Mesías Guevara, propuso el proyecto de ley que declara de interés nacional y necesidad pública la transformación de relaves mineros en materiales de construcción. En la siguiente figura se presenta el proyecto de ley.

³ Romero 2010

Congreso de la República

Proyecto de Ley N° 1974/2012-CR

El Congresista de la República que suscribe, Mesías Guevara Amasifuen, representante de la Región Cajamarca, por intermedio del Grupo Parlamentario Acción Popular-Frente Amplio, ejerciendo el derecho a iniciativa legislativa que le confiere el Artículo 107º de la Constitución Política y de conformidad con los Artículos 75º y 76º del Reglamento del Congreso de la República, propone el siguiente Proyecto de Ley:

PROYECTO DE LEY

LEY QUE DECLARA DE INTERÉS NACIONAL Y NECESIDAD PÚBLICA LA TRANSFORMACIÓN DE RELAVES MINEROS EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN

ARTÍCULO 1º.- Objeto de la Ley

Declárese de interés nacional y necesidad pública la transformación de relaves mineros en materiales de construcción, considerando la gravedad de riesgos potenciales y de daño a las poblaciones y al medio ambiente que se desprenden de las acumulaciones y depósitos de relaves, así como la viabilidad probada de transformarlos en productos inocuos de uso para la industria de la construcción, tales como: agregados de construcción, ladrillos, tejas y otros afines.

ARTÍCULO 2º.- Alcances.

Están comprendidos en los alcances de la presente ley:

- Sector Público. Organismos del Gobierno Nacional, Gobiernos Regionales y Gobiernos Locales del país.
- Empresas mineras que como producto de sus actividades generen desechos o relaves mineros.
- Otras personas naturales y jurídicas del sector privado, micro y pequeñas empresas, cooperativas, empresas comunales y multicomunales, cuyo giro sea la producción de insumos para la industria de la construcción.

ARTÍCULO 3º.- Condiciones

Las personas naturales ó jurídicas cuyo concurso fuese requerido para el procesamiento de relaves y su transformación en productos de uso para la industria de la construcción, deberán acreditar fehacientemente hallarse en posesión de las tecnologías apropiadas para el efecto y contar con la o las certificaciones de estándares, de especificaciones técnicas y de calidad, que acrediten la calidad de los procesos, bienes y servicios producidos en concordancia con las normas técnicas y de seguridad de nivel mundial.

Figura 1 Proyecto de ley 1974/2012

Congreso de la Republica

La propuesta de ley recomendó la NO APROBACION, por los siguientes motivos:

- Se estaría obligando a las empresas mineras a poner plantas para elaboración de ladrillos y no de manera voluntaria.
- Falta de estudios prácticos y sustento técnico, los estudios que justifican su viabilidad son a nivel de laboratorio y no se ha llevado a nivel de planta piloto.

En Arequipa

La universidad Católica San Pablo ha desarrollado el primer proyecto de reciclaje de relaves de minería artesanal del país. Se pretende instalar una planta piloto utilizando como materia prima los relaves del proceso de cianuración aplicado a la extracción de oro. Proyecto realizado por docentes de la universidad mencionada. Enero 2013.

En Chile

La Facultad de Ingeniería de la Universidad Andrés Bello plantea una propuesta para dar al relave propiedades cementiles y se encuentra desarrollando una investigación que apunta hacia esta misma dirección de darle un aprovechamiento a los relaves. De acuerdo a los estudios mineralógicos y químicos que han realizado en los relaves, la presencia de alúmina (Al_2O_3), sílice (SiO_2) y un activador alcalino tal como hidróxido de sodio ($NaOH$) permitirían la creación de geopolímeros.

Éstos son cementos que se caracterizan por presentar resistencia química y térmica, buenas propiedades mecánicas, bajos niveles de emisiones de CO_2 y menores costos de producción.

Juan Céspedes, director de la carrera de Ingeniería en Minas, explica que si bien para neutralizar los metales pesados que poseen los relaves existen técnicas de micro-encapsulamiento, dicha tecnología dependerá del tipo de residuo.

“Es decir, no existe receta única, sino que dependerá de la empresa y del relave en particular”. Minería chilena 2012 ⁴.

EE. UU – Arizona

El Profesor Lianyang Zhang, Ph.D., de la facultad de ingeniería civil e ingeniería mecánica de la universidad de Arizona en Tucson, Arizona propuso en el año 2012 el reciclaje y utilización de relave minero como material de construcción usando la geopolimerización.

A primera vista, la premisa de la investigación Lianyang Zhang parece tan obvio que no puede fallar. Él es el científico de la Universidad de Arizona, la experimentación con el

⁴ Minería Chilena 2012

reciclaje de desechos de la minería en los materiales de construcción para la construcción de carreteras, puentes y otras estructuras.

Si el proceso se vuelve comercialmente viable, que tiene el potencial para poner en marcha una industria de mil millones de dólares en Arizona - una nueva "mina de oro del comercio" de los residuos rocosos.

Los materiales utilizados en esta investigación incluyen desechos de la minería de cobre (MT), reactivo grado 98% de hidróxido de sodio (NaOH), y agua desionizada. Los desechos de la minería fueron recibidos en forma de polvo seco de la Misión de Operaciones Mina ASARCO LLC en Tucson, Arizona.

Se puede ver que los residuos mineros consisten principalmente en sílice y alúmina con cantidad sustancial de calcio y hierro. Se realizó un análisis de distribución de tamaño de grano en los desechos de la minería utilizando tamizado mecánico y análisis del hidrómetro siguiente D6913 ASTM D422 y ASTM. Higo. 1 muestra la distribución de tamaño de partícula curva. El tamaño medio de las partículas es de alrededor de 120 μm con 36% de partículas que pasan No. 200 (75 μm) tamiz. El peso específico de las partículas de MT es de 2.83. El patrón de XRD de los desechos de la minería se muestra en la figura polvo. 2. Los desechos de las minas son principalmente cristalina materiales que consisten en cuarzo (SiO_2) como componente principal, albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$), sanidina (K, Na) (Si , Al) 4O_8 y yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

El hidróxido de sodio (NaOH) escamas se obtuvieron de Alfa Aesar Company en Ward Hill, Massachusetts. La solución de hidróxido de sodio se prepara disolviendo las escamas de hidróxido de sodio en agua desionizada.⁵

2.2 El problema de la investigación

2.2.1 Situación problemática

El problema principal es ver de qué manera se pueden utilizar los relaves producto de la minería polimetálica en la fabricación de unidades de albañilería. Esto ayudaría a contribuir en un pequeño porcentaje a la reducción de los volúmenes de relaves. Los depósitos de relaves o relaveras están en constante crecimiento y solo son almacenados en grandes espacios. Los problemas ambientales y sociales que causan los relaves son por no contar con

⁵ Lianyang Zhang 2012:10

los debidos cuidados como es el de almacenarlos sin protección contra la erosión y la permeabilidad, lo mismo que conlleva a riesgos para la salud de las personas y animales. Un buen diseño de depósitos de relaves tiene que contener necesariamente un análisis de estabilidad física, química e hidrológica, estos tres criterios no se encuentran en ningún relave que sea pasivo ambiental.

2.2.2 Problemas a resolver

Para resolver el problema principal es necesario conocer y resolver otros problemas secundarios que conducirían esta propuesta. En primer lugar, como se mencionó los relaves han traído problemas sociales y ambientales por consiguiente se tendría que conocer si la población estaría de acuerdo con la utilización de los relaves en la fabricación de unidades de albañilería. En segundo lugar, sería diseñar la mezcla para la unidad de albañilería que cumpla con la norma técnica peruana. En tercer lugar, si los metales que están en los relaves podrían estabilizarse o bloquearse a fin de que no generen aguas ácidas y finalmente conocer cuánto relave se requiere para la producción según la demanda de ladrillos y su análisis costo beneficio de esta producción.

El tema de investigación de este estudio pretende demostrar que es posible la utilización de los relaves mineros con aplicación de agentes químicos para la elaboración de ladrillos, el fin sería reducción progresiva de volúmenes de relaves y con ello reduciendo los impactos que generan actualmente y también podría ser una actividad sostenible para los ingresos a la comunidad.

2.3 Objetivos

2.3.1 Objetivo general

Determinar la cuantía de adición de relave de la Ex Unidad Minera Mercedes 3, como agregado fino que cumpla con las propiedades físicas, mecánicas, económicas y ambientales del concreto en la fabricación de unidades de albañilería estructural.

2.3.2 Objetivos específicos

- Describir las razones por las que los relaves son un problema ambiental y social
- Describir los métodos de estabilización de los metales en el relave.
- Realizar el diseño de mezcla con el método de la ACI, utilizando relave, que cumpla con la NTP 399.602 para la fabricación de unidades de albañilería estructural (bloques de concreto).

- Verificar que la utilización del relave de la Ex Unidad Mercedes 3, no generara problemas con la salud y el medio ambiente.
- Verificar que la elaboración de bloques de concreto, con relave, cumple con la NTP 399.602.
- Calcular el costo de la unidad de albañilería con el diseño de mezcla requerido.

2.4 Campo de acción de la organización objetivo

La Ex Unidad Minera Mercedes 3, en adelante Mercedes 3, era una actividad minera de explotación de mineral, en la que se presume explotaban plata, no se tienen identificado a los responsables de la generación de los desechos (desmontes y relavera). En la última década el Ministerio de Energía y Minas (MINEM) ha desarrollado actividades de identificación de los Pasivos Ambientales Mineros (PAMs) con la finalidad de dar una solución integral a su cierre en forma definitiva, adecuada y certificada por la autoridad.

Mercedes 3, está ubicado en el distrito de Huallanca, provincia de Bolognesi en el departamento de Ancash. El distrito de Huallanca en el 2007 tuvo una población de 8 249 ⁶ habitantes.

El año 2014 el MINEM inicia el Programa “REMEDIACIÓN DE PASIVOS AMBIENTALES MINEROS DE MUY ALTO RIESGO Y DE ALTO RIESGO UBICADOS EN LAS CUENCAS DE ALTO MARAÑÓN, APURÍMAC, MANTARO, SANTA, ILLPA Y PATIVILCA” en el que se identificó como problema central las “Inadecuadas condiciones socio ambientales generadas por los PAMs calificados de muy alto riesgo y alto riesgo en las cuencas del Alto Marañón, Apurímac, Mantaro, Santa, Illpa y Pativilca”. Del diagnóstico obtenido en este programa se han agrupado los PAMs de Muy Alto Riesgo y de Alto Riesgo ubicados en las 06 cuencas antes mencionadas, dentro de un Programa de Inversión para la remediación de un total de 940 PAMs agrupados en 47 proyectos o Ex unidades Mineras, dentro de las cuales se considera Mercedes 3 con 109 PAMs identificados.

En la siguiente figura se muestra la ubicación de la Ex Unidad Mercedes 3.

⁶ INEI 2007.

Figura 2 Ubicación de los Pasivos Ambientales de la EUM “Mercedes 3”

Elaboración propia

2.5 Alcances

El presente tema de investigación pretende demostrar que es posible el uso del relave polimetálico de la Ex UM Mercedes 3 y usarlo como agregado en una dosificación adecuada, de tal manera que cumpla con los estándares de las normas peruanas en el aspecto técnico y ambiental. Este estudio demostrara si es posible o no el uso del relave realizando ensayos de compresión, densidad y absorción, ensayos que son lo que se realizan a los bloques de concreto convencionales.

El presente estudio no pretende que la empresa minera en el futuro tenga como unidad de negocio una planta de ladrillos. El fin de este estudio es buscar una medida de contribución con el medio ambiente el mismo que involucra al social y que podría representar un modelo para ser utilizado en otras unidades mineras o pasivos ambientales mineros que abundan en el Perú.

3 MARCO TEORICO

En el presente capítulo se describirá los principales conceptos que apoyen el trabajo para profundizar la investigación. En primer lugar se mencionara las actividades mineras, los desechos mineros, una explicación de cómo se generan los relaves. Por la parte ambiental se describe como la normativa ambiental peruana controla los límites máximos de los metales en el medio ambiente. En segundo lugar, se mencionara la población que involucra el proyecto de investigación, así mismo, se describirá la unidad de albañilería desde el punto de vista físico, mecánico y calidad. Finalmente, se menciona el procedimiento de diseño de mezcla tomando las recomendaciones del ACI.

3.1 Los relaves de minería polimetálica

3.1.1 El mineral

La minería es la actividad que el ser humano realiza para extraer y utilizar los minerales que existen en la corteza terrestre. Este aprovechamiento de los recursos minerales está presente desde las más antiguas edades. Se utilizó para la alimentación con la extracción de sal común, elaboración de armas o artefactos primitivos para uso doméstico o industrial.

Si miramos alrededor, de una u otra forma, estaremos viendo minerales. No en sus estados puros, pero sí en alguna de sus más diversas aplicaciones y mezclas (aleaciones), ya que los minerales están presentes en gran parte de los objetos de nuestra vida cotidiana.

Los minerales están presentes en las casas que habitamos, en los medios de transporte en los que nos movemos, en los objetos tecnológicos con los que nos conectamos, en los medicamentos con los que nos mejoramos, e incluso en lo que comemos. Si hiciéramos una lista, sería más fácil encontrar objetos que contienen minerales a encontrar objetos que no poseen minerales.

3.1.2 El relave

El relave o cola es un conjunto de desechos tóxicos subatómicos de procesos mineros y de concentración de minerales usualmente constituido por tierra, minerales, agua y rocas.

Los relaves contienen altas concentraciones de químicos y elementos que afectan el medio ambiente, por lo que su transporte y disposición final debe ser estable tanto físico, hidrológico y químico en el transcurso del tiempo.

3.1.2.1 Generación de relaves

En el contexto actual de la minería moderna, los relaves pertenecen al desecho del material producto del procedimiento de flotación, que se realiza para el rescate del mineral. La generación de relaves se da tanto para la minería subterránea o superficial.

Entonces esto se produce cuando a las mazas de roca extraídas de la tierra pasan por el proceso de chancado primario, luego por el chancado secundario y luego son depositados en una molienda para finalmente ponerlo en la tanque de flotación para la recuperación propiamente del mineral a extraerse, es en este proceso donde se le agregan sustancias químicas para ayudar a separar los metales entre si y por gravimetría hacer que flote el mineral y que los sedimentos de la flotación son propiamente los relaves. Se toma en cuenta la recuperación del agua de los relaves en su máxima expresión con el fin de utilizarlo nuevamente en la explotación y en planta de proceso. En la siguiente figura se muestra un esquema de proceso de cobre.

Se observa que desde el traslado de la roca fracturada pasa por chancadoras (2 o 3) y molindas, para luego pasar a una cámara de flotación donde separan el mineral del material bajo en ley, es ahí donde el material en pasta resultante de la extracción del mineral se le denomina relave y es trasladado a los depósitos de relaves. Los grandes volúmenes de almacenamiento de los relaves lo vuelven un componente importante en cuanto a seguridad por su estabilidad y ambiental por la generación de drenaje ácido. Sin embargo, los depósitos de relaves son diseñados teniendo en cuenta los criterios ambientales impermeabilizando el basamento y considerando un dique de contención acorde con sus diseños de estabilidad.

Para el caso de la relavera en Mercedes 3, el proceso de recuperación del mineral fue artesanal en los que realizaron los mismos procedimientos.

Figura 3 Esquema de procesamiento de cobre

Cochilco

3.1.2.2 Regulación de estándares ambientales

Para tener un mejor control sobre los impactos que generaron o generan actualmente la minería, la legislación peruana adoptó Estándares de calidad ambiental (ECAs) de aire, agua, suelo y ruido, actualmente regulado por el Ministerio del Ambiente, que se aplican a diferentes rubros industriales y mineros, cuyos objetivos son el de lograr el ordenamiento de las actividades económicas dentro del marco de la conservación ambiental y el aprovechamiento sostenible de los recursos naturales.

Los monitoreos para la medición de los ECAs son realizados por laboratorios acreditados por INACAL, lo que garantiza la confiabilidad del resultado.

Para el presente trabajo de investigación se va a caracterizar el relave antes y después de haber realizado el bloque de concreto. En el primer caso los ensayos a realizarse son como caracterización del material y se realizara análisis de contenido metálico, Prueba ABA y Prueba SPLP. Luego de haber terminado los ensayos de compresión y la dosificación que resulte más favorable en el diseño de mezcla, se le realizara un ensayo de liberación de metales al bloque de concreto triturado, estos ensayos se detallan a continuación:

a. Metales disueltos

Análisis de metales se realizan de acuerdo al procedimiento EPA 200.7 EPA 200.7 (ICPOES) & EPA 200.8 (ICPMS). En la siguiente tabla se muestran los límites de detección para metales totales.

Tabla 1

Límites Máximos Permisibles para la descarga de efluentes líquidos para actividades minero metalúrgicas

Parámetro	Límite	Unidad
pH	6-9	--
Sólidos totales en suspensión	50	mg/L
Aceites y grasas	20	mg/L
Cianuro total	1	mg/L
Arsénico (As)	0.1	mg/L
Cadmio (Cd)	0.05	mg/L
Cromo hexavalente	0.1	mg/L
Cobre (Cu)	0.5	mg/L
Hierro (Fe)	2	mg/L
Mercurio (Hg)	0.002	mg/L
Plomo (Pb)	0.2	mg/L
Zinc (Zn)	1.5	mg/L

Fuente: MINAM⁷

b. Prueba ABA

El test ABA (Acid-Base Accounting), sigue siendo uno de los ensayos geoquímicos más utilizados como elemento predictor del potencial de generación de drenaje ácido.

En su concepto más básico, el test ABA consiste en establecer el potencial de generación de ácido (PA) y el potencial de neutralización (PN) de una determinada muestra para finalmente, en función de ambos, PA y PN, determinar el potencial neto de neutralización (NPN) y la ratio PN/PA. Ambos resultados pueden ser comparados con valores referenciales, con el objeto desclasificar las muestras como potenciales o no potenciales generadoras de drenaje ácido.

Las relaciones que dan los resultados ABA:

$PNN = PN - PA$, considerando que:

⁷ Ministerio del ambiente 2010

Si $PNN > +20$, la muestra NO GENERA DRENAJE ÁCIDO

Si $PNN < -20$, la muestra SI GENERA DRENAJE ÁCIDO

Si $-20 < PNN < +20$, la muestra es de comportamiento INCIERTO

En la siguiente figura se presenta un modelo de Informe de ensayo ABA.

RESULTADOS

Muestras		Elementos								
N°	Codigo de Servicio Elemento Unidad Limite de Detección	MON0000 Tipo Muestra	MA0398 pH-Pulpa pH	MA0398 S(t) % 0.01	MA0398 S_SO4= % 0.01	MA0398 S= % 0.01	MA0398 PN KgCaCO3/t	MA0398 PA KgCaCO3/t 0.01	MA0398 PNN KgCaCO3/t	MA0398 PN/PA ---
1	PUC10-10	Suelos Ambientales	7.77	0.99	0.34	0.65	570.19	20.31	549.87	28.07
2	PUC10-11	Suelos Ambientales	8.60	0.05	0.04	0.01	61.96	0.45	61.51	138.65
3	PUC11-01	Suelos Ambientales	9.26	0.03	0.02	0.01	90.90	0.46	90.44	197.87
4	PUC11-02	Suelos Ambientales	6.52	2.96	0.64	2.32	36.20	72.47	-36.27	0.50
5	PUC11-03	Suelos Ambientales	6.88	2.43	0.35	2.08	45.55	64.84	-19.29	0.70

Las muestras son proporcionadas por el cliente.
SSO4 = Azufre como Sulfato (KgCaCO3 equiv/t material)
PA = Potencial de Generación ácido (KgCaCO3 equiv/t material)
PN = Potencial de Neutralización (KgCaCO3 equiv/t material)
PNN = Potencial Neto de Neutralización (KgCaCO3 equiv/t material)
Bajo o Nulo Potencial de Generación de Acido $PNN > 20$ o $PN/PA > 3$
Potencial Marginal de Generación de Acido $PNN < 20$ o $1 < PN/PA < 3$
Alto Potencial de Generación de Acido $PNN < 0$ o $PN/PA < 1$

Figura 4 Modelo de informe de ensayo análisis ABA

Laboratorio CERTIMIN

c. Prueba SPLP

Es un procedimiento de precipitación sintética EPA 1312⁸, fue originalmente diseñado para evaluar el nivel de limpieza de un suelo en los programas de cierre de minas de la EPA. El test podría estimar la liberación de metales desde residuos puestos en un vertedero y expuestos a lluvia ácida.

El procedimiento, similar al Test TCLP consiste básicamente en una lixiviación a temperatura y agitación controlada (25°C y 30 rpm) por un tiempo de 18 + 2 h con un fluido preparado con una mezcla de ácido sulfúrico y ácido nítrico.

El extracto líquido obtenido después de la lixiviación es analizado por los parámetros As, Ba, Cd, Cr, Pb, Hg, Se y Ag, para determinar si presenta cualquiera de estos elementos

⁸ EPA 2018

considerados como peligrosos, en concentraciones superiores a los valores establecidos por la EPA.

3.1.2.3 Alternativas para encapsular los metales en los relaves

De acuerdo a los resultados de los relaves y de su caracterización, en la mayoría de los casos se encuentra contenido metálicos tóxicos, entonces si se requiere utilizar los relaves como material o agregado, lo primero es conveniente neutralizar los metales o encapsularlos a fin de que no generen impacto al consumidor en el futuro.

Mencionaremos las técnicas utilizadas para encapsular metales.

a. Geopolimeros

Los geopolímeros son polímeros sintéticos inorgánicos de aluminosilicatos provenientes de la geopolimerización, que es una reacción química. Estos compuestos fueron desarrollados en la década del 50 en la Unión Soviética, conocidos como cementos de suelo.

Estos aluminosilicatos inorgánicos tienen el potencial para ser utilizados en diversos campos, pero su uso principal es como sustitutos del cemento portland. La gran ventaja de estos productos es que su producción tiene bajas emisiones de CO₂, una gran resistencia química, térmica y buenas propiedades mecánicas, a temperatura ambiente o bajo temperaturas extremas.

La geopolimerización ocurre en condiciones altamente alcalinas, entre una solución activadora (basada en una mezcla de hidróxido sódico y silicato alcalino) y un polvo de aluminosilicato, en condiciones ambientales.

En el laboratorio se emplea usualmente metacaolín como material de partida para sintetizar los geopolímeros, que es generado por la activación térmica de caolinita.

b. Encapsulamiento

Es una técnica que se utiliza para controlar los metales, conocido también como fijación química, es un proceso a través del cual se inmoviliza e insolubiliza a los metales pesados, este efecto se logra a través de una reacción química entre los componentes de los metales pesados en la matriz del relave, los sistemas más comunes para encapsular son el cemento.

Los procesos de encapsulamiento en relaves no son conocidos, sin embargo, el encapsulamiento en escorias es conocido tal como se ha desarrollado en algunos países como

Colombia y Chile, se han elaborado materiales como el ladrillo y baldosas, pero a través de escorias que son materiales residuales de la fundición.

En el Perú, se han elaborado estudios para la obtención de ladrillos a partir de lodos, el caso más conocido es el de la compañía Buenaventura, quienes realizaron el diseño y elaboración de ladrillos a partir de los lodos del proceso metalúrgico.

La hidratación del cemento, se produce cuando se mezcla el cemento con H₂O los silicatos y aluminatos se hidratan, dando lugar una masa rígida y clara conocida con el nombre de cemento endurecido.

Existen dos teorías de hidratación la De Chatelier, y la Micaselis.

La primera hidratación de chatelier está admitida para la hidratación de fases intersticiales y la formación de portlandita. Por su parte la teoría de Micaelis, denominada teoría coloidal está considerada para la hidratación de los silicatos de calcio.

Cuando se da lugar a la etapa de cristalización para formar un cristal de C₂S (di silicato de calcio), esta etapa se caracteriza por estar en contacto con el agua, lo cual da lugar a que se forme inmediatamente alrededor de este grano, una capa de hidratos primarios más pobres en cal que el C₂S. De esta manera, al alcanzarse el límite crítico de solubilidad de la portlandita esta precipita y la solución se empobrece en calcio.

Dos factores influyen decididamente en la velocidad de hidratación: la finura de las partículas y la temperatura, puesto que la reacción tiene lugar a través de las superficies en contacto con la solución una mayor finura del cemento, y por tanto un aumento en la superficie específica, tiende a acelerar la hidratación.

Micro encapsulamiento

Es un proceso de tratamiento para metales pesados y contaminantes orgánicos, que trata en forma efectiva efluentes, aguas y otros líquidos y también residuos sólidos, suelos, sedimentos y relaves contaminados.

Convierte los metales pesados a una forma inerte segura mediante el recubrimiento con sílice y es particularmente efectivo para arsénico, cadmio, mercurio, cobre, plomo, zinc y cromo.

El Proceso de micro cristalización de los metales pesados se realiza para establecer las condiciones de estabilización de los metales pesados a través de la micro cristalización con el cemento andino que se caracteriza por poseer el silicato di y tricálcico, este componente del cemento logra micro cristalizar a los metales pesados presentes en el relave.

Debido a la presencia de silicio (Si) en este tipo de relaves, el proceso de micro cristalización es más efectivo, pues al entrar en esta nueva estructura cristalina se van formando silicatos y carbonatos en forma de arcillas que en el tiempo favorecen la consistencia del ladrillo.

Por otro lado, para el uso del cemento en el proceso de micro cristalización se usa cuando se mezcla el cemento con H₂O los silicatos y aluminatos se hidratan, dando lugar una masa rígida y clara conocida con el nombre de cemento endurecido. Según Chatelier, y la Micaselis, la primera está admitida para la hidratación de fases intersticiales y la formación de portlandita, mientras que hay controversias sobre sus aplicaciones en el caso de silicatos.

La cristalización es un proceso de tratamiento para metales pesados y contaminantes orgánicos, que trata en forma efectiva a los metales pesados en residuos sólidos contaminados. Convierte los metales pesados a una forma inerte segura mediante el recubrimiento con sílice y es particularmente efectivo para arsénico, cadmio, mercurio, cobre, plomo, zinc y cromo.

El procedimiento para encapsular los metales de los relaves va a depender de los resultados (cantidad de metales encontrados) o de si continúan siendo generadoras post mezclas con cemento. La cantidad de cemento a usarse va a depender de las propiedades de resistencia que se quieren lograr 70 kg/cm². En ese sentido el encapsular los metales se estaría logrando en el mejor de los casos con el propio diseño de mezcla.

Si se requiere neutralizar luego de haber realizado los ensayos de ABA al bloque de concreto triturado y este sigue saliendo con potencial de acides entonces al diseño de mezcla se le incluirá hidróxido de sodio (NaOH) en una proporción que logre la neutralización esta es de cada 1000 gr de relave se usaran 15gr de NaOH.

Haciendo una relación aproximada por cada metro cubico de mezcla se requiere máximo 9 kg de NaOH que costaría \$4.5 dólares adicionales por cada m³. Teniendo en cuenta la cantidad de ladrillos que sale por m³ que es de 200 aprox. el precio a un ladrillo convencional se elevaría en S/.0.08 por unidad. Otra opción para neutralizar es el uso de cal y que es más económico que el NaOH su uso va a depender de los ensayos.

3.2 Investigaciones con relaves mineros

Existen investigaciones en la fabricación de bloques de concreto utilizando relaves, a continuación mencionaremos algunos estudios con resultados obtenidos.

3.2.1 Caso en la India

En la India, La International Journal of Engineering Science and Technology, publico que con el apoyo de estudiantes del departamento de ingeniería civil de Sri Taralabalu Jagadguru Institute of Technology – STJIT, dirigidos por el profesor Dr. Shivakumara, realizaron el proyecto de “Fabricación de bloques de construcción mediante el uso de relaves de mineral de hierro”.

Justificación del estudio

“La explotación de los recursos minerales promovería el desarrollo de la economía y la sociedad, pero también generará una sobrecarga masiva, relaves de molino, cieno, etc. que pueden contaminar el medio ambiente en gran medida. Por lo tanto, la utilización integral de residuos / relaves es importante. La mampostería se usa ampliamente para construir estructuras pequeñas y grandes debido a su versatilidad estructural y apariencia atractiva. Para satisfacer las diferentes necesidades de la construcción, se han desarrollado y utilizado varias unidades de albañilería”. IJESC 2017

La proporción óptima en sus ensayos es la siguiente:

Tabla 2
Proporción para mezcla

w/c Ratio	Agua (Kg/m ³)	Cemento (Kg/m ³)	Relave de hierro (Kg/m ³)	Agregados (Kg/m ³)
0.55	211.08	383.78	785.38	1006.4

Fuente: IJESC

Foto 4 Ensayo de compresión de bloque de 200x150x400mm

Fuente: IJESC

Figura 5 Promedio de resultados de compresion en 7 y 28 días

Fuente: IJESC

Dentro de su conclusión de este estudio textualmente menciona lo siguiente:

“La fabricación de materiales y productos para la construcción. Los desechos mineros y relaves se pueden convertir en ladrillos / adoquines, que pueden satisfacer la demanda de ladrillos en las ciudades metropolitanas durante las próximas décadas. También los bloques de construcción a partir de los desechos de la mina son ecológicos ya que utilizan los desechos y reducen la contaminación del aire, la tierra y el agua. Es energéticamente

eficiente y también rentable según lo informado por varios investigadores en el pasado.”

IJESC

3.2.2 Caso en Australia

En Australia, los estudiantes Frnacis Atta, Snajay Kumar y Daryoush de La Universidad Edith Cowan, realizaron un estudio titulado: “Utilisation of iron ore tailings as aggregates in concrete” (Aprovechamiento de los relaves de mineral de hierro como agregados en el hormigón).

El resumen de si tesis se presenta a continuación:

“El manejo sostenible de los relaves de mineral de hierro es una de las principales preocupaciones de todas las partes interesadas que participan en la extracción de mineral de hierro. Este estudio busca agregar valor a los relaves al utilizarlos como un reemplazo para los agregados en el concreto. Se preparó una mezcla de concreto de grado 40 MPa en el laboratorio con una relación agua-cemento de 0.5. El concreto fue curado por 1, 2, 3, 7, 14 y 28 días. Se probaron las propiedades del concreto, como la trabajabilidad, durabilidad, densidad, resistencia a la compresión y resistencia a la tracción indirecta. También se preparó una mezcla controlada de concreto de manera similar utilizando materiales convencionales y los resultados se compararon con los relaves de concreto. Se encontró que los relaves de mineral de hierro se pueden utilizar para reemplazar completamente los agregados convencionales en el concreto. El concreto de los agregados de los relaves de mineral de hierro mostró una buena resistencia mecánica e incluso en el caso de la resistencia a la compresión, hubo una mejora del 11.56% sobre el agregado de concreto convencional. La resistencia a la tracción indirecta no mejoró frente a la mezcla de control debido al alto contenido de finos en los agregados de relaves, pero mostró una mejora del 4.8% en comparación con el estudio anterior, donde los agregados finos convencionales fueron parcialmente reemplazados por un 20% con relaves de mineral de hierro.” Atta y otros 2015.

Diseño de mezcla y preparación de espécimen

Se preparó en el laboratorio un diseño de mezcla de concreto de grado 40 MPa con una relación agua-cemento de 0.5 y una relación de diseño de mezcla de 1: 2: 3 (cemento: agregados finos: agregados gruesos). El diseño de la mezcla recomendado por Marsh (1997 Marsh, B. K. (1997). Diseño de mezclas de concreto normales (2ª ed., Pp. 1–30). Watford: Construction Research and Communications.

Resultados

La siguiente figura muestra la resistencia a la compresión de los agregados normales y de relaves de concreto. Se observó que la resistencia a la compresión para todas las edades de curado era mayor en los agregados de relaves de mineral de hierro que en el concreto normal como la mezcla de control. A la edad de 28 días, la resistencia a la compresión del concreto de los agregados de relaves fue de 36.95 MPa, mientras que la de la mezcla de control fue de 33.12 MPa, lo que muestra una mejora del 11.56% de los agregados de relaves sobre el concreto normal. Esta mejora de la resistencia de los agregados de los relaves de mineral de hierro puede atribuirse a la química asociada con la composición química de los relaves de mineral de hierro.

Figura 6 Resistencia en el tiempo de agregado normal y con relave

Fuente: Kuranchie y otros 2015

Conclusiones

Este estudio evaluó la posibilidad de reemplazar completamente los agregados convencionales en el concreto con los relaves de las minas de mineral de hierro producidos en Australia Occidental para obtener los mismos o mejores resultados para las especificaciones técnicas. En el estudio, se utilizaron agregados convencionales y de relaves para la comparación. Se utilizó un diseño de mezcla de concreto de 40 MPa y una relación agua-cemento de 0.5.

La resistencia a la compresión del concreto con agregados de relaves de mineral de hierro a los 28 días fue de 36.95 MPa.

3.3 Población involucrada

El medio ambiente está compuesto por el ecosistema y la población. Esta alternativa es para beneficio de ambos. Para realizar la propuesta de uso de relave en la fabricación de unidades de albañilería es necesario identificar quienes serían los usuarios del producto final y si los mismos están de acuerdo al uso de los relaves como agregado.

La Ex UM Mercedes 3, está ubicado en el distrito de Huallanca a 1.5 km de la ciudad de Huallanca. También hay otros centros poblados cercanos como: Huaricashash y Conobamba. Ver la siguiente figura.

Figura 7 Ubicación de centros poblados cercanos

Fuente: Google Earth

El área de influencia de su proyecto involucra los centros poblados mencionados.

Existen temores con el uso del material, en general para los que no conocen muy de cerca el material del relave tienden a creer que se trata de un material 100% tóxico y esto no es del todo cierto. Hoy en día hay mecanismos que utilizan los sociólogos o antropólogos para llegar a la población y poder demostrarles que es posible el uso de los relaves. Estos mecanismos son los parecidos a los que utiliza las empresas mineras para poder iniciar actividades de extracción y explotación de mineral dentro de sus territorios. En los que se resumen en encuestas y talleres para conocer su apreciación.

3.3.1 Población

Los más cercanos a nivel de importancia se describen detallan en la siguiente tabla.

Tabla 3
Centro poblado mas cercano a la EUM Mercedes 3

Centro poblado	Hombres	Mujeres	Total
Huallanca	4322	3927	8249

Fuente INEI

La población directamente relacionada es de 8249 habitantes, sin embargo, esta población podría crecer hasta en 14000 habitantes con los demás centros poblados que se mencionaron.

3.3.2 Viviendas material predominante

En Huallanca hay un total de 1750 viviendas en las que predomina notoriamente el uso de adobe tanto en sus paredes como techos. Aquí se ve un indicador importante como es que los centros poblados tienen tendencia a construir sus casas con ladrillos. Como se mencionó en el ítem anterior las demás poblaciones podrían abarcar hasta 1500 viviendas adicionales. En la siguiente tabla se muestra el material de construcción de las viviendas en Huallanca.

Tabla 4
Material de construcción de las viviendas en Huallanca

Centro poblado	ladrillo	Adobe	Madera	Quincha	Otros	Total
Huallanca	157	1455	7	2	129	1750

Fuente INEI

3.4 Unidad de albañilería

Son conocidas como unidades de albañilería a los ladrillos de arcilla, bloque o ladrillo silico calcáreo y bloque de concreto. En la siguiente figura se muestra los diferentes tipos que ofrece el mercado para ladrillos.

Figura 8 Tipos de ladrillo

Fuente: Ladrillos Fortaleza

3.4.1 El ladrillo

Es el material de construcción más antiguo fabricado por el hombre, hecho de arcilla, en los primeros tiempos fue elaborado en forma cruda, como actualmente conocemos como adobe.

El hombre fue dándole forma que se acomode al tamaño de la mano y para hacerlo uso materia prima accesible. Desde los hallazgos más antiguos que datan desde Mesopotamia 6000 a.c. hasta nuestros tiempos se sigue utilizando, a pesar de su aparente simpleza el ladrillo ha sido en todas formas uno de los logros tecnológicos más grandes de la humanidad contribuyendo con el desarrollo de sociedades en construcciones civiles y de su arquitectura.

Características de los ladrillos

Las unidades cerámicas de albañilería se caracterizan por ser porosas y absorbentes al agua así mismo un buen ladrillo cumple con lo siguiente:

- No debe tener grietas o resquebrajaduras
- Variabilidad dimensional
- Resistencia a la compresión mayor a 15kg/cm²
- Debe poder absorber agua no más del 25% y en bloque de concreto no mayor a 15%.
- Debe resistir a temperaturas bajo cero
- Forma homogénea

3.4.1.1 Control de calidad del ladrillo

El control de calidad de la construcción identifica las características de diseño y de ejecución que permitirán verificar cumplimiento del nivel requerido para cada una de las etapas del proceso de construcción y para su vida útil.

El proyecto debe indicar documentación necesaria para garantizar el cumplimiento de las normas de calidad establecidas para la construcción, así como las listas de verificación, controles, ensayos y pruebas que deben realizarse de manera paralela y simultánea a los procesos constructivos.

En tal condición se reglamentan y describen los trabajos que deben realizarse para la ejecución de las obras de Edificación con las normas y requerimientos señalados en:

- Reglamento Nacional de Construcciones
- Norma Técnica Edificación NT – E060 (Concreto)
- Norma Técnica de Edificación NT-E030 (Sismo)

- Norma Técnica de Edificación NT-E050 (Suelos)
- Norma Técnica Edificación NT – E070 (Albañilería)
- American Standard of Testing Materials (ASTM)
- Building Code Requirements for Reinforced Concrete and commentary (ACI 318-95)

3.4.1.2 Pruebas

Muestreo. - el muestreo es efectuado en cada obra por cada lote compuesto por hasta 50 millares de unidades se seleccionan 10 unidades al azar, a estas se le hace pruebas de variación de dimensiones y de alabeo, el alabeo se seguirá siguiendo la NTP 399.613, cinco unidades se ensayarán a compresión y las otras cinco a absorción. Los ensayos de absorción se harán de acuerdo a la NTP 399.604 y 399.613.

Hay que tener en cuenta que la propiedad de los ladrillos para absorber agua por los poros es necesaria para asegurar la adherencia entre unidades de albañilería y el mortero. Sin embargo, si es demasiada la absorción se le resta la humedad al mortero lo que perjudica la adherencia.

En cuanto a la resistencia a la compresión se efectuarán los ensayos de laboratorio correspondientes, de acuerdo a lo indicado en la NTP 399.613 y 399.604. La resistencia a la compresión de una unidad de albañilería varía entre 60 a 200 kg/cm²

Eflorescencia se produce cuando las sales (sulfatos) que contiene la materia prima, se derriten al entrar en contacto con el agua y emergen por los poros cristalizando las superficies. Esto se da solo en ladrillo de arcilla cocida. En la siguiente figura se aprecia la eflorescencia de los sulfatos.

Figura 9 Ladrillos de arcilla con eflorescencia

Fuente: Ing. Carlos Damiani

Como se mide el grado de eflorescencia

Se realiza mediante un método de campo que consiste en colocar sobre una bandeja con 25 mm de agua con dos ladrillos separados 50 mm una de otra durante una semana, luego se retira y se dejan secar. En la siguiente figura se observa el esquema de la prueba de eflorescencia.

Figura 10 Prueba de eflorescencia

Fuente: Ing. Carlos Damiani

3.4.2 Bloque de concreto

El bloque de concreto es una unidad de albañilería hueca con porcentajes de vacíos mayor a 30% fabricada con cemento, arena, piedra, agua, aditivos y de requerirse colorantes basados en óxidos de hierro. Las proporciones de los materiales varían de acuerdo al tipo de bloque que se requiera fabricar y del acabado deseado. En la siguiente figura se observa el uso que se le da a los bloques de concreto para las construcciones.

Figura 11 Terraza de vivienda

Fuente: Terra e Tuma Arquitectos Asociados.

Para la fabricación los componentes del concreto son dosificados en volumen, a excepción del cemento que es controlado por peso. Este proceso se realiza mediante sistemas automatizados que garantizan un adecuado control de las mezclas. Los procesos sistematizados permiten controlar automáticamente todo el proceso y de la misma forma se encargan de las correcciones de humedad de la mezcla; ya que este parámetro es de suma relevancia en todas las mezclas de concreto y en especial las mezclas secas.

Los bloques son moldeados por vibro-compresión en una prensa con parámetros automatizados y predefinidos de acuerdo al tipo de bloque que se requiera fabricar.

Los bloques se dejan secar durante el tiempo necesario para evitar que la máxima contracción por secado se produzca cuando el bloque ya se encuentre ensamblado en el muro.

3.4.2.1 Normas de fabricación de bloque de concreto

Actualmente existen dos normas que nos especifican los requisitos mínimos de los bloques de concreto; las Normas Técnicas Peruanas NTP y la Norma Técnica de Edificación E-070⁹ de Albañilería. Ambas especifican distintas características para los bloques de concreto y por esa razón mencionaremos a ambas.

Normas Técnicas Peruanas

Tabla 5

NTP 399.602 (2002) Bloques de Concreto para uso estructural

REQUISITO	VALOR
<i>Resistencia a la compresión</i>	7 MPa
<i>Absorción máxima</i>	12%
<i>Variación Dimensional</i>	± 3 mm
<i>Contracción lineal de secado</i>	< 0,065%

Fuente INACAL¹⁰

⁹ Norma técnica de edificación E-070

¹⁰ INACAL 2002

Tabla 6

NTP 399.600 (2002) Bloques de Concreto para uso no estructural

REQUISITO	VALOR
Resistencia a la compresión	4 MPa
Absorción máxima	12%
Variación Dimensional	± 3 mm
Contracción lineal de secado	< 0,065%

Fuente INACAL

Norma Técnica E-070 Albañilería (2006)

La Norma establece los requisitos y las exigencias mínimas para el análisis, el diseño, los materiales, la construcción, el control de calidad y la inspección de las edificaciones de albañilería estructuradas principalmente por muros confinados y por muros armados.

Para efectos del diseño estructural, las unidades de albañilería tendrán las características indicadas en la siguiente tabla.

Tabla 7

Clase de unidades de albañilería para fines estructurales

CLASE	VARIACIÓN DE LA DIMENSION (máxima en porcentaje)			ALABEO (máximo en mm)	RESISTENCIA CARACTERÍSTICA A COMPRESIÓN f'_b mínimo en MPa (kg/cm ²) sobre área bruta
	Hasta 100 mm	Hasta 150 mm	Más de 150 mm		
Ladrillo I	± 8	± 6	± 4	10	4,9 (50)
Ladrillo II	± 7	± 6	± 4	8	6,9 (70)
Ladrillo III	± 5	± 4	± 3	6	9,3 (95)
Ladrillo IV	± 4	± 3	± 2	4	12,7 (130)
Ladrillo V	± 3	± 2	± 1	2	17,6 (180)
Bloque P ⁽¹⁾	± 4	± 3	± 2	4	4,9 (50)
Bloque NP ⁽²⁾	± 7	± 6	± 4	8	2,0 (20)

(1) Bloque usado en la construcción de muros portantes

(2) Bloque usado en la construcción de muros no portantes

Fuente: RNE

- Bloque P

Resistencia a la compresión $f'_c = 4,9$ MPa (50 kg/cm²)

Bloque usado en la construcción de muros “Portantes”.

- Bloque NP

Resistencia a la compresión $f'_b = 2,0 \text{ MPa}$ (20 kg/cm²)

Bloque usado en la construcción de muros “No Portantes”.

3.4.2.2 Características de los muros con bloques de concreto

- Excelente durabilidad y bajo mantenimiento.
- Buena resistencia al fuego.
- Buen aislamiento acústico.
- Gran aislamiento térmico.
- Mínima posibilidad de eflorescencia, y si por alguna razón esta ocurriera, no causa daño a la unidad.

3.4.2.3 Agregados para bloque de concreto

En la mezcla de concreto convencional, los agregados suelen representar entre el 60 y 75% del volumen absoluto del concreto, es esa la razón de la influencia que tienen los agregados sobre la mezcla. En la siguiente tabla se menciona las características de los agregados que influyen en el concreto.

Tabla 8
Aspectos que influyen en el concreto

CARACTERISTICAS DE LOS AGREGADOS	ASPECTOS INFLUIDOS EN EL CONCRETO	
	ESTADO FRESCO	ESTADO ENDURECIDO
Granulometría	Manejabilidad	Resistencia mecánica
	Requerimiento de agua	Cambios volumétricos
Limpieza	Requerimiento de agua	Durabilidad
		Resistencia mecánica
Densidad	Peso unitario	Peso unitario
Absorción y porosidad	Perdida de revenimiento	Durabilidad
	Contracción plástica	Permeabilidad
Forma de partículas	Manejabilidad	Resistencia mecánica
	Requerimiento de agua	Cambios volumétricos
Textura superficial	Manejabilidad	Durabilidad
	Requerimiento de agua	Resistencia al desgaste

CARACTERISTICAS	ASPECTOS INFLUIDOS EN EL CONCRETO	
DE LOS AGREGADOS	ESTADO FRESCO	ESTADO ENDURECIDO
Tamaño máximo	Segregación Peso unitario Requerimiento de agua	Resistencia mecánica Cambios volumétricos Peso unitario Permeabilidad
Reactividad álcali- agregado		Durabilidad
Módulo de elasticidad		Módulo de elasticidad
Resistencia a la abrasión		Resistencia a la abrasión
Resistencia mecánica		Resistencia mecánica
Partículas friables y terrones de arcilla	Contracción plástica	Resistencia mecánica
Coefficiente de expansión térmica		Propiedades térmicas

Fuente: Comisión Federal de Electricidad¹¹

Los ensayos que se realizaron para conocer las principales características de los agregados utilizados son los siguientes:

- Análisis granulométrico: NTP 400.012
- Peso específico y absorción Agregada Fino NTP 400.022
- Peso específico y absorción Agregada Grueso NTP 400.021
- Peso unitario NTP 400 017

a. Análisis Granulométrico (NTP 400.012)

Se define como granulometría a la distribución por tamaños de las partículas del agregado. Esto se logra separando el material por procedimiento mecánico. En la práctica no existe ningún método que permita llegar a una granulometría ideal, aplicable en todos los casos a todos los agregados. Sin embargo, se han desarrollado especificaciones de granulometría las

¹¹ Comisión federal de electricidad 1998:100 - 101

cuales, en promedio permitirán obtener concretos de propiedades satisfactorias a partir de materiales disponibles en la zona.

Curva granulométrica

La curva granulométrica es una excelente ayuda para mostrar la granulometría de los agregados individuales y combinados. El ploteo logarítmico es conveniente dado que, en una serie de tamices con aberturas con una relación constante, los puntos que representan los resultados del análisis al ser unidos forman la curva granulométrica del agregado. En la siguiente tabla se muestra un modelo de un ensayo granulométrico y su gráfica.

Tabla 9
Ensayo granulométrico

TAMIS ASTM	MALLA mm	RETENIDO	PORCENTAJE DE RETENIDO	PORCENTAJE ACUMULADO	PORCENTAJE ACUMULADO QUE PASA
					100.00%
N º4	4.763	19.29	3.87%	3.87%	96.13%
Nº 8	2.381	62.34	12.50%	16.37%	83.63%
N º16	1.191	100.29	20.11%	36.49%	63.51%
Nº 30	0.595	106.85	21.43%	57.91%	42.09%
Nº 50	0.296	90.57	18.16%	76.08%	23.92%
Nº 100	0.149	54.95	11.02%	87.10%	12.90%
Nº 200	0.074	37.04	7.43%	94.53%	5.47%
FONDO		27.29	5.47%	100.00%	

Fuente: Elaboración propia

Figura 12 Curva granulométrica

Fuente: Elaboración propia

3.5 Diseño de mezclas

Existen diferentes métodos de diseño de mezcla como los analíticos experimentales, empíricos que han ido evolucionando haciendo procedimientos que se ajusten a las necesidades de cada proyecto.

“La selección de las proporciones de los materiales integrantes de la unidad cúbica de concreto, conocida usualmente como diseño de la mezcla, puede ser definida como el proceso de selección de los ingredientes más adecuados y de la combinación más conveniente y económica de los mismos, con la finalidad de obtener un producto que en el estado no endurecido tenga la trabajabilidad y consistencia adecuadas; y que endurecido cumpla con los requisitos establecidos por el diseñador e indicados en los planos y/o las especificaciones de obra.” Rivva 1992: 10

3.5.1 Tipos de diseño de mezcla¹²

A continuación se mencionan los principales métodos de diseño de concreto con las actividades principales que caracterizan cada método.

3.5.1.1 Método ACI

- Selección de la f'_{cr} a partir de la f'_c y la desviación estándar.
- Selección del tamaño máximo nominal del agregado grueso.
- Selección del volumen unitario del agua de diseño.
- Selección del contenido de aire.
- Selección de la relación agua cemento.
- Determinación del factor cemento.
- Determinación del contenido de agregado grueso.
- Determinación de volúmenes absolutos de cemento, agua de diseño, aire y agregado grueso.
- Determinación del volumen absoluto del agregado fino.
- Determinación de los valores de diseño de cemento, agua, aire y agregado grueso.
- Corrección de los valores de diseño por humedad del agregado.
- Determinación de peso de diseño y de obra.
- Determinación de pesos por tanda de una bolsa.

¹² Choquechambi y Cusitaca 2013: 8-9

3.5.1.2 Método Fuller

- Determinación de la resistencia promedio requerida.
- Selección del asentamiento.
- Determinación del contenido de agua.
- Elección del contenido de aire.
- Calculo de contenido de agua cemento $(c/w)=z$.
- Elección de contenido de agregados.
- Calculo de contenido de agregado fino.
- Calculo de contenido de agregado grueso.

3.5.1.3 Método Walker

- Selección de la resistencia promedio a partir de la resistencia a la compresión especificada y la desviación estándar de la compañía constructora.
- Selección del tamaño máximo nominal del agregado grueso.
- Selección del asentamiento.
- Selección del volumen unitario del agua de diseño.
- Selección del contenido de aire.
- Selección de la relación agua cemento por resistencia de la durabilidad.
- Determinación del factor cemento.
- Determinación de la suma de volúmenes absolutos cemento, agua y aire.
- Determinación del volumen de agregado total.
- Determinación del porcentaje de agregado fino en relación al volumen absoluto total del agregado.
- Determinación del volumen absoluto de agregado grueso.
- Determinación de los pesos secos de los agregados fino y grueso.
- Corrección de los valores de diseño por humedad de agregado.
- Determinación de la proporcionen peso de diseño y de obra.
- Determinación de pesos por una tanda de bolsa.

3.5.1.4 Método de módulo de fineza

- Determinación de la resistencia promedio.
- Selección del tamaño máximo nominal del agregado grueso.
- Selección del asentamiento.

- Volumen unitario del agua.
- Selección de contenido de aire.
- Relación agua cemento.
- Factor cemento.
- Volúmenes absolutos del cemento agua y contenido de aire.
- Volumen total de agregados.
- Proporciones relativas de agregado fino y grueso.
- Las proporciones de diseño en seco.
- Corregir proporciones en función de humedad y absorción.

Para el presente estudio se tomara como referencia el método ACI, ya que en algunos estudios similares al diseñar concretos, se utiliza más este método. Probablemente por la relación que hay en la cantidad de agua y su resistencia ultima.

3.5.2 Diseño de mezcla del ACI

Los diseños de mezclas para la elaboración del bloque de concreto se basan en los diseños de mezclas que existen actualmente todos ellos son variaciones del método del ACI (American Concrete Institute)¹³; este método exige que conozcamos las siguientes Características:

- Resistencia a la compresión (f'_c): es la resistencia a la compresión que se requiere que alcance el concreto a la edad de 28 días. La unidad de medida es “Kg/cm²”.
- Peso específico del cemento (PEc): es la relación entre la masa en el aire de un volumen de cemento y la masa de un volumen igual de agua libre de gas. La unidad de medida es “Kg/m³”.
- Peso unitario compactado del agregado grueso (PUg): es la relación que existe entre la masa de un grupo de partículas de agregado grueso, entre el volumen que ocupan todas ellas, incluyendo los espacios vacíos entre partículas. La unidad de medida es “Kg/m³”.
- Peso específico del agregado grueso (PEg): es la relación que existe entre la masa, en el aire, de un volumen de agregado grueso y la masa de un volumen igual de agua libre de gas. La unidad de medida es “Kg/m³”.

¹³ ACI: 2009

- Porcentaje de absorción del agregado grueso (ABSg): es la relación que existe entre el peso del agua que puede absorber una cantidad de agregado grueso y el peso de la misma cantidad de agregado grueso en estado seco. La unidad de medida es “%”.
- Contenido de humedad del agregado grueso (HUMg): es la relación que existe entre el peso del agua que contiene una cantidad de agregado grueso al momento de realizar el vaciado y el peso de la misma cantidad de agregado grueso en estado seco. La unidad de medida es “%”.
- Tamaño máximo nominal (TMN): está definido como el siguiente tamiz (mayor) al tamiz cuyo porcentaje retenido acumulado es 15% o más. La unidad de medida es “pulgada (”)”.
- Peso específico seco del agregado fino (PEf): es la relación que existe entre la masa, en el aire, de un volumen de agregado fino y la masa de un volumen igual de agua libre de gas. La unidad de medida es “Kg/m³”.
- Porcentaje de absorción del agregado fino (ABSf): es la relación que existe entre el peso del agua que puede absorber una cantidad de agregado fino y el peso de la misma cantidad de agregado fino en estado seco. La unidad de medida es “%”.
- Contenido de humedad del agregado fino (HUMf): es la relación que existe entre el peso del agua que contiene una cantidad de agregado fino al momento de realizar el vaciado y el peso de la misma cantidad de agregado fino en estado seco. La unidad de medida es “%”.
- Módulo de fineza del agregado fino: es un valor numérico que mide la fineza que tiene el agregado, mientras este valor sea menor, será más fino. No tiene unidad definida.
- Cantidad de datos estadísticos: es necesaria para calcular la resistencia a la compresión requerida (f'_{cr}), si se cuenta con 15 a 29 datos estadísticos, también se requiere de la cantidad de ensayos.
- Tipo de estructura (a): define el tipo de estructura que se va a fabricar para saber que asentamiento será necesario.

Los procedimientos para realizar el diseño de mezclas según el ACI se detallan a continuación:

a) Cálculo de la resistencia a la compresión requerida: tomando como base el método de diseño de mezclas del ACI, existen tres formas de calcular f'_{cr} , de acuerdo a la cantidad de datos estadísticos¹⁴ con que se cuenta de anteriores resultados:

- Se cuenta con suficientes datos estadísticos que sean mayores a 30: la resistencia a la compresión requerida (f'_{cr}), es el mayor valor resultante de las siguientes formulas:

Se escoge el mayor de las dos fórmulas

$$f'_{cr} = f'_c + 1.34 * S$$

$$f'_{cr} = f'_c + 2.33 * S - 35$$

Fórmula 1 Resistencia a la compresión requerida

ACI

$$S = \sqrt{\frac{\sum (xi - x)^2}{n - 1}}$$

Fórmula 2 Desviación estandar para datos mayores a 30

ACI

Dónde:

- ✓ f'_{cr} : resistencia a la compresión requerida en Kg/cm².
- ✓ S: desviación estándar en Kg/cm².
- ✓ xi: resistencia de un espécimen en Kg/cm².
- ✓ x: resistencia promedio de “n” especímenes.
- ✓ n: número de especímenes ensayados.

- Se cuenta con pocos datos estadísticos entre 15 y 29: cuando se cuentan con pocos datos estadísticos, se procede de igual forma que en el caso anterior, con la diferencia que se aplica la siguiente fórmula para la desviación estándar:

¹⁴ Se toman como datos los resultados de ensayos que cumpla con lo siguiente:
Tener materiales similares
Tener una f'_c dentro del rango ± 70 kg/cm².

$$S = \left(\sqrt{\frac{\sum (xi - x)^2}{n - 1}} \right) * f$$

Fórmula 3 Desviación estandar para datos entre 15 y 29

ACI

En la siguiente tabla se considera el factor de corrección para el número de ensayos obtenidos.

Dónde:

- f: factor de corrección

Tabla 10

Factor de corrección

# de ensayos	Factor de corrección (f)
15	1.16
20	1.08
25	1.03
30	1.00

Fuente: ACI

- Si no existiera historia de ensayos de resultados que es lo más común en la mayoría de inicio de obras nuevas entonces se considera la siguiente tabla:

Tabla 11

Resistencia a la compresión requerida

Resistencia a la compresión especificada $f'c$	Resistencia promedio requerida $f''cr$
$f'c < 210 \text{ kg/cm}^2$	$f''cr = f'c + 70 \text{ kg/cm}^2$
$210 \text{ kg/cm}^2 < f'c < 350 \text{ kg/cm}^2$	$f''cr = f'c + 84 \text{ kg/cm}^2$
$f'c > 350 \text{ kg/cm}^2$	$f''cr = f'c + 98 \text{ kg/cm}^2$

Fuente: ACI

b) Contenido de agua: según la ACI, la cantidad de agua que debe usarse, depende del TMN del agregado grueso, el asentamiento que se desea lograr y de las condiciones donde se

fabrica la mezcla. El volúmen de agua por m³. Agua litros/m³ para TNM de agregados y consistencia indicada se encuentra en la siguiente tabla.

Tabla 12
Volúmen unitario de agua

Asentamiento	Agua en 1/m ³ para los tamaños Max. Nominales de agregado grueso y consistencia indicados						
	3/8"	1/2"	3/4"	1"	1 1/2"	2"	3"
Concreto sin aire incorporado							
1 a 2"	207	199	190	179	166	154	130
3 a 4"	228	216	205	193	181	169	145
6 a 7"	243	228	216	202	190	178	160
Concreto con aire incorporado							
1 a 2"	181	175	168	160	150	142	122
3 a 4"	202	193	184	175	165	157	133
6 a 7"	216	205	197	184	174	166	154

Fuente: ACI

c) Relación Agua Cemento a/c: Existen dos criterios por resistencia y por durabilidad para la relación a/c, de los cuales se elige el de menor valor, para garantizar el cumplimiento de las especificaciones.

- Por su resistencia a compresión

Tabla 13
Relación agua cemento por compresión

f'cr (28 días) kg/cm ²	Relación agua cemento de diseño por peso	
	Concreto sin aire incorporado	Concreto con aire incorporado
150	0.80	0.71
200	0.70	0.61
210	0.68	0.59
250	0.62	0.53

280	0.57	0.48
300	0.55	0.46
350	0.48	0.40
400	0.43	---
420	0.41	
450	0.38	

Fuente: ACI

- Por durabilidad

Tabla 14

Relación agua cemento por durabilidad

CONDICIONES DE EXPOSICIÓN	Relación máxima agua - material cementante (en peso) para concretos de peso normal *	f'_c mínimo (MPa) para concretos de peso normal o con agregados ligeros*
Concreto que se pretende tenga baja permeabilidad en exposición al agua.	0.50	28
Concreto expuesto a ciclos de congelamiento y deshielo en condición húmeda o a productos químicos descongelantes.	0.45	31
Para proteger de la corrosión el refuerzo de acero cuando el concreto está expuesto a cloruros provenientes de productos descongelantes, sal, agua salobre, agua de mar o a salpicaduras del mismo origen.	0.40	35

Fuente: ACI

d) Contenido de aire: También depende del TMN y se refiere a la cantidad aproximada de aire atrapado en un concreto sin aire incorporado y el promedio recomendado del contenido total de aire para concretos en los cuales el aire es incorporado intencionalmente por razones de durabilidad.

Tabla 15
Contenido de aire atrapado

Tamaño máximo nominal del agregado (pulg)	Tamaño máximo nominal del agregado (mm)	Aire atrapado
3/8"	9.5	3.00%
1/2"	12.5	2.50%
3/4"	19	2.00%
1"	25	1.50%
1 1/2"	37.5	1.00%
2"	50	0.50%
3"	75	0.30%
6"	150	0.20%

Fuente: ACI

e) Contenido de cemento: Es la cantidad de cemento por unidad de volumen de concreto. Se obtiene de dividir la cantidad de agua con la relación a/c.

$$C = \frac{A}{a/c}$$

Fórmula 4 Cálculo contenido de cemento

ACI

Donde:

A = cantidad de agua

a/c = relación agua cemento

f) Contenido del agregado grueso: Se refiere a los agregados del mismo TMN y buena gradación producirán un concreto de satisfactoria trabajabilidad. Los valores apropiados se dan en la siguiente tabla, donde se observa que el volumen de agregado grueso depende del TMN y el módulo de fineza del agregado fino. La siguiente formula es para el cálculo del agregado grueso.

$$\text{Cantidad de A. Grueso (kg)} = \left[\text{Volumen de agregado grueso de la tabla} \right] * \left[\frac{\text{Peso unitario seco y compactado del agregado grueso en kg/m}^3}{1} \right]$$

Fórmula 5 Cálculo de agregado grueso

En la siguiente tabla se menciona el peso del agregado grueso por unidad de volumen del concreto.

Tabla 16

Peso del agregado grueso por unidad de volumen del concreto

Tamaño máximo nominal del Agregado grueso (pulg)	Tamaño máximo nominal del Agregado grueso (mm)	Volumen de agregado grueso, seco y compactado, por unidad de volumen del concreto, para diversos módulos de finza del fino			
		2.40	2.60	2.80	3.00
3/8"	9.5	0.5	0.48	0.46	0.44
1/2"	12.5	0.59	0.57	0.55	0.53
3/4"	19	0.66	0.64	0.62	0.6
1"	25	0.71	0.69	0.67	0.65
1 1/2"	37.5	0.76	0.74	0.72	0.7
2"	50	0.78	0.76	0.74	0.72
3"	75	0.81	0.79	0.77	0.75
6"	150	0.87	0.85	0.83	0.81

Fuente: ACI

g) Cálculo de volumen absoluto: Se hace un recuento de los materiales y sus pesos¹⁵ ya calculados, como sigue:

- ✓ Volumen de Cemento = Peso del cemento / peso específico del cemento
- ✓ Volumen de agua = Peso del agua / peso específico del agua
- ✓ Volumen de Aire = el porcentaje de aire /100
- ✓ Volumen de piedra = Agregado grueso/peso específico de la piedra
- ✓ Σ (Vol. Cemento + agua + aire + piedra)

h) Calculo del agregado fino:

$$1\text{m}^3 - \Sigma \text{Vol. cemento} + \text{vol. agua} + \text{vol. aire} + \text{vol. piedra} = \text{vol. Arena}$$

$$\text{Vol. Arena} * \text{Peso específico de la arena} = \text{Peso de la arena}$$

¹⁵ En los agregados se está considerando la humedad

4 FABRICACIÓN DE LA UNIDAD DE ALBAÑILERÍA

Para la fabricación de unidades de albañilería como bloques de concreto usando relaves constara de las siguientes etapas:

- Ensayos preliminares de los agregados
- Ensayos al relave
- Elaboración del diseño de mezcla utilizando relaves
- Finalmente se fabricará el bloque de concreto

4.1 Requisitos técnicos y diseño de mezcla

4.1.1 Requisitos técnicos

El agregado del concreto contiene aproximadamente 70% del volumen de la mezcla, por lo que influyen en las características del concreto en sus dos estados fresco y endurecido.

a. Estado fresco

- ✓ El asentamiento debe ser bajo aproximadamente 1"
- ✓ La mezcla debe evitar la segregación durante su colocación dentro del molde
- ✓ Debe tener buena trabajabilidad para que sea fácilmente desmoldable

El relave es un elemento que tiene forma más parecida a la arena fina, por esta razón es importante la cantidad de agua a utilizar en las pruebas ya que va a tender absorber con facilidad.

El cemento a utilizar será el cemento andino tipo I.

b. Estado endurecido

- ✓ Se va a mantener el peso unitario al del concreto convencional
- ✓ La resistencia a la compresión debe ser de 7 Mpa para utilizar con fines estructurales
- ✓ Debe haber pasado los ensayos ambientales

Es normal que el relave tenga una densidad superior al de la arena común sin embargo eso no influirá en la resistencia a la compresión que se busque.

4.1.2 Diseño de mezcla del concreto

4.1.2.1 Caracterización de los agregados

Como se mencionó se inicia con la caracterización física del relave y los agregados convencionales.

Foto 5 Relavera PAM 13319

Fuente: Elaboración propia

Foto 6 Material de relave PAM 13319

Fuente: Elaboración propia

Se obtuvieron los siguientes resultados:

Relave

✓ Peso unitario suelto	1.773gr/cc
✓ Peso unitario compactado	2.530gr/cc
✓ Peso específico	3.1
✓ Absorción	13.00%
✓ Contenido de humedad	11.54%
✓ Módulo de fineza	2.5

Arena gruesa

✓ Peso unitario suelto	2.192gr/cc
✓ Peso unitario compactado	2.791gr/cc
✓ Peso específico	2.65
✓ Absorción	3.93%
✓ Contenido de humedad	3.04%

Confitillo

✓ Peso unitario suelto	1.982gr/cc
✓ Peso unitario compactado	2.250gr/cc
✓ Absorción	2.74%
✓ Contenido de humedad	0.3%

(Ver anexo 1. Caracterización de agregados).

El relave por ser un material ajeno al convencional se le hicieron las pruebas de toxicidad y se procedió hacer pruebas ABA y contenido metálico. Los resultados fueron comparados con el estándar de calidad ambiental de la EPA. (Ver anexo 2. Ensayo químico mineralógico al relave).

La evaluación del contenido de azufre como sulfuro y el ensayo ABA permite determinar el potencial de neutralización (PNN) como se indica en la siguiente tabla.

Tabla 17

Ensayo de ABA de la muestra de relave

Muestra	pH en pasta	%S	PN	PA	PNN	PN/PA
Relave 13319	4,61	0,98	-3	27,8	-34.5	-0.11

Fuente: Informe de ensayo laboratorio ALS.

Donde:

PN = Potencial de neutralización

%S = Porcentaje de azufre como sulfuro

PA = Potencial de acidez

PNN = Potencial neto de neutralización

Como $PNN = PN - PA$, considerando que:

Si $PNN > +20$, la muestra NO GENERA DRENAJE ACIDO

Si $PNN < -20$, la muestra SI GENERA DRENAJE ÁCIDO

Si $-20 < PNN < +20$, la muestra es de comportamiento INCIERTO

De acuerdo a estas consideraciones se puede decir que el relave SI genera acidez.

El contenido metálico del relave fue obtenido por pruebas de barrido ICP de metales, donde se obtuvieron en proporción la cantidad de metales según el peso del material.

Tabla 18

Contenido metálico comparados con el límite EPA

Metales	13319 A Mer-2-51 Resultado (mg/L)	13319 B Mer-4-51 Resultado (mg/L)	Limite EPA (mg/L)
Cobre (Cu)	2	3	5
Plomo (Pb)	2.210	2.963	5
Arsénico (As)	8,1	7,6	5
Bario	20	60	100
Cadmio (Cd)	0,47	8,71	1
Mercurio (Hg)	1,15	0,82	0.2
Plata (Ag)	3,76	3,54	5
Selenio	1,4	0,4	25
Cromo (Cr)	3	2	5

Fuente: Informe de ensayo laboratorio ALS.

Tabla 19

Resultados comparados con los estandares de calidad para suelo

Parámetros	CA-1	Suelo Comercial Industrial Extractivos
		ECA de Suelos
		(mg/kg)
Arsénico total	297	140
Bario total	60	2000
Cadmio total	2.22	22

Parámetros	CA-1	Suelo Comercial Industrial Extractivos
		ECA de Suelos
		(mg/kg)
Cromo VI	9	1.4
Mercurio total	0.82	24
Plomo total	583	1200

Fuente: Informe de ensayo laboratorio ALS

Tabla 20

Resultados comparados con los Estándares de Calidad para Agua

Parámetros	CA-1	Aguas que pueden ser destinadas a la producción de agua potable	Aguas para riego de vegetales	Limite Estándar
		ECA de Agua A1	ECA de Agua 3 D1	EPA
		(mg/l)	(mg/l)	(mg/l)
Potencia de hidrogeno pH	6.9-7.9	6.5 – 8.5	6.5 – 8.5	6.5 – 8.5
Arsénico	0.0012	0.01	0.1	0.01
Cadmio	0.0006	0.003	0.01	0.005
Cobre	0.003	2	0.2	1.3
Hierro	0.0021	0.3	5	
Manganeso	0.057	0.4	0.2	
Mercurio	0.0004	0.001	0.001	0.002
Plomo	0.015	0.01	0.05	0.05
Zinc	0.027	3	2	

Fuente: Informe de ensayo laboratorio ALS

4.1.2.2 Dosificación de concreto con agregado de relave

En esta etapa de la presente investigación se decidió hacer tres tipos de dosificaciones para comprobar las diferencias entre cada una y obtener el diseño de mezclas especialmente diseñado para fabricar concreto con relave. Ver anexo 3. Cálculos de mezcla y anexo 5. Panel fotográfico.

Se propusieron y ensayaron las siguientes dosificaciones:

- Dosificación 1: Concreto con relave (10% de arena gruesa), arena gruesa y confitillo.
- Dosificación 2: Concreto con relave (25% de arena gruesa), arena gruesa y confitillo.
- Dosificación 3: Concreto con relave (50% de arena gruesa), arena gruesa y confitillo.

En las 3 dosificaciones, se hicieron también relaciones entre el agregado grueso y el agregado fino (AG/AF) en volumen, de la siguiente forma.

- Relación 1: $AG/AF = 4/3 = 1.333$
- Relación 2: $AG/AF = 4/4 = 1.000$
- Relación 3: $AG/AF = 4/5 = 0.800$

El agregado grueso está conformado por el confitillo y el agregado fino (AF) está conformado por la arena gruesa y el relave.

$$AF = AF1 + AF2$$

Dónde:

AF1 = Arena gruesa

AF2= Relave

Así mismo en las 3 dosificaciones, se hicieron también relaciones entre el agregado grueso y el cemento (AG/C) en volumen, de la siguiente forma.

- $AG/C = 4.00$
- $AG/C = 6.00$
- $AG/C = 8.00$

Teniendo en cuenta estas dosificaciones y relaciones, se ensayaron nueve especímenes para cada dosificación, en la que cada diseño de espécimen, fueron ensayados a los 7 días, 14 días

y 28 días de edad. En las siguientes tablas se observa las dosificaciones y las relaciones propuestas.

Tabla 21

Dosificación 1 en volumen: Concreto con relave (10% de arena gruesa), arena gruesa y confitillo

Código	Cemento	AG	AF	AF1	AF2
D1-1	1.00	4.00	3.00	2.70	0.30
D1-2	1.00	4.00	4.00	3.60	0.40
D1-3	1.00	4.00	5.00	4.50	0.50
D1-4	1.00	6.00	4.50	4.05	0.45
D1-5	1.00	6.00	6.00	5.40	0.60
D1-6	1.00	6.00	7.50	6.75	0.75
D1-7	1.00	8.00	6.00	5.40	0.60
D1-8	1.00	8.00	8.00	7.20	0.80
D1-9	1.00	8.00	10.00	9.00	1.00

Fuente: Elaboración propia

Tabla 22

Dosificación 2 en volumen: Concreto con relave (25% de arena gruesa), arena gruesa y confitillo

Código	Cemento	AG	AF	AF1	AF2
D2-1	1.00	4.00	3.00	2.25	0.75
D2-2	1.00	4.00	4.00	3.00	1.00
D2-3	1.00	4.00	5.00	3.75	1.25
D2-4	1.00	6.00	4.50	3.38	1.13
D2-5	1.00	6.00	6.00	4.50	1.50
D2-6	1.00	6.00	7.50	5.63	1.88
D2-7	1.00	8.00	6.00	4.50	1.50

Código	Cemento	AG	AF	AF1	AF2
D2-8	1.00	8.00	8.00	6.00	2.00
D2-9	1.00	8.00	10.00	7.50	2.50

Fuente: Elaboración propia

Tabla 23

Dosificación 3 en volumen: Concreto con relave (50% de arena gruesa), arena gruesa y confitillo

Código	Cemento	AG	AF	AF1	AF2
D3-1	1.00	4.00	3.00	1.50	1.50
D3-2	1.00	4.00	4.00	2.00	2.00
D3-3	1.00	4.00	5.00	2.50	2.50
D3-4	1.00	6.00	4.50	2.25	2.25
D3-5	1.00	6.00	6.00	3.00	3.00
D3-6	1.00	6.00	7.50	3.75	3.75
D3-7	1.00	8.00	6.00	3.00	3.00
D3-8	1.00	8.00	8.00	4.00	4.00
D3-9	1.00	8.00	10.00	5.00	5.00

Fuente: Elaboración propia

Por tratarse de bloques de concreto se buscó que la cantidad de agua genere un asentamiento de 1 pulgada en la mezcla.

Para realizar los vaciados se usaron los pesos de los materiales, de modo a que se llegue a un peso aproximado de cada material para generar 3 especímenes por diseño de mezcla (código de diseño).

En las siguientes tablas se muestran los diseños de mezcla de las 3 dosificaciones en peso¹⁶ en gramos.

¹⁶ Se tomó como peso unitario del cemento 1500 Kg/m³

Tabla 24

Dosificación 1 en gramos: Concreto con relave (10% de arena gruesa), arena gruesa y confitillo

Código	Cemento	AG	AF1	AF2
D1-1	1375	5200	4355	439
D1-2	1222	4622	5162	520
D1-3	1100	4160	5807	585
D1-4	957	5426	4545	458
D1-5	846	4800	5361	540
D1-6	759	4303	6007	605
D1-7	733	5547	4646	468
D1-8	647	4894	5466	550
D1-9	579	4379	6113	616

Fuente: Elaboración propia

Tabla 25

Dosificación 2 en gramos: Concreto con relave (25% de arena gruesa), arena gruesa y confitillo

Código	Cemento	AG	AF1	AF2
D2-1	1375	5200	3630	1097
D2-2	1222	4622	4302	1300
D2-3	1100	4160	4839	1462
D2-4	957	5426	3787	1144
D2-5	846	4800	4467	1350
D2-6	759	4303	5006	1512
D2-7	733	5547	3871	1170

Código	Cemento	AG	AF1	AF2
D2-8	647	4894	4555	1376
D2-9	579	4379	5094	1539

Fuente: Elaboración propia

Tabla 26

Dosificación 3 en gramos: Concreto con relave (50% de arena gruesa), arena gruesa y confitillo

Código	Cemento	AG	AF1	AF2
D3-1	1375	5200	2420	2193
D3-2	1222	4622	2868	2599
D3-3	1100	4160	3226	2924
D3-4	957	5426	2525	2288
D3-5	846	4800	2978	2699
D3-6	759	4303	3337	3025
D3-7	733	5547	2581	2339
D3-8	647	4894	3036	2752
D3-9	579	4379	3396	3078

Fuente: Elaboración propia

4.1.2.3 Resultados de densidad

La densidad de los especímenes se hizo dividiendo el peso entre el volumen de agua que se eleva o desplaza al ser sumergido dentro de un recipiente de agua. Se realizaron los ensayos de densidad a los 7, 14 y 28 días para analizar la densidad en el tiempo.

En las siguientes tablas se observa la variación de las densidades para las 3 dosificaciones.

Tabla 27

Densidades de la dosificación 1: Concreto con relave (10% de arena gruesa), arena gruesa y confitillo.

Código	DENSIDAD		
	7 días	14 días	28 días
D1-1	1814.95	1953.46	2032.40
D1-2	2290.21	2292.14	2322.69
D1-3	2199.97	2242.14	2282.14
D1-4	2312.14	2329.22	2343.87
D1-5	2277.85	2278.78	2279.53
D1-6	2264.06	2265.12	2264.93
D1-7	2152.08	2168.85	2186.24
D1-8	2158.35	2180.15	2226.05
D1-9	2156.68	2159.66	2224.13

Fuente: Elaboración propia

Tabla 28

Densidades de la dosificación 2: Concreto con relave (25% de arena gruesa), arena gruesa y confitillo.

Código	DENSIDAD		
	7 días	14 días	28 días
D2-1	2372.94	2392.57	2405.17
D2-2	2372.88	2323.07	2278.35
D2-3	2400.95	2363.56	2356.54
D2-4	2291.33	2249.16	2227.48
D2-5	2193.94	2217.42	2261.39

Código	DENSIDAD		
	7 días	14 días	28 días
D2-6	2176.30	2199.28	2229.28
D2-7	2147.11	2171.96	2179.22
D2-8	2155.31	2162.20	2176.30
D2-9	2176.92	2192.45	2208.79

Fuente: Elaboración propia

Tabla 29

Densidades de la dosificación 3: Concreto con relave (50% de arena gruesa), arena gruesa y confitillo.

Código	DENSIDAD		
	7 días	14 días	28 días
D3-1	2226.55	2384.37	2374.99
D3-2	2333.25	2367.91	2207.17
D3-3	2283.57	2225.49	2179.91
D3-4	2267.23	2200.71	2203.51
D3-5	2391.45	2191.58	2280.46
D3-6	2308.41	2313.75	2279.71
D3-7	2227.29	2234.13	2220.59
D3-8	2282.76	2287.17	2282.39
D3-9	2241.14	2279.71	2273.69

Fuente: Elaboración propia

4.1.2.4 Cálculo de la relación agua cemento (a/c)

La relación agua/cemento es uno de los parámetros más importantes en el diseño del concreto, esta relación define la resistencia mecánica que alcanzara el concreto, por lo que se procedió a calcularla, teniendo en cuenta la humedad y absorción del agregado que se usó en cada caso, usando la siguiente formula:

$$a/c = \frac{agua + ag * (hum_g - abs_g) + af1 * (hum_{f1} - abs_{f1}) + af2 * (hum_{f2} - abs_{f2})}{c}$$

Fórmula 6 Cálculo de relación agua - cemento

Donde:

a/c : Relación agua cemento

Agua : Peso del agua usada

ag : Peso del agregado grueso

humg : Porcentaje de humedad del agregado grueso

absg : Porcentaje de absorción del agregado grueso

af1 : Peso de la arena gruesa

humf1 : Porcentaje de humedad de la arena gruesa

absf1 : Porcentaje de absorción de la arena gruesa

af2 : Peso del relave

humf2 : Porcentaje de humedad del relave

absf2 : Porcentaje de absorción del relave

c : Peso del cemento usado

Tabla 30

Relación agua cemento de la dosificación 1

Código	Agregado Grueso		AF1		AF2		A/C
	Absorción	Humedad	Absorción	Humedad	Absorción	Humedad	
D1-1	2.74%	0.00%	3.93%	3.04%	13.00%	11.54%	0.55
D1-2	2.74%	0.00%	3.93%	3.04%	13.00%	11.54%	0.63
D1-3	2.74%	0.00%	3.93%	3.04%	13.00%	11.54%	0.71
D1-4	2.74%	0.00%	3.93%	3.04%	13.00%	11.54%	0.79
D1-5	2.74%	0.00%	3.93%	3.04%	13.00%	11.54%	0.90
D1-6	2.74%	0.00%	3.93%	3.04%	13.00%	11.54%	1.01
D1-7	2.74%	0.00%	3.93%	3.04%	13.00%	11.54%	1.02
D1-8	2.74%	0.00%	3.93%	3.04%	13.00%	11.54%	1.17
D1-9	2.74%	0.00%	3.93%	3.04%	13.00%	11.54%	1.32

Fuente: Elaboración propia

Tabla 31

Relación agua cemento de la dosificación 2

Código	Agregado Grueso		AF1		AF2		A/C
	Absorción	Humedad	Absorción	Humedad	Absorción	Humedad	
D2-1	2.74%	0.00%	3.93%	3.04%	13.00%	11.54%	0.55
D2-2	2.74%	0.00%	3.93%	3.04%	13.00%	11.54%	0.63
D2-3	2.74%	0.00%	3.93%	3.04%	13.00%	11.54%	0.70
D2-4	2.74%	0.00%	3.93%	3.04%	13.00%	11.54%	0.79
D2-5	2.74%	0.00%	3.93%	3.04%	13.00%	11.54%	0.90
D2-6	2.74%	0.00%	3.93%	3.04%	13.00%	11.54%	1.01

Código	Agregado Grueso		AF1		AF2		A/C
	Absorción	Humedad	Absorción	Humedad	Absorción	Humedad	
D2-7	2.74%	0.00%	3.93%	3.04%	13.00%	11.54%	1.02
D2-8	2.74%	0.00%	3.93%	3.04%	13.00%	11.54%	1.17
D2-9	2.74%	0.00%	3.93%	3.04%	13.00%	11.54%	1.32

Fuente: Elaboración propia

Tabla 32

Relación agua cemento de la dosificación 3

Código	Agregado Grueso		AF1		AF2		A/C
	Absorción	Humedad	Absorción	Humedad	Absorción	Humedad	
D3-1	2.74%	0.00%	3.93%	3.04%	13.00%	11.54%	0.55
D3-2	2.74%	0.00%	3.93%	3.04%	13.00%	11.54%	0.62
D3-3	2.74%	0.00%	3.93%	3.04%	13.00%	11.54%	0.70
D3-4	2.74%	0.00%	3.93%	3.04%	13.00%	11.54%	0.78
D3-5	2.74%	0.00%	3.93%	3.04%	13.00%	11.54%	0.89
D3-6	2.74%	0.00%	3.93%	3.04%	13.00%	11.54%	1.00
D3-7	2.74%	0.00%	3.93%	3.04%	13.00%	11.54%	1.01
D3-8	2.74%	0.00%	3.93%	3.04%	13.00%	11.54%	1.16
D3-9	2.74%	0.00%	3.93%	3.04%	13.00%	11.54%	1.30

Fuente: Elaboración propia

4.1.2.5 Resultados de resistencia a compresión de especímenes

Se realizaron ensayos de compresión a todos los diseños propuestos. En las siguientes tablas se muestran los resultados realizadas a los 7, 14 y 28 días.

Tabla 33

Resistencia a la compresión de la dosificación 1

Código	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN Kg/cm ²		
	7 días	14 días	28 días
D1-1	187.5	217.2	230.5
D1-2	102.5	105.1	120.5
D1-3	125.30	131.20	139.04
D1-4	140.50	158.40	116.16
D1-5	84.60	96.50	101.2
D1-6	39.50	55.70	79.2
D1-7	38.50	46.50	50.1
D1-8	33.60	45.20	54.01
D1-9	26.50	35.40	45.20

Fuente: Elaboración propia

Tabla 34

Resistencia a la compresión de la dosificación 2

Código	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN Kg/cm ²		
	7 días	14 días	28 días
D2-1	168.60	189.50	215.10
D2-2	92.90	85.50	76.30
D2-3	134.70	135.50	139.5
D2-4	54.20	59.40	62.70
D2-5	55.20	59.20	61.70
D2-6	41.50	43.10	44.20

Código	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN Kg/cm ²		
	7 días	14 días	28 días
D2-7	26.70	32.40	39.20
D2-8	25.50	28.70	32.50
D2-9	23.80	25.70	30.20

Fuente: Elaboración propia

Tabla 35

Resistencia a la compresión de la dosificación 3

Código	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN Kg/cm ²		
	7 días	14 días	28 días
D3-1	131.48	163.00	197.30
D3-2	74.80	85.70	97.80
D3-3	80.20	69.30	73.40
D3-4	80.85	70.60	86.10
D3-5	66.44	42.30	68.40
D3-6	45.32	45.70	56.00
D3-7	40.60	42.30	45.50
D3-8	23.80	28.70	30.80
D3-9	18.15	19.10	20.90

Fuente: Elaboración propia

4.1.2.6 Resistencia en el tiempo

Como referencia se tomó la resistencia a la compresión del día 28 como el 100% y se calculó la resistencia a la compresión en los demás especímenes. En las siguientes tablas se muestra el porcentaje de compresión con respecto al día 28.

Tabla 36

Evolución de la resistencia de la dosificación 1

Código	Evolución de resistencia		
	7 días	14 días	28 días
D1-1	82.47%	90.13%	100.00%
D1-2	64.11%	72.73%	100.00%
D1-3	90.12%	94.36%	100.00%
D1-4	120.95%	136.36%	100.00%
D1-5	83.60%	95.36%	100.00%
D1-6	49.87%	70.33%	100.00%
D1-7	76.85%	92.81%	100.00%
D1-8	62.21%	83.69%	100.00%
D1-9	58.63%	78.32%	100.00%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 37

Evolución de la resistencia de la dosificación 2

Código	Evolución de resistencia		
	7 días	14 días	28 días
D2-1	78.38%	88.10%	100.00%
D2-2	121.76%	112.06%	100.00%
D2-3	116.02%	116.71%	100.00%
D2-4	86.44%	94.74%	100.00%
D2-5	89.47%	95.95%	100.00%
D2-6	93.89%	97.51%	100.00%

Código	Evolución de resistencia		
	7 días	14 días	28 días
D2-7	68.11%	82.65%	100.00%
D2-8	78.46%	88.31%	100.00%
D2-9	78.81%	85.10%	100.00%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 38

Evolución de la resistencia de la dosificación 3

Código	Evolución de resistencia		
	7 días	14 días	28 días
D3-1	66.64%	82.62%	100.00%
D3-2	76.48%	87.63%	100.00%
D3-3	109.26%	94.41%	100.00%
D3-4	93.90%	82.00%	100.00%
D3-5	97.13%	61.84%	100.00%
D3-6	80.93%	81.61%	100.00%
D3-7	89.23%	92.97%	100.00%
D3-8	77.27%	93.18%	100.00%
D3-9	86.84%	91.39%	100.00%

Fuente: Elaboración propia

De los datos obtenidos se descartaron la dosificación D1-4, D2-2, D2-3 y la D3-3 por considerarse datos erróneos.

4.1.2.7 Cálculo de f'_c , de acuerdo a la relación a/c

A continuación se va a calcular la relación que existe entre la resistencia a la compresión (f'_c) y la relación agua/cemento (a/c), que se ha realizado en los diseños realizados. De acuerdo al ACI, se sabe que la relación entre f'_c decrece logarítmicamente a medida que aumenta la relación a/c, como se muestra en la siguiente figura:

Figura 13 Relación entre el factor de compresión y a/c

Fuente: Elaboración propia

Así mismo se graficó la relación entre las tres dosificaciones, tomando en cuenta la resistencia a los 28 días.

Figura 14 Relación f'_c y a/c de la dosificación 1: Concreto con relave (10% de arena gruesa), arena gruesa y confitillo.

Fuente: Elaboración propia

Figura 15 Relación $f'c$ y a/c de la dosificación 2: Concreto con relave (25% de arena gruesa), arena gruesa y confitillo.

Fuente: Elaboración propia

Figura 16 Relación $f'c$ y a/c de la dosificación 3: Concreto con relave (50% de arena gruesa), arena gruesa y confitillo.

Fuente: Elaboración propia

4.1.2.8 Relación AG/AF optimo

Como se mencionó, se plantearon tres relaciones de Agregado grueso sobre Agregado fino (AG/AF), como son las siguientes:

- Relación 1: $AG/AF = 4/3 = 1.333$
- Relación 2: $AG/AF = 4/4 = 1.000$
- Relación 3: $AG/AF = 4/5 = 0.800$

El objetivo de proponer estas relaciones es encontrar cual sería la óptima para el diseño de mezclas, para esto se calculó una función que defina la relación entre la $f'c$ y la relación a/c.

Figura 17 Dosificación 1: Concreto con relave (10% de arena gruesa), arena gruesa y confitillo-R1.

Fuente: Elaboración propia

Figura 18 Dosificación 1: Concreto con relave (10% de arena gruesa), arena gruesa y confitillo-R2.

Fuente: Elaboración propia

Figura 19 Dosificación 1: Concreto con relave (10% de arena gruesa), arena gruesa y confitillo-R3.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 39

Comparación cada relación de la dosificación 1.

a/c	Relación 1	Relación 2	Relación 3
0.5	184.34	282.84	71.67
0.6	167.37	224.81	65.21
0.7	153.02	175.75	59.76
0.8	140.59	133.24	55.03
0.9	129.63	95.75	50.86
1	119.82	62.22	47.13
1.1	110.95	31.88	43.76
1.2	102.85	4.18	40.68
1.3	95.40	0.00	37.84
1.4	88.50	0.00	35.22

Fuente: Elaboración propia

Se puede observar que la relación 2 dio mejores resultados en compresión

Figura 20 Dosificación 2: Concreto con relave (25% de arena gruesa), arena gruesa y confitillo-R1

Fuente: Elaboración propia

Figura 21 Dosificación 2: Concreto con relave (25% de arena gruesa), arena gruesa y confitillo-R2

Fuente: Elaboración propia

Figura 22 Dosificación 2: Concreto con relave (25% de arena gruesa), arena gruesa y confitillo-R3

Fuente: Elaboración propia

Tabla 40

Comparación cada relación de la dosificación 2.

a/c	Relación 1	Relación 2	Relación 3
0.5	195.23	89.21	49.79
0.6	145.55	77.96	45.38
0.7	103.54	68.45	41.65
0.8	67.16	60.21	38.42
0.9	35.06	52.94	35.57
1	6.35	46.44	33.02
1.1	0.00	40.56	30.71
1.2	0.00	35.19	28.61
1.3	0.00	30.25	26.67
1.4	0.00	25.68	24.88

Fuente: Elaboración propia

Se puede observar que la relación 1 dio mejores resultados en compresión

Figura 23 Dosificación 3: Concreto con relave (50% de arena gruesa), arena gruesa y confitillo-R1.

Fuente: Elaboración propia

Figura 24 Dosificación 3: Concreto con relave (50% de arena gruesa), arena gruesa y confitillo-R2.

Fuente: Elaboración propia

Figura 25 Dosificación 3: Concreto con relave (50% de arena gruesa), arena gruesa y confitillo-R3.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 41

Comparación cada relación de la dosificación 3.

a/c	Relación 1	Relación 2	Relación 3
0.5	189.80	132.05	106.88
0.6	119.97	109.81	90.06
0.7	60.93	91.00	75.84
0.8	9.78	74.71	63.53
0.9	0.00	60.34	52.66
1	0.00	47.49	42.94
1.1	0.00	35.86	34.15
1.2	0.00	25.25	26.13
1.3	0.00	15.48	18.74
1.4	0.00	6.44	11.91

Fuente: Elaboración propia

4.1.2.9 Diseño de mezclas con ACI

En esta etapa se fabricara el bloque de concreto con relave para ello se requieren de los siguientes datos:

- Resistencia a la compresión (f'_c): es la resistencia a la compresión que se requiere que alcance el concreto a la edad de 28 días. La unidad de medida es “Kg/cm²”.
- Peso específico del cemento (PE_c): es la relación entre la masa en el aire de un volumen de cemento y la masa de un volumen igual de agua libre de gas. La unidad de medida es “Kg/m³”.
- Dosificación: es el tipo de dosificación que se usara en el concreto, establecida en el apartado 3.1.2.2 (dosificación 1, dosificación 2 o dosificación 3).
- Relación AG/AF: es el resultado de la división entre el volumen de agregado grueso y agregado fino que se usara en la mezcla, ver el apartado 4.1.2.8.

- **Peso unitario del agregado grueso (PUg):** es la relación que existe entre la masa de un grupo de partículas de agregado grueso, entre el volumen que ocupan todas ellas, incluyendo los espacios vacíos entre partículas. La unidad de medida es “Kg/m³”.
- **Peso específico seco del agregado grueso (PEg):** es la relación que existe entre la masa, en el aire, de un volumen de agregado grueso y la masa de un volumen igual de agua libre de gas. La unidad de medida es “Kg/m³”.
- **Porcentaje de absorción del agregado grueso (ABSg):** es la relación que existe entre el peso del agua que puede absorber una cantidad de agregado grueso y el peso de la misma cantidad de agregado grueso en estado seco. La unidad de medida es “%”.
- **Contenido de humedad del agregado grueso (HUMg):** es la relación que existe entre el peso del agua que contiene una cantidad de agregado grueso al momento de realizar el vaciado y el peso de la misma cantidad de agregado grueso en estado seco. La unidad de medida es “%”.
- **Tamaño máximo nominal (TMN):** está definido como el siguiente tamiz (mayor) al tamiz cuyo porcentaje retenido acumulado es 15% o más. La unidad de medida es “pulgada (”)”.
- **Peso unitario del agregado fino (PUf):** es la relación que existe entre la masa de un grupo de partículas de agregado fino, entre el volumen que ocupan todas ellas, incluyendo los espacios vacíos entre partículas. La unidad de medida es “Kg/m³”.
- **Peso específico seco del agregado fino (PEf):** es la relación que existe entre la masa, en el aire, de un volumen de agregado fino y la masa de un volumen igual de agua libre de gas. La unidad de medida es “Kg/m³”.
- **Porcentaje de absorción del agregado fino (ABSf):** es la relación que existe entre el peso del agua que puede absorber una cantidad de agregado fino y el peso de la misma cantidad de agregado fino en estado seco. La unidad de medida es “%”.
- **Contenido de humedad del agregado fino (HUMf):** es la relación que existe entre el peso del agua que contiene una cantidad de agregado fino al momento de realizar el vaciado y el peso de la misma cantidad de agregado fino en estado seco. La unidad de medida es “%”.

- **Peso unitario del relave (PUr):** es la relación que existe entre la masa de un grupo de partículas del relave, entre el volumen que ocupan todas ellas, incluyendo los espacios vacíos entre partículas. La unidad de medida es “Kg/m³”.
- **Peso específico seco del relave (PEr):** es la relación que existe entre la masa, en el aire, de un volumen del relave y la masa de un volumen igual de agua libre de gas. La unidad de medida es “Kg/m³”.
- **Porcentaje de absorción del relave (ABSr):** es la relación que existe entre el peso del agua que puede absorber una cantidad de relave y el peso de la misma cantidad de relave en estado seco. La unidad de medida es “%”.
- **Cantidad de datos estadísticos:** es necesaria para calcular la resistencia a la compresión requerida (f'_{cr}), si se cuenta con 15 a 29 datos estadísticos, también se requiere de la cantidad de ensayos.
- **Contenido de agua (a):** es la cantidad de agua que se debe agregar a la mezcla para que esta adquiera una consistencia deseada. La unidad de medida es “lt”.

Se ha realizado el diseño de mezclas por el método ACI por lo que se tomaron las proporciones en la dosificación para los criterios dados como la resistencia de un f'_c mínimo de 70kg/cm² (a los 28 días), según el requerimiento para el bloque de concreto y que tenga una consistencia plástica. Para el diseño ha sido necesario el uso de tablas del Comité del ACI.

a) **Cálculo de la resistencia a la compresión requerida (f'_{cr}):** de acuerdo al método de diseño de mezclas del ACI, existen tres formas de calcular el f'_{cr} , que varía según datos estadísticos con que se cuente, las cuales son las siguientes:

a.1. Se cuenta con suficientes datos estadísticos (>30): la resistencia a la compresión requerida (f'_{cr}), es el mayor de estas dos resultantes:

$$f'_{cr} = f'_c + 1.34 * S$$

$$f'_{cr} = f'_c + 2.33 * S - 35$$

Fórmula 7 Resistencia a la compresión requerida

Fuente: ACI

$$S = \sqrt{\frac{\sum (xi - x)^2}{n - 1}}$$

Fórmula 8 Desviación estándar para datos mayores a 30

Fuente: ACI

Dónde:

- ✓ f'cr: resistencia a la compresión requerida en Kg/cm2.
- ✓ S: desviación estándar en Kg/cm2.
- ✓ xi: resistencia de un espécimen en Kg/cm2.
- ✓ x: resistencia promedio de “n” especímenes.
- ✓ n: número de especímenes ensayados.

a.2 Se cuenta con pocos datos estadísticos entre 15 y 29: cuando se cuentan con pocos datos estadísticos, se procede de igual forma que en el caso anterior, con la diferencia que se aplica la siguiente fórmula para la desviación estándar:

$$S = \left(\sqrt{\frac{\sum (xi - x)^2}{n - 1}} \right) * f$$

Fórmula 9 Desviación estándar para datos entre 15 a 29

Fuente: ACI

Dónde:

- ✓ f: factor de corrección:

Tabla 42

Factor de corrección

# de ensayos	Factor de corrección (f)
15	1.16
20	1.08
25	1.03
30	1.00

a.3 Si no existiera historia de ensayos de resultados de acuerdo a la ACI se considera la siguiente tabla:

Tabla 43

Cálculo resistencia requerida

Resistencia a la compresión especificada f'_c	Resistencia requerida f'_{cr}
$f'_c < 210 \text{ kg/cm}^2$	$f'_{cr} = f'_c + 70 \text{ kg/cm}^2$
$210 \text{ kg/cm}^2 < f'_c < 350 \text{ kg/cm}^2$	$f'_{cr} = f'_c + 84 \text{ kg/cm}^2$
$f'_c > 350 \text{ kg/cm}^2$	$f'_{cr} = f'_c + 98 \text{ kg/cm}^2$

Fuente: ACI

Hay que tener en cuenta que esta tabla es para concretos convencionales, en este caso en particular, esta tabla fue modificada, ya que la resistencia a la compresión (f'_c) varían entre 25 a 180 kg/cm², por ello se calculó la función que contiene los siguientes tres puntos:

Tabla 44

Resistencia agregada

f'_c	Resistencia agregada	Resistencia agregada
210 kg/cm ²	70 kg/cm ²	33.33%
280 kg/cm ²	84 kg/cm ²	30.00%
350 kg/cm ²	98 kg/cm ²	28.00%

Fuente: Elaboración propia

b) Contenido de agua: según el ACI, la cantidad de agua que debe usarse, depende del TMN del agregado grueso, el asentamiento que se quiere lograr y de las condiciones donde se fabrica la mezcla (cuando la temperatura es mayor o menor a 0°C):

Tabla 45

Volúmen unitario de agua

Asentamiento	Agua en 1/m³ para los tamaños Max. Nominales de agregado grueso y consistencia indicados						
	3/8"	1/2"	3/4"	1"	1 1/2"	2"	3"
Concreto sin aire incorporado							
1 a 2"	207	199	190	179	166	154	130
3 a 4"	228	216	205	193	181	169	145
6 a 7"	243	228	216	202	190	178	160
Concreto con aire incorporado							
1 a 2"	181	175	168	160	150	142	122
3 a 4"	202	193	184	175	165	157	133
6 a 7"	216	205	197	184	174	166	154

Fuente: ACI

Siguiendo la recomendación de la tabla correspondería a 207 l/m³, sin embargo con los ensayos realizados, se encontró que la cantidad de agua necesaria para la mezcla de concreto para bloques es de 180 litros de agua por metro cubico de concreto seco.

c) Relación a/c: en esta relación va a variar de acuerdo a la dosificación que se va a usar, sin embargo se mencionara la relación que contenga el mayor porcentaje de relave y sea eficiente técnicamente.

d) Contenido de aire: depende del TMN del agregado, según el ACI se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 46

Contenido de aire atrapado

Tamaño máximo nominal del agregado (pulg)	Tamaño máximo nominal del agregado (mm)	Aire atrapado
3/8"	9.5	3.00%
1/2"	12.5	2.50%
3/4"	19	2.00%
1"	25	1.50%
1 1/2"	37.5	1.00%
2"	50	0.50%
3"	75	0.30%
6"	150	0.20%

Fuente: ACI

e) Contenido de cemento: se calcula dividiendo la cantidad de agua entre la relación a/c.

$$C = \frac{A}{a/c}$$

Fórmula 10 Contenido de cemento

Fuente: ACI

Dónde: A=cantidad de agua

a/c= relación agua cemento

f) Volúmenes absolutos sin considerar agregados (V): se procede a calcular el volumen que ocupara cada material en la mezcla, dividiendo el peso entre el peso específico, sin considerar los agregados gruesos ni finos, estos también tendrían variación de acuerdo a la relación planteada.

g) Calculo del volumen de agregados: del anterior ítem, se le resta 1 m³ y se obtendrá el volumen total de agregados. Para calcular el volumen de cada agregado, dependerá de la relación AG/AF que se tenga.

g.1 Volumen de agregado grueso

$$V_g = \frac{\frac{AG}{AF} * (1 - V) * PU_g * PE_f}{\frac{AG}{AF} * PU_g * PE_f + PU_f * PE_g}$$

Fórmula 11 Cálculo de volúmen de agregado grueso

Fuente: ACI

Donde:

AG = Agregado grueso

AF = Agregado fino

V = volumen absoluto

PUg = Peso unitario agregado grueso

PUf = Peso unitario agregado fino

PEg = Peso específico agregado grueso

PEf = Peso específico agregado fino

g.2 Volumen de agregado fino

$$V_f = \frac{(1 - V) * PU_f * PE_g}{\frac{AG}{AF} * PU_g * PE_f + PU_f * PE_g}$$

Fórmula 12 Cálculo de volúmen de agregado fino

Donde:

AG = Agregado grueso

AF = Agregado fino

V = volumen absoluto

PUg = Peso unitario agregado grueso

PUf = Peso unitario agregado fino

PEg = Peso específico agregado grueso

PEf = Peso específico agregado fino

h) Peso en estado seco de los agregados: se obtiene de la multiplicación del volumen obtenido anteriormente con su peso específico:

h.1 Peso del agregado grueso:

$$PS_g = V_g * PE_g$$

Fórmula 13 Peso seco de agregado grueso

Donde:

PSg = Peso seco agregado grueso

Vg = Volumen del agregado grueso

PEg = Peso específico del agregado grueso

h.2 Peso seco del agregado fino:

$$PS_f = V_f * PE_f$$

Fórmula 14 Peso seco de agregado fino

Donde:

PSf = Peso seco agregado fino

Vf = Volumen del agregado fino

PEf = Peso específico del agregado fino

i) Peso en estado húmedo de los agregados: se obtiene añadiendo el peso del agua que contienen los agregados, al peso seco del mismo:

i.1 Peso húmedo del agregado grueso:

$$PH_g = PS_g * (1 + HUM_g)$$

Fórmula 15 Peso húmedo del agregado grueso

Donde:

PHg = Peso húmedo agregado grueso

PSg = Peso seco del agregado grueso

HUMg = Humedad del agregado grueso

i.2 Peso húmedo del agregado fino:

$$PH_f = PS_f * (1 + HUM_f)$$

Fórmula 16 Peso húmedo del agregado fino

Donde:

PHf = Peso húmedo agregado fino

PSf = Peso seco del agregado fino

HUMf = Humedad del agregado fino

j) Corrección por humedad: en este paso, se calcula la cantidad de agua que aportan o retiene cada agregado en la mezcla.

j.1 Aporte de agua del agregado grueso:

$$A_g = PS_g * (ABS_g - HUM_g)$$

Fórmula 17 Agua en el agregado grueso

Donde:

Ag = Agua en agregado grueso

ABSg = Absorción del agregado grueso

PSg = Peso seco del agregado grueso

HUMg = Humedad del agregado grueso

j.2 Aporte de agua del agregado fino:

$$A_f = PS_f * (ABS_f - HUM_f)$$

Fórmula 18 Agua en el agregado fino

Donde:

A_f = Agua en agregado fino

ABS_f = Absorción del agregado fino

PS_f = Peso seco del agregado fino

HUM_f = Humedad del agregado fino

j.3 Aporte de agua del relave:

$$A_r = \% * (V_g + V_f) * PU_r * (ABS_r - HUM_r)$$

Fórmula 19 Agua en el relave

Donde:

A_r = Agua en relave

ABS_r = Absorción del relave

PU_r = peso seco del relave

HUM_r = humedad del relave

j.4 Aporte de agua total:

$$A_t = A + A_g + A_f + A_r$$

Donde:

A_t = Agua total

A = Agua

A_g = Agua agregado grueso

A_f = Agua agregado fino

A_r = Agua en relave

k) Dosificación en peso: para poder realizar la mezcla se necesita los pesos de los materiales que serán agregados, para esto se divide el peso de cada material entre el peso del cemento.

4.1.2.10 Elaboración de bloque de concreto

Se propuso la elaboración de bloque de concreto cuyas medidas son: 39cm x 19cm x 14cm. El espesor del bloque es de aprox. 2.54 cm. El modelo del bloque es el que se presenta en la siguiente figura.

Figura 26 Bloque propuesto para el trabajo de investigación

Fuente: Elaboración propia

En este ítem se mostrara el proceso del cálculo para el diseño de mezclas de los bloques de concreto con relave.

A. Cálculo de resistencia a la compresión requerida

Se hizo el diseño de la mezcla para una resistencia a la compresión de 70 kg/cm². Con los ensayos antes realizados se obtuvieron datos estadísticos, la desviación estándar es de 60.61 kg/cm² entonces:

$$f'_{cr} = 70 + 1.34 * 60.61 = 139.88$$

$$\text{o } f'_{cr} = 70 + 2.33 * 60.61 - 35 = 156.51$$

Entonces la resistencia a la compresión requerida es de 156.51 kg/cm².

B. Contenido de agua

El contenido de agua a usar es de 207 lt.

C. Relación a/c

$$156.51 = -158.3 \ln(x) + 50.766 = 0.615$$

$$a/c = 0.515$$

D. Contenido de aire

$$\text{Aire} = 3\%$$

E. Contenido de cemento

$$C = 207/0.615 = 336.58$$

F. Volúmenes absolutos sin considerar agregados

En la siguiente tabla se observa los volúmenes del cemento y agua

Tabla 47

Volúmenes absolutos sin agregados

Material	Peso (kg)	Peso específico (kg/m³)	Volumen (m³)
Cemento	336.58	2860	0.117
Agua	207	1000	0.207
Aire			0.030
Total			0.354

Fuente: Elaboración propia

G. Cálculo del volumen de agregados

$$V_g = 0.289 \text{ m}^3$$

$$V_f = 0.357 \text{ m}^3$$

H. Peso en estado seco de los agregados

$$PS_g = 390.15 \text{ kg}$$

$$PS_f = 974.62 \text{ kg}$$

I. Peso en estado húmedo de los agregados

$$PH_g = 390.15 \text{ kg}$$

$$PH_f = 1300.15 \text{ kg}$$

J. Corrección por humedad

$$A_g = 10.69 \text{ lt}$$

$$A_f = 8.67 \text{ lt}$$

$$A_r = 8.13 \text{ lt}$$

$$A_t = 234.49$$

K. Dosificación en peso

✓	Cemento	1.00
✓	Agregado grueso	1.53
✓	Agregado fino (Relave)	1.70
✓	Agregado fino	2.10
✓	Agua	0.51

4.2 Ensayos de bloques de concreto

4.2.1 Absorción

Para este ensayo se realizó con la dosificación 3-4 concreto con relave (25% de arena gruesa), arena gruesa y confitillo se anotó su peso 3.77kg. Luego se sumergió durante 24 horas y se pesó dando 3.92kg. El porcentaje de absorción es el siguiente:

$$\%abs = \frac{3.98 - 3.77}{3.77} = 3.98\%$$

El ensayo demuestra que no supera el 12% por lo tanto se puede utilizar como bloque con fines estructurales.

Foto 7 Peso de probeta para la prueba de absorción

Elaboración propia

4.2.2 Peso unitario

De acuerdo a los resultados para la dosificación 3-4 la densidad de la probeta es de 2203.51 kg/m³, el uso de relave hizo que aumente su densidad en 7.47% con respecto al bloque de concreto normal. Es decir de 13.5 kg a 14.5 kg aproximadamente.

4.2.3 Ensayo a compresión

Se hicieron seis ensayos de compresión, tres en el del bloque de concreto tipo D3-4 y tres del calculado con la ACI. Se utilizó una sección de acero en la parte superior del bloque para hacer la distribución de esfuerzos.

Foto 8 Ensayo de compresión del bloque de concreto

Elaboración propia

En la siguiente tabla se menciona los resultados de los tres bloques con la dosificación D3-4:

Tabla 48

Resultados de compresión de las muestras con dosificación D3-4

Espécimen	Largo	Ancho	Alto	% hueco	f'c kg/cm ²
1	39.3	13.9	19.0	50.28	75.2
2	39.1	14.0	19.2	49.50	82.3
3	39.0	14.1	19.1	51.10	74.5

Fuente: Elaboración propia

El promedio de los 3 bloques es de 77.33 kg/cm² o 7.5 Mpa el mismo que cumple con la NTP que pide una resistencia de 7 Mpa.

En la siguiente tabla se menciona los resultados de los tres bloques con diseño del ACI:

Tabla 49

Resultados de compresión de las muestras con cálculos del ACI

Espécimen	Largo	Ancho	Alto	% hueco	f'c kg/cm ²
1	39.2	14.0	19.1	50.23	110.2
2	39.0	14.2	19.0	49.78	112.5
3	39.1	14.1	19.1	51.15	109.6

Fuente: Elaboración propia

El promedio de los 3 bloques es de 110.76 kg/cm² o 11 Mpa el mismo que cumple con la NTP que pide una resistencia de 7 Mpa.

4.2.4 Ensayos de calidad ambiental

En los primeros ensayos que se realizaron al relave para demostrar su toxicidad, los resultados demostraban que el relave generaba drenaje ácido y el contenido metálico no superaba los límites de metales tóxicos de la EPA.

Sin embargo, para demostrar su comportamiento químico, tras haber sido usado como agregado y haberse sometido al contacto con el cemento, confitillo y la arena gruesa, se realizó un último proceso al bloque de concreto con relaves. Este proceso conto de las siguientes actividades:

- Trituración del bloque de concreto
- Realizar la prueba ABA y Barrido ICP de la trituración del bloque.

Foto 9 Material triturado para ensayos finales de calidad ambiental

Elaboración propia

Los resultados obtenidos se describen en la siguiente tabla:

Tabla 50

Resultados de ensayos de contenido metálico del lixiviado

Metales	Antes de la mezcla (mg/L)	Después de la mezcla	Limite EPA (mg/L)
Cobre (Cu)	3	2.677	5
Plomo (Pb)	2.963	1.540	5
Arsénico (As)	7,6	0,0005	5
Bario	60	50	100
Cadmio (Cd)	8,71	0.01007	1
Mercurio (Hg)	0,82	<0.0005	0.2
Plata (Ag)	3,54	0,00203	5
Selenio	0,4	0.005	25
Cromo (Cr)	2	0.1486	5

Fuente: Informe de ensayo laboratorio ALS.

Como se observa se han comparado el contenido metálico del antes y después de uso de los relaves mostrando que en ninguno de los casos sobrepasa los estándares del EPA, esta reducción es debido a la combinación con el cemento, encapsula los metales. Ver anexo 4. Ensayos químicos al bloque de concreto.

5 ANÁLISIS COSTO BENEFICIO

En el presente capítulo se desarrolla el cálculo de la elaboración del bloque de concreto, para esto se toma los datos del diseño de mezcla que cumplió con las características físicas, mecánicas y ambientales. Se evalúa su costo de producción por unidad comparándola con el costo del mercado. Para esto se realiza un cálculo de rendimiento y costos directos que intervienen en el bloque de concreto. Finalmente se compara con el costo de un bloque de concreto normal.

5.1 Mano de obra

La mano de obra para el rendimiento fue medido en base a la preparación dentro de los ensayos realizados, se consideró que para la fabricación de bloque de concreto se requiere una cuadrilla conformado por un operario y dos peones. La actividad consta de tres partes:

- ✓ Dosificación de materiales: usualmente se dosifica los agregados por bolsa de cemento. Este proceso de dosificación duro 5 minutos.
- ✓ Preparación de la mezcla: Con los materiales listos se proceden a mezclarlos en este orden: agregado grueso, agregado fino, relave, cemento y agua este proceso de mezcla duro 6 minutos a mano y 3 minutos en máquina.
- ✓ Vaciado de bloques: este último proceso es el que abarca la mayor parte del tiempo y define el rendimiento de la mano de obra. Se inicia por el vaciado de la mezcla al molde se recomendando el uso de mesa vibradora por no menos de 10 segundos, se va enrazando la mezcla al molde y finalmente se dispone en un sitio abierto para su secado. El tiempo de disposición dependerá de la distancia donde se almacene para su secado, se sugiere que no sea más de un minuto.

El cálculo del rendimiento se calculó por jornada de 8 horas (28800 segundos). Teniendo en cuenta que se fabrican 34 bloques en 1840 segundos, en la siguiente tabla se muestra los tiempos para cada actividad:

Tabla 51

Tiempo que demanda las actividades de elaboración de bloque de concreto

Proceso	Tiempo (segundos)	Veces	Tiempo parcial (segundos)
Dosificación de materiales	300	1	300
Preparación de mezcla maquina	180	1	180
Vaciado de bloques	40	34	1360
Total			1840

Fuente: Elaboración propia

Entonces el rendimiento es de: 530 bloques/día.

Cabe mencionar que los rendimientos obtenidos fueron calculados en laboratorio, en el mercado de las bloqueteras hay distintos rendimientos de producción que varían desde los 200 unidades hasta las 20000 unidades diarias, esto debido a la cantidad de cuadrillas utilizadas o cuando son industrializados con el uso de máquinas automatizadas.

5.2 Análisis de costo unitario

Para hacer el cálculo de fabricación de bloque de concreto con relave, primero se procedió a calcular el volumen de concreto utilizados. En la siguiente tabla se muestra los volúmenes de los materiales:

Tabla 52

Volúmenes de material utilizados

Material	Cantidad de material en m3			
	Para 1 m3		Para 1 Ladrillo	
Agua	235.90	lt	1.27	lt
Cemento	265.38	kg	1.43	kg
Ag. Grueso	819.80	kg	4.41	kg
Ag. Fino	476.71	kg	2.56	kg
Relave	656.20	kg	3.53	kg

Fuente: Elaboración propia

Las dimensiones de los bloques:

Tabla 53

Dimensiones del bloque de concreto

Largo =	39.00 cm
Ancho =	14.00 cm
Alto =	19.00 cm
Volumen total =	10374 cm ³
Vacíos =	2
Volumen de vacíos =	5006.5 cm ³
Volumen total de concreto=	5367.5 cm ³

Fuente: Elaboración propia

Entonces con 1 m³ se pueden fabricar aproximadamente 186 ladrillos.

La fabricación de los bloques de concreto requiere 1 operario y 2 peones, teniendo un rendimiento diario de 530 bloques, con la ayuda de una mezcladora. A continuación, se presenta el análisis de precios unitarios para la fabricación de un bloque de concreto con relave.

Partida: Fabricación de bloque de concreto con relave

Cuadrilla: 1 operario + 2 peón

Ver anexo 8. Análisis de precios unitarios.

Análisis de precios unitarios

Presupuesto	0103002 BLOQUE DE CONCRETO							
Subpresupuesto	001 BLOQUE DE CONCRETO					Fecha presupuesto 10/01/2019		
Partida	01.01	BLOQUE DE CONCRETO CON RELAVE 0.39X0.19X0.14 m						
Rendimiento	und/DIA	MO. 530.0000	EQ. 530.0000	Costo unitario directo por : und		1.50		
Código	Descripción Recurso			Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio \$f.	Parcial \$f.
	Mano de Obra							
0101010003	OPERARIO			hh	0.3000	0.0045	19.18	0.09
0101010005	PEON			hh	2.0000	0.0302	14.30	0.43
								0.52
	Materiales							
0207010008	CONFITILLO			m3		0.0031	43.00	0.13
02070200010002	ARENA GRUESA			m3		0.0015	52.00	0.08
02070200010003	RELAVE			m3		0.0016	15.00	0.02
0213010001	CEMENTO PORTLAND TIPO I (42.5 kg)			bol		0.0336	20.00	0.67
0290130022	AGUA			l		1.2700	0.03	0.04
								0.94
	Equipos							
0301010006	HERRAMIENTAS MANUALES			%mo		5.0000	0.52	0.03
03012900030001	MEZCLADORA DE CONCRETO 11 P3 (23 HP)			hm	0.1250	0.0019	3.00	0.01
								0.04

Figura 27 Análisis de precios unitarios

Fuente: Elaboración propia

Entonces el costo directo por unidad es de 1.50 soles.

Se considera un adicional de S/. 0.20 por bloque de concreto, por ensayos que se realizarán cada 5 millares de unidades.

Por lo tanto el costo unitario del bloque de concreto con relave sería de: S/. 1.70 soles sin incluir IGV.

El costo del bloque de concreto liso con las mismas dimensiones y características en el mercado local es de, S/. 1.90 la unidad sin incluir el IGV.

6 ANÁLISIS COSTO BENEFICIO

6.1 Conclusiones

- Se hizo la descripción de los problemas comunes y consecuencias que generan los relaves en el Perú. Se mostró los impactos que generan las relaveras, principalmente la de los pasivos ambientales mineros. En base a esto se busca dar un uso provechoso para la comunidad.
- Se describieron los métodos de encapsulamiento de metales pesados, como el uso de geo polímeros entre ellos la cal y el cemento. Se puede considerar el uso de relave de la EXUM “Mercedes 3” de sin necesidad de incorporar geopolímeros.
- Se realizaron dos tipos de diseño de mezcla, el primero en base a 3 tipos de dosificaciones en la que dio como resultado la dosificación 3-4, cumpliendo con la NTP, dio una resistencia a la compresión de 75 kg/cm². El segundo diseño de mezcla se realizó con las recomendaciones del método del ACI la que dio mejores resultados de resistencia a la compresión con respecto al primer diseño. El diseño del ACI dio una resistencia a la compresión de 112 kg/cm². Se puede apreciar como el uso de relave como agregado está dentro de los requerimientos de la NTP 399.602.
- Al diseño de que se ajustó más a los requerimientos de la NTP 399.602, se le realizó un último ensayo de lixiviación de metales. Estando por debajo de los analizados en un inicio. Esto confirma que las propiedades del cemento actuaron como geopolímeros encapsulando los metales pesados. Cualesquiera que sean las condiciones a las que se someta el bloque de concreto con el uso de relaves de la EXUM “Mercedes 3” no generara problemas a la salud ni al medio ambiente.
- Se realizó un cálculo del costo de bloque de concreto con relave y se comparó con el costo de uno comercial. La diferencia porcentual es de 12%, siendo más caro el del concreto normal.

6.2 Recomendaciones

- Se recomienda estudiar los casos en que las comunidades se ven más afectadas por la contaminación de las relaveras y proponer soluciones similares para beneficios de la población.
- Se recomienda realizar ensayos de lixiviación de metales cada 5000 unidades realizadas o sectorizando la relavera. Ya que como se trata de pasivos ambientales mineros el comportamiento de la relavera ha sido muy dinámica por lo tanto cabe la

probabilidad que la cantidad de metales varié por profundidad o la extensión de la relavera.

- Se puede seguir investigando el uso de relaves de otros centros mineros o minas abandonadas para poder usar este material como agregado no solo como unidades de albañilería si también como elementos estructurales, pisos, pavimentos, etc. Teniendo en cuenta siempre el contenido de toxicidad del relave, que variara según la procedencia, el mineral y la tecnología usada para la recuperación de mineral.
- Se recomienda evaluar los ensayos en caso se aplique a otra relavera, debido a que los ensayos realizados son de una zona donde se realizó minería artesanal, se entiende que los resultados de toxicidad variarían según la mina, por lo que la aplicación de estos diseños solo son válidos para la Ex Unidad Minera Mercedes 3.
- Se recomienda considerar los costos de producción artesanal referenciales ya que comparados a una planta industrial donde re utilizan máquinas automatizadas para fabricación de los bloques de concreto los costos de producción serán menores. no es objeto del estudio que la comunidad cree una unidad de negocio, con fines lucrativos, sino más bien que lo use en su propio beneficio y recuperación en medida del ecosistema perdido por los relaves lo que le daría mejor valor.

7 BIBLIOGRAFÍA

- MINISTERIO DE ENERGIA Y MINAS (MINEM) (2018) (<https://busquedas.elperuano.pe/normaslegales/actualizan-el-inventario-inicial-de-pasivos-ambientales-mine-resolucion-ministerial-no-224-2018-memdm-1659838-1/>) Sitio web oficial del MINEM; contiene anexo con inventario de Pasivos Ambientales Mineros. (Consulta: 10 de noviembre de 2018).
- GAMARRA, Federico (2006) Minería Artesanal en el Perú. Perú.
- CRUZADO, Electro (2010) Impacto de los relaves mineros en el Perú Informe Temático Lima: DIDP.
- ROMERO, Alfonso (2010) Reuso de relaves mineros como insumo para la elaboración de agregados de construcción para fabricar ladrillos y baldosas. En: Revista San Marcos.
- Revista Minería Chilena (MCH) (2012).
- (<http://www.mch.cl/reportajes/el-fin-de-los-relaves/>) Sitio web Revista chilena contiene información sobre propuesta de relaves. (Consulta: 10 de octubre 2017).
- LIANYANG ZHANG, Saeed Ahmari (2014) Production bricks from mine tailings through geopolymerization. Universidad de Arizona.
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADISTICA E INFORMATICA (INEI) (2007) censos nacionales 2007 XI de población y VI de vivienda.
- MINISTERIO DEL AMBIENTE (MINAM) (2010) límites máximos permisibles para la descarga de efluentes líquidos para actividades minero metalúrgicas.
- ENVIROMENTAL PROTECCION AGENCY (EPA) (2018) SW-846 Test Method 1312: Synthetic Precipitation Leaching Procedure.
- DARWIN, Juan y otros (2006) Aprovechamiento de lodos aluminosos generados en sistemas de potabilización, mediante su incorporación como agregado en materiales de construcción, revista ingenierías universidad de Medellin. p119-132. 14p. Vol. 5.
- MOHAMED, A. M. O., (2002) Hydro-mechanical evaluation of stabilized mine tailings, Environmental Geology., Issue 7, p749-759. 11p. Vol. 41.
- ANICAMA ACOSTA, Gerson Alfredo. (2010) Estudio experimental del empleo de materiales de desecho de procesos mineros en aplicaciones prácticas con productos cementicios (tesis de Ingeniería) Lima: PUCP.

- CHAN NAH, Joel Marciano (2010) Preparación del concreto en obra. Universidad de la Salle Cancún.
- MORALES, Miguel (2012) Ladrillos (tesis de ingeniería) Lima: UC. Santo Toribio.
- TEJADA, Fredy (2012) Problemas del relave minero y sus consecuencias en la región Puno, Perú. En Revista.
- DAMIANI, Carlos (2010) Control de calidad para el ladrillo (consulta: 15 de setiembre 2017) (<http://carlosdamiani.blogspot.com/2010/11/control-de-calidad-para-el-ladrillo.html>).
- MINISTERIO DE VIVIENDA CONSTRUCCION Y SANEAMIENTO (VIVIENDA) (2006) Norma técnica E-070 Albañilería.
- INSTITUTO NACIONAL DE CALIDAD (INACAL) (2002) Normas técnicas Peruana.
- COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD (1998) “Manual de tecnología del concreto: Definición y requisitos de los componentes del concreto”. Págs. 100 – 101.
- RIVVA LOPEZ, Enrique (1992) Diseño de mezclas. Lima Perú: Hozlo S.CR.L.
- CHOQUECHAMBI MAMANI, Jhonatan y QUISPE GALINDO, Juan (2013) Informe de tecnología del concreto, pp. 8-9. En: Universidad Peruana Unión.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI) (2009) (https://www.concrete.org/store/productdetail.aspx?ItemID=211191&Language=English&Units=US_Units) Sitio web oficial de ACI contiene Informe de Práctica estándar para seleccionar proporciones para concreto normal, pesado y en masa. (Consulta 19 de noviembre 2018).
- INTERNATIONAL JOURNAL OF ENGINEERING SCIENCE AND TECHNOLOGY (2017). Manufacturing of Building Blocks by Utilising of Iron Ore Tailings. En: Sri Taralabalu Jagadguru Institute of Technology.
- KURANCHIE, Francis y otros (2015). Utilisation of iron ore tailings as agregates in concrete. Australia. En: Universidad Edith Cowan.

8 GLOSARIO

- Relave: Material mineralizado, producto o residuo de la extracción del mineral, también denominados "colas". Está compuesto por material sólido de tamaño incluso menor al de la arena.
- Depósito de relave: es toda obra estructurada en forma segura para contener los relaves provenientes de una planta concentradora, incluyendo sus obras asociadas.
- Su función principal es la de servir como depósito, generalmente definitivo de los materiales sólidos provenientes del relave y que son transportados desde la planta concentradora, permitiendo así la recuperación de la mayor parte del agua que transporta dichos sólidos.
- Flotación: es un proceso fisicoquímico que consta de tres fases (sólido-líquido-gas) que tiene por objetivo la separación de especies minerales mediante la adhesión selectiva de partículas minerales a burbujas de aire.
- Pasivo minero: Cuando una actividad minera es abandonada el lugar donde operaba sin reparar los daños ambientales que ocasionó, se genera un pasivo ambiental. Estos pasivos pueden contaminar el agua, el suelo, el aire, afectar la salud de la población que vive cerca de ellos e incluso puede perjudicar la propiedad de terceros.
- Lixiviación: Operación consistente en hacer pasar un solvente a través de una capa de material pulverizado, para extraer uno o varios constituyentes solubles en la misma.
- Polimetálico: Concentración de minerales metálicos (óxidos y sulfuros) de diferente composición.

Anexo 1 - Caracterización de agregados

Anexo 2 - Ensayo químico mineralógico al relave

Anexo 3 - Cálculos de mezcla

Anexo 4 - Ensayos químicos al bloque de concreto

Anexo 5 - Panel fotográfico

Anexo 6 - Trabajos en laboratorio y solicitudes realizadas

Anexo 7 – Encuestas

Anexo 8 - Análisis de precios unitarios