

UNIVERSIDAD ALAS PERUANAS
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA
AMBIENTAL



**“INVESTIGACIÓN TECNOLÓGICA PARA EL USO DE RELAVES MINEROS
COMO AGREGADO DEL CONCRETO- AREQUIPA 2015”**

PRESENTADO POR LA BACHILLER
ARENAS TEJADA CLAUDIA NANCY
PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO AMBIENTAL

AREQUIPA – PERÚ

2016

A mis padres y abuelos

AGRADECIMIENTOS

A los docentes de la Universidad Alas Peruanas – Filial Arequipa, por su apoyo en mi formación como profesional, siempre buscando inculcar en sus alumnos el compromiso con la protección del medio ambiente.

A mis padres y abuelos, quienes han dedicado su vida a educarme y son la razón de que hoy pueda ser profesional.

Al Dr. Ing. Luis Martin Tejada, cuyo apoyo fue clave para la realización de este proyecto de investigación. Estaré siempre agradecida por todas las palabras de aliento y el tiempo dedicado a que pueda cumplir con este objetivo.

A Juan Carlos, por ayudarme desde el inicio de este proyecto y por estar siempre a mi lado.

Al Mg. Sócrates Muñoz, por la asesoría técnica brindada durante el desarrollo de la investigación.

A mi tío, Luis, por su constante preocupación por mi desarrollo profesional.

A mis padrinos, Hilda y Martin, por todos los consejos y buenos deseos.

A toda mi familia, quienes durante el desarrollo de este proyecto siempre han buscado apoyarme.

A todas aquellas personas que con sus ideas, buenos deseos y palabras ayudaron a que pueda seguir adelante y no darme por vencida en el camino.

CONTENIDO

RESUMEN	7
INTRODUCCIÓN	8
I. PLAN DE TESIS	9
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	9
1.1 Descripción de la realidad problemática.....	9
1.2 Antecedentes teóricos relacionados con la Investigación	10
1.3 Formulación del Problema	12
1.4 Delimitación de la Investigación	12
1.5 Objetivos de la Investigación.....	13
1.6 Justificación, Importancia y Limitaciones de la Investigación	13
1.7 Antecedentes de la Investigación.....	15
1.8 Metodología de la Investigación	23
1.9 Técnicas, Instrumentos y Fuentes de Recolección de Datos.....	28
1.10 Técnicas de Procesamiento y Análisis de Datos Recolectados.....	29
II. MARCO TEÓRICO	30
2.1 Marco Legal	30
2.2 Marco Conceptual	30
2.3 Marco Teórico	31
III. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	48
3.1 Zona de Estudio y Ubicación.....	48
3.2 Muestreo de Suelo	51
3.3 Análisis del Tamaño de Partículas – Granulometría	54
3.4 Humedad de la Muestra:	55
3.5 Densidad Seca Máxima:	55

3.6	Prueba de Resistencia:	56
3.7	Determinación de la Porosidad	58
IV.	ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIONES	59
4.1	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	59
4.1.1	Procedimiento de Análisis del Tamaño de Partículas - Granulometría .	59
4.1.2	Procedimiento de determinación de Humedad de la muestra.....	73
4.1.3	Procedimiento de determinación de la Densidad Seca Máxima	75
4.1.4	Ensayo de determinación de Resistencia	84
4.1.5	Procedimiento de Determinación de la Porosidad	95
4.2	DISCUSIONES	99
4.2.1	Resultados Químicos.....	99
4.2.2	Resultados Físicos.....	106
4.3	Propuesta de Uso para el Material.....	109
4.4	Cierre de Pasivo Ambiental.....	118
4.5	Validación de Resultados.....	119
V.	CONCLUSIONES.....	122
VI.	RECOMENDACIONES	124
	BIBLIOGRAFÍA	125
	ANEXOS	127
A.	PANEL FOTOGRÁFICO DEL SITIO DE ESTUDIO	127
B.	PANEL FOTOGRÁFICO DEL LABORATORIO FÍSICO - MECÁNICO ..	130
C.	CERTIFICADOS DE ENSAYOS	137
D.	FENÓMENOS EROSIVOS EÓLICOS.....	140
E.	DAÑO AL MEDIO AMBIENTE POR SUSPENSIÓN DE RELAVES.....	141

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Serie de Mallas estandarizadas	59
Tabla 2. Análisis granulométrico - Ensayo N° 1	62
Tabla 3. Análisis granulométrico - Ensayo N° 2	63
Tabla 4. Determinación D10 - Ensayo N° 1.....	66
Tabla 5. Determinación D30 - Ensayo N° 1.....	67
Tabla 6. Determinación D60 - Ensayo N° 1.....	68
Tabla 7. Determinación D10 - Ensayo N° 2.....	70
Tabla 8. Determinación D30 - Ensayo N° 2.....	71
Tabla 9. Determinación D60 - Ensayo N° 2.....	72
Tabla 10. Peso en gramos de cada muestra.....	77
Tabla 11. Pesos de las muestras luego de llevarlas al horno.....	77
Tabla 12. Determinación de la densidad y peso específico	78
Tabla 13. Densidad Seca Máxima.....	80
Tabla 14. Densidad Seca Máxima y Contenido de Humedad Óptimo.....	82
Tabla 15. Determinación de las cantidades de materiales de acuerdo al porcentaje	90
Tabla 16. Pesos secos y húmedos por probeta	96
Tabla 17. Composición Química del Relave de la Mina Madrigal	99
Tabla 18. Resultados de resistencia para cada probeta	106
Tabla 19. Equivalencias entre los resultados	107
Tabla 20. Características Técnicas del Cemento puzolánico Yura Tipo IP	107
Tabla 21. Clasificación y Resistencia de adoquines según la NTP	114
Tabla 22. Resultados para determinar el coeficiente de correlación de Pearson	119

INVESTIGACIÓN TECNOLÓGICA PARA EL USO DE RELAVES MINEROS COMO AGREGADO DEL CONCRETO- AREQUIPA 2015”

RESUMEN

El primer capítulo, presenta la descripción de la realidad problemática que origina la disposición de relaves mineros provenientes de una Mina Polimetálica en abandono en el distrito de Madrigal, provincia de Caylloma, departamento de Arequipa; así como los antecedentes relacionados a la investigación y la justificativa del estudio.

En el segundo capítulo, se presenta el marco legal en el cual se basa la investigación; y se desarrolla, en el marco conceptual, la teoría relacionada a los relaves mineros, el cemento Portland tipo IP y el agregado obtenido como resultado.

El tercer capítulo, presenta la metodología de la investigación, la cual considera los procedimientos realizados para el muestreo de suelos y los diferentes ensayos químicos y físicos a los que fue sometida la muestra y el material obtenido.

En el cuarto capítulo, se realiza el análisis de resultados químicos y físicos obtenidos en los distintos ensayos, en base a los cuales se plantea que el material puede ser utilizado en tapones para el cierre de labores mineras y como pavimentos urbanos – adoquines.

Luego se presentan las conclusiones del estudio, las cuales se encuentran relacionadas con los objetivos planteados; y finalmente las recomendaciones trazadas con relación a la investigación desarrollada.

INTRODUCCIÓN

La actividad minera y su relación con el medio ambiente es sin duda alguna uno de los temas de actualidad nacional más controvertidos. Siendo un país con una ancestral tradición minera, contamos con miles de pasivos ambientales mineros a lo largo de todo el territorio, lo cual trae consigo un creciente malestar social que ha generado conflictos socioambientales de gran envergadura y la interrupción de proyectos mineros.

La legislación ambiental peruana se ha desarrollado ampliamente desde finales del siglo XX, implementando estrictas medidas que garanticen la protección del medio ambiente ante los impactos que genere la explotación de un yacimiento minero, este sector cumple con los más rigurosos estándares de preservación del medio ambiente, los cuales deben ser aplicados desde el inicio de un proyecto, contando con estudios científicos debidamente aprobados por las autoridades correspondientes para controlar, monitorear, prevenir y si fuera el caso remediar los posibles impactos. Sin embargo, los esfuerzos realizados a la fecha no parecen ser suficientes, existen pasivos ambientales mineros que se encuentran en estado de abandono; y perjudican al medio ambiente circundante y la población que se encuentra en el área de influencia de lo que fue el proyecto minero, este es el caso de la Relavera de la Mina Madrigal, la cual desde el cese de sus operaciones en los años ochenta, ha perjudicado la calidad de vida de la población del Distrito de Madrigal.

La búsqueda de alternativas para la remediación de los impactos ambientales negativos que se evidencian en la zona debe ser una prioridad para la compañía que allí realizó operaciones. De lograrlo, se demuestra el compromiso que tiene la industria con el desarrollo sostenible, y la inclusión de una población que durante más de medio siglo se ha visto perjudicada por la carencia de una adecuada planificación.

I. PLAN DE TESIS

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Descripción de la realidad problemática

En el Perú, la minería es la actividad económica de mayor envergadura, la cual contribuye al desarrollo del país en diferentes aspectos, siendo la gran minería, o minería legal, la que desarrolla sus operaciones en un marco de respeto y conservación del medio ambiente, cumpliendo con la legislación nacional e internacional, contribuyendo con el desarrollo sostenible y la responsabilidad social empresarial.

La minería en el Perú tiene un rol valioso en el proceso de integración de los pueblos más alejados de nuestro territorio nacional, pues siempre se ha caracterizado por ser un promotor del desarrollo. Hoy la actividad minera se desarrolla en 21 de las 25 regiones del Perú; y ha asumido el reto de ser el agente promotor del proceso de descentralización productiva que requiere el país para cerrar las brechas sociales y económicas. A diciembre del 2014, unas 1039 unidades se han reportado en situación de exploración o producción minera, asimismo, estas áreas alcanzan únicamente 1 722 056 hectáreas. En conclusión, solamente el 1.34% del territorio nacional del Perú ha sido autorizado para el ejercicio de la actividad minera existiendo un 13% del área concesionada que falta explorar y/o explotar, lo cual constituye un enorme potencial. [1]

Sin embargo, antes de que surja la amplia legislación ambiental que tenemos hoy en día, esta actividad generó grandes acumulaciones de residuos mineros como desmontes y relaves, entre otros residuos mineros, los cuales actualmente son considerados pasivos ambientales. Incluso hoy en día, la adecuada disposición y almacenaje de subproductos del procesamiento de los minerales, representa para esta

industria un problema, el cual de no tener un adecuado plan de manejo antes, durante y después de sus operaciones, puede causar serios problemas al medio ambiente y a la población que se encuentra en la zona de influencia.

Actualmente, el Perú tiene alrededor de 450 minas polimetálicas en estado de abandono, denominadas pasivos ambientales mineros, cada uno de ellos representa una alteración al medio físico con el riesgo permanente de contaminación ambiental, generando un impacto visual negativo y una continua contaminación producida por la interacción del clima con el medio físico circundante, esta alteración del medio físico se ve afectada en sus tres componentes principales como son el agua, aire y suelo.

Esta situación se agrava al existir minas abandonadas que tienen relaves mineros sulfurados, y a ello debemos añadir que las minas que actualmente están funcionando son más de 200 que se encuentran operativas y que diariamente generan aproximadamente 100 mil toneladas de relaves mineros polimetálicos que provienen de concentrar minerales de Plomo, Cobre y Zinc [2].

Lo que se busca con esta investigación es transformar estos pasivos ambientales mineros en verdaderos activos industriales, siendo utilizados como materia prima para la fabricación de elementos de construcción, y de esta forma reducir costos y disminuir los niveles de contaminación que causan los relaves.

1.2 Antecedentes teóricos relacionados con la Investigación

La reutilización de los relaves es una propuesta que se viene estudiando a nivel internacional. En el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional de México (CINVESTAV) se propone la elaboración de cementos alternativos, cuyas propiedades

mecánicas y durabilidad química sean superiores a las del cemento Portland. Se busca que su proceso de fabricación genere menos dióxido de carbono que el cemento convencional, a través del uso de desechos como las cenizas que producen las plantas termoeléctricas y los relaves mineros.

La Facultad de Ingeniería de la Universidad Andrés Bello en Chile también se encuentra desarrollando una investigación que apunta hacia la misma dirección. De acuerdo a los estudios mineralógicos y químicos que se 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.

En nuestro país, un grupo de investigadores de la Escuela de Ingeniería de Minas de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos produjo baldosas a partir de la reutilización de relaves utilizando la metodología de fijación y micro encapsulación de metales pesados, lo cual permite su estabilización y evita su migración hacia el medio ambiente. En nuestro país los procesos de encapsulamiento en relaves no son conocidos, sin embargo el encapsulamiento en escorias es conocido en algunos países como Colombia y Chile, se han elaborado materiales como el ladrillo y baldosas pero a través de escorias que son materiales de la industria de la fundición. [3]

En el Perú, se han elaborado estudios para la obtención de ladrillos a partir de lodos provenientes de la industria minera, siendo el caso más conocido el de la compañía minera Buenaventura, quienes realizaron el diseño y elaboración de ladrillos a partir de los lodos de empozamiento del proceso metalúrgico. [4]

Todas las propuestas mencionadas anteriormente, se caracterizan por presentar resistencia química y térmica, buenas propiedades mecánicas, bajos niveles de emisiones de CO_2 y menores costos de producción.

1.3 Formulación del Problema

1.3.1 Problema Principal

- ¿Es posible utilizar el relave minero como agregado del concreto?

1.3.2 Problema Específico

- ¿Se han realizado estudios de caracterización química, física y mecánica de relaves mineros para su posterior reutilización?
- ¿Se conoce el porcentaje idóneo de relave para su uso como agregado del concreto?
- ¿Existen alternativas de solución a la problemática ambiental que representan en nuestro país los pasivos ambientales mineros?

1.4 Delimitación de la Investigación

1.4.1 Delimitación Espacial

- La investigación recopilará y analizará relaves mineros provenientes de la Mina Inactiva Madrigal – Veta Santa Rosa, ubicada en la provincia de Caylloma, departamento de Arequipa.

1.4.2 Delimitación Temporal

- Este trabajo abarca una problemática actual, ya que la disposición de relaves representa una contrariedad para la industria minera, y para el Estado Peruano en el caso de aquellas minas que se encuentran en abandono.
- El objeto de la investigación tomó su punto de partida en el mes de octubre del año 2015 con la recopilación de los datos de campo, continuando durante los meses de noviembre y diciembre con el análisis, pruebas de laboratorio y obtención de probetas como resultado de la investigación.

1.4.3 Delimitación Cuantitativa

- Se obtuvieron probetas con distintas concentraciones de relave, las cuales determinaron cuál es la cantidad requerida para obtener un material que presente las condiciones necesarias para ser usado en la industria de la construcción.

1.5 Objetivos de la Investigación

1.5.1 Objetivo General

- Demostrar la viabilidad del uso de relaves mineros como agregados del concreto.

1.5.2 Objetivos Específicos

- Estudiar las características químicas, físicas y mecánicas que tiene el relave proveniente de una mina polimetálica.
- Obtener probetas con distintos porcentajes de relave que cumplan con las características mecánicas necesarias para su utilización en la industria de la construcción.
- Proponer una solución a la problemática ambiental que causan los relaves provenientes de una mina inactiva.

1.6 Justificación, Importancia y Limitaciones de la Investigación

1.6.1 Justificación de la Investigación

La presente investigación tiene por finalidad realizar un análisis de las características de los relaves, para así determinar su utilidad como agregados de materiales de la construcción. De igual manera, plantea una alternativa de solución para los pasivos ambientales de la industria minera.

1.6.2 Importancia de la Investigación

La re utilización de residuos mineros representa para el medio ambiente, una solución para los impactos ambientales generados por estos. Es por ello que su uso como agregado de los materiales de construcción representa una alternativa de solución para resolver el problema que conllevan los pasivos ambientales para el medio y la sociedad. Para el caso de la relavera ubicada en el distrito de Madrigal, la aplicación de esta investigación conllevaría a una mejora en la calidad de vida en la población, ya que desde el inicio de las operaciones de la mina, su calidad de vida se ha visto afectada.

1.6.3 Limitaciones de la Investigación

Esta investigación se ve condicionada por la accesibilidad a la zona de obtención de relave. El distrito de Madrigal no cuenta actualmente con pistas asfaltadas, solo vías afirmadas pobremente. Es necesario contratar camiones de servicio si se quiere llegar al lugar y sobre todo si se desea extraer una cantidad considerable de relave.

Otra de las limitaciones de la investigación es la cantidad de muestra necesaria para realizar un estudio profundo sobre la muestra a obtener. Una investigación específica requiere de grandes cantidades de relave y cemento; como ya se mencionó la obtención de relave en el Madrigal es dificultosa, y el obtener ese total de insumos implica una cuantiosa inversión.

1.7 Antecedentes de la Investigación

Considerando los diversos estudios realizados a nivel nacional e internacional antes mencionados, esta investigación busca realizar un estudio de las características inherentes al relave minero que nos permitan utilizarlo como agregado del cemento para la posterior obtención de probetas.

El relave a utilizar proviene de la Mina Inactiva Madrigal – Veta Santa Rosa, la cual se caracteriza actualmente por presentar grandes volúmenes de relaves que constituyen una de las fuentes de mayor contaminación en la zona por efecto de la dispersión eólica, afectando directamente a los campos de cultivo próximos a la mina y por consecuencia de la salud de los pobladores. [5]

La fuente potencial de contaminación en Madrigal, está relacionada a la operación de extracción y beneficio de minerales polimetálicos sulfurados de Plomo, Zinc y Cobre, y está representada por el drenaje ácido de relave/roca (DAR), unidades de desecho, pilas de mineral y desmonte con contenido metálico, generación de material particulado proveniente de los relaves y la presencia de actividad humana.

La veta Santa Rosa se ubica dentro del Distrito de Madrigal, en la provincia de Caylloma al noreste del departamento de Arequipa, entre las coordenadas 71°83' longitud este y 15°55' latitud sur, a una altitud entre los 3200 y 4300 m.s.n.m. Esta veta aflora principalmente entre las quebradas Keto y Sahuayto, aproximadamente a 8 Km. del pueblo de Madrigal.

La problemática ambiental en el Distrito Madrigal - Provincia de Caylloma se ha evidenciado desde antes del cese de sus operaciones. En el año 1984, Martínez¹ señalaba que existía un gran problema en los cultivos agrícolas del lugar, provocado por el polvo de relave proveniente de la Mina Madrigal.

¹ Martínez Castilla Z., 1984, “*Problemática minera en Arequipa*”.

Con más de veinte años de paralización en sus operaciones, la Relavera de la Mina Madrigal es considerada como un pasivo ambiental prioritario en el sector minero; la publicación “Perú: La oportunidad de un país diferente” realizado por el Banco Mundial² hace mención a este problema específico y analiza como la desaparición o degradación de tierra productiva o recursos hídricos producen un efecto de rechazo comunitario a los actuales proyectos mineros, además de considerar que los nuevos proyectos son una fuente de conflictos y perjuicio al bienestar de la población.

De acuerdo a la investigación “Relavera – Mina Inactiva Madrigal” [6] se demuestra que los relaves ubicados en la zona generan Drenaje Ácido de Roca, problema ambiental que causa la disolución y transporte de metales tóxicos disueltos como Arsénico, Plomo y Cadmio, además de un incremento drástico de sulfatos. Así mismo, recomienda un monitoreo ambiental en la zona para prevenir daños al medio ambiente y al ser humano, considerando sobre todo la calidad de agua del Río Colca en las zonas cercanas a la mina y la Relavera, ya que es importante que se encuentre dentro de los Estándares de Calidad Ambiental para la categoría de consumo humano y riego de vegetales.

En el estudio “Evaluación de la movilidad de metales pesados en sedimentos de quebrada en el entorno de la Mina Madrigal mediante el método de especiación química”, se comprueba mediante los resultados obtenidos en el análisis del factor de movilidad de metales pesados, que existen rutas de exposición por las cuales estos pueden entrar en la cadena alimenticia y eventualmente concentrarse en el ser humano. En esta evaluación, también se identifican aspectos ambientales negativos que requieren acciones de remediación, estas son la generación de Drenaje Ácido de Roca, la migración de partículas provenientes de relaves en

² Giugale, Fretes-Cibils y Newman, 2006, “Perú: La oportunidad de un país diferente”.

estado seco por acción eólica y residuos industriales (estructuras de la Mina que aún se encuentran en la zona en estado de abandono)³.

Existen también otros sectores que reconocen la problemática de la zona, como es el caso del Ministerio de Salud – Dirección General de Salud DIGESA que en el año 2004 señala que uno de los problemas de la Provincia de Caylloma es la contaminación proveniente de los metales pesados que generan los pasivos mineros de la Mina Madrigal. La intervención de este Ministerio es fundamental para establecer mecanismos adecuados que busquen prevenir, promover y proteger la salud, proponiendo un Plan Nacional que busque fortalecer la gestión ambiental y reducir la mortalidad relacionada con la contaminación por metales pesados⁴.

Historia de la Mina Madrigal e Instrumentos Ambientales relacionados al caso de estudio:

Es importante determinar el por qué no se tomaron acciones concretas para la remediación de este pasivo ambiental durante el desarrollo de sus operaciones y su posterior cierre. Debemos considerar que la Mina Madrigal empezó sus operaciones a inicios de la década del 40 del siglo XX, marcando una nueva etapa en la minería de Caylloma; situada a 3 000 m.s.n.m. y en una zona de buen clima, comenzó a ser explotada en aquella época por César Lazarte, poblador de Caylloma, en conjunto con unos 35 a 45 trabajadores, apoyados eventualmente por mujeres “chancadoras”, ampliándose luego gracias a la asociación de Lazarte con dos arequipeños residentes en Chivay incorporados como socios capitalistas: César Salinas Torres, comerciante de lanas, y Humberto Valdivia, director de colegio. La

³ Guillén, M., Pascual, O., “Evaluación de la movilidad de metales pesados en sedimentos de Quebrada en el entorno de la Mina Madrigal mediante el método de especiación química”.

⁴ Ministerio de Salud – Perú, 2004, “Plan Nacional de participación social y compromiso multisectorial para fortalecer la gestión ambiental y reducir la morbi-mortalidad relacionada a la contaminación por Plomo y otros metales pesados Perú 2005-2014”.

construcción de la carretera Chivay – Madrigal, iniciada en 1947, favoreció la expansión de las actividades de la mina. La explotación de Lazarte se mantuvo hasta 1963, vendiendo su producción a la Casa Hochschild y al Banco Minero; si bien este pagaba mejor precio, la Casa Hochschild habilitaba insumos y herramientas por adelantado. En 1963 Lazarte falleció, optando su familia por traspasar la propiedad del denunció a la Casa Hochschild. En el mismo año, la Compañía Minera Andes Orientales adquirió el denunció Santa Rosa, comprando luego el denunció Madrigal n° 1, 2, 3 y 4 y San José 8. En 1967 la Compañía Minera norteamericana Homestake formó la Compañía Minera del Madrigal, adquiriendo el 61% de las acciones, extendiendo la carretera hasta Cahuana al vencer la resistencia de los pobladores de la zona afectados por la invasión de sus chacras, la destrucción de sus cercos y la contaminación de sus tierras.

En 1969 se firmó el Contrato Minero Especial entre el gobierno peruano y la Compañía Minera del Madrigal, sucursal de Mountain Mineral Perú S.A. Con capital japonés se habilitó la infraestructura y en abril de 1972 se inició oficialmente la explotación y beneficio metalúrgico, el cual continuó hasta los años 80. La prosperidad minera, sin embargo, no significó grandes beneficios para la región. La minería del Siglo XX se diferenció notablemente de la del siglo anterior debido a que suponía el uso de una alta tecnología para la época, la cual obligaba al empleo de un elevado componente importado en la producción, lo que condicionaba una escasa articulación entre la explotación minera y su entorno inmediato. La tecnología fue importada así como los insumos utilizados, incluso una significativa parte de los alimentos para mantener a los colaboradores también lo fueron; la carencia de inversiones en la producción de la zona se plasmó en carencia de desarrollo en el área de influencia directa de la mina. Esta, tampoco absorbía un significativo número de trabajadores de la zona, ya que preferían contratar trabajadores puneños por su tradición minera, fuera de que solicitaban menos beneficios que los pobladores locales, por lo

cual el número de trabajadores provenientes de las zonas aledañas a la mina no alcanzaba a la quinta parte del total de la población trabajadora. Adicionalmente, la mina no proporcionaba electricidad al pueblo, ya que alegaban que sus seis grupos electrógenos no bastaban para abastecer sus propias necesidades, ni tampoco asumían el mantenimiento de la carretera por la cual transitaban los camiones que transportaban el mineral. La mina aceleró el proceso de desestructuración comunal, mientras se afectaron gravemente los recursos naturales, el ganado, la comunidad y el medio ambiente, quienes sufrieron daños irreversibles; ya para la época se consideraba que la presa o cancha de relaves fue una de las mayores causas de conflictos entre la mina y el pueblo por las siguientes razones:

- a. Físicamente, ocupaba unas diez hectáreas de la mejor tierra plana, fértil y con riego.
- b. Con frecuencia, la tubería que llevaba el relave a la presa (o cancha) sufría desperfectos, cayendo el contenido a la acequia de riego.
- c. El polvo de relave se levantaba con la acción del viento por las tardes, y se transportaba a acequias de riego, ocasionando alteraciones en la calidad de aire de la zona, afectando el agua utilizada para riego de vegetales o bebida de animales, lo cual ocasionaba que se enfermen y mueran. Aún hoy en día, la población de Madrigal sostiene que este problema, causado por la acción eólica, sigue afectando la calidad de vida tanto de la población como de la vida animal.

La minería en la zona, no constituía un elemento de dinamización de la economía local, por el contrario resaltaba su regresión. Su lógica estuvo organizada en función a la explotación de los recursos mineros, con total carencia de cualquier consideración de las condiciones de vida de los pobladores, sus carencias y sus necesidades. Se incrementó el número de los trabajadores afectados con silicosis y se depredaron recursos no renovables. [7]

La Mina dejó de operar antes del comienzo de la década de los noventa; actualmente se encuentra inactiva y cerrada, sin embargo aún hoy se encuentra allí el Campamento Majaro con personas residiendo en el lugar y los pasivos ambientales ya descritos.

En lo correspondiente a la legislación e instrumentos ambientales que regularon la actividad de la mina durante las décadas que operó, y en base a la bibliografía, se conoce que no fue hasta la década del 60 que se realizaron labores concretas para el cuidado del medio ambiente a nivel nacional, la normativa se instauró de la siguiente manera:

- **1969:** Creación de la Oficina Nacional de Evaluación de Recursos Naturales (ONERN) mediante Ley No. 17532 con el objetivo de realizar estudios integrales de los recursos naturales del país con fines de desarrollo económico y social, colaborar con el Instituto Nacional de Planificación en la formulación de la política del uso y conservación de tales recursos y estudiar la interdependencia entre el medio natural y el hombre, proponiendo las alternativas que hagan viable su preservación.
- **1981:** Se presenta ante la Cámara de Diputados el Proyecto de Ley No. 505 que propone la creación del Ministerio del Medio Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables que tendría como objetivo la lucha contra la contaminación ambiental, la defensa del medio ambiente, la preservación ecológica de la población peruana y la preservación y control de los recursos naturales renovables.
- **1984:** El Proyecto de Ley No. 505 derivó en la expedición de la Ley No. 23996. Esta Ley, si bien no crea el Ministerio del Medio Ambiente y los Recursos Naturales, declara de necesidad nacional la aprobación del Código del Medio Ambiente y los Recursos Naturales. En este mismo año se redacta el Primer Anteproyecto del referido Código, el que incorpora un título referido a la organización administrativa, con un capítulo referido al Consejo Nacional del Medio Ambiente y los Recursos Naturales. Este Consejo se planteó con una composición multisectorial y

como el órgano rector y la máxima autoridad encargada de velar por la conservación, control, uso racional y recuperación del ambiente y los recursos naturales.

- **1985:** Se aprueba el Decreto Legislativo No. 354 que crea el Consejo Nacional de Protección del Medio Ambiente para la Salud – CONAPMAS. La aparente regulación del CONAPMAS como una autoridad ambiental restringida al campo de la salud, generó un pronunciamiento de la Comisión Redactora del Código del Medio Ambiente que precisó la inconveniencia de sectorializar el tratamiento del problema ambiental.
- **1990:** Mediante Decreto Legislativo No. 613 se promulga en setiembre de 1990 el Código del Medio Ambiente y los Recursos Naturales. Este dispositivo legal incorporó en su capítulo XXII las normas que regulaban el Sistema Nacional del Ambiente. Dicho Sistema estaba integrado por todas las instituciones estatales dedicadas a la investigación, evaluación, vigilancia y control de los recursos naturales y el medio ambiente, con el objeto de coordinar la ejecución de la política nacional ambiental y garantizar el cumplimiento de las funciones que se asignaban a las dependencias del gobierno con competencias ambientales. El Decreto Legislativo No. 613 postergó para un Decreto Supremo posterior la creación de un ente coordinador del Sistema; sin embargo creó en la Contraloría General de la República una repartición especializada en la defensa del medio ambiente y los recursos naturales con la función de velar por el cumplimiento en el territorio nacional de las disposiciones del Código. [8]

Como se puede desprender de los primeros intentos de crear una institucionalidad ambiental en el Perú, las primeras acciones en búsqueda de la protección del medio ambiente no se dieron hasta los años 60, época en la cual la mina ya se encontraba funcionando en la zona; aún hasta el cese de operaciones, que como ya se mencionó anteriormente fue antes de la década del 90, no hubo una legislación instaurada ni mucho menos

instrumentos ambientales ni entidades fiscalizadoras que se encarguen de realizar el seguimiento respectivo a planes de remediación de los pasivos ambientales negativos presentes en la zona al cierre de la mina.

El Programa de Adecuación y Manejo Ambiental – PAMA no se creó hasta el año 1994 mediante el Decreto Supremo N° 46-93-EM, año en que se establece esta prescripción escrita para realizar cambios en las operaciones que requieran modificaciones necesarias en instalaciones y procedimientos. Si bien de acuerdo a la Ley que regula los pasivos ambientales de la actividad minera – Ley N° 28271 (promulgada en el año 2004 y su respectiva modificatoria promulgada en el año 2005) en su Artículo 5 – Atribución de Responsabilidades menciona que: “Los responsables de pasivos ambientales que no desarrollen operaciones mineras y mantienen el derecho a la titularidad de concesión, deberán presentar el Plan de Cierre de Pasivos Ambientales. El Estado sólo asume la tarea de remediación por aquellos pasivos cuyos responsables no pueden ser identificados. En caso de que el titular de una concesión vigente la perdiera por cualquiera de las causales de extinción establecidas en la Ley General de Minería, mantiene la responsabilidad por los pasivos ambientales”; no se cuenta con información que sustente que la Compañía Minera del Madrigal haya presentado el Plan de Cierre de Pasivos Ambientales.

Así mismo, tampoco se encuentra el Plan de Cierre de Mina el cual de acuerdo a la Ley N° 28090 – Ley que regula el Cierre de Minas y su respectivo reglamento Decreto Supremo N° 033-2005-EM - Reglamento para el Cierre de Minas, contempla lo siguiente: “La presentación del Plan de Cierre de Minas es una obligación exigible a todo titular de actividad minera, que se encuentre en operación, que inicie operaciones mineras o las reinicie después de haberlas suspendido o paralizado antes de la vigencia de la Ley, y no cuenten con un Plan de Cierre de Minas aprobado”; este instrumento ambiental que tiene por objetivo la rehabilitación de áreas

afectadas así como el aseguramiento de la estabilidad física y química de los residuos y componentes mineros susceptibles a generar impactos negativos.

En la actualidad y de acuerdo a la Resolución Ministerial N° 102-2015-MEM/DM - Actualizan el Inventario Inicial de Pasivos Ambientales Mineros, la Relavera de la Mina Madrigal está considerada como uno de los principales pasivos ambientales del Perú, sin Estudios Ambientales y con un responsable del pasivo no identificado. Las consecuencias de la falta de acción de la compañía que tiene la concesión no sólo vienen afectando a la población durante décadas, sino también no se ven acciones concretas por parte de Compañía Minera del Madrigal para mitigar los impactos ambientales negativos causados en la zona.

1.8 Metodología de la Investigación

1.8.1 Hipótesis de la Investigación

Si se analizan las propiedades físicas y químicas que tiene el relave en conjunto con agregados cementicios, entonces se pueden obtener materiales que cumplan con los estándares de la industria de la construcción.

1.8.2 Variables e Indicadores

1.8.2.1 Operacionalización de Variables

VARIABLE		OPERACIONALIZACIÓN	INDICES
Variable Independiente (X)	Características del Relave	Composición	mg/Kg
		Granulometría	Coeficiente de curvatura Coeficiente de uniformidad
		Humedad	%
Variable Dependiente (Y)	Material de construcción obtenido	Resistencia	Mega Pascales
		Porosidad	Volumen total Volumen de vacíos Relación de Vacíos
		Densidad seca máxima	Densidad seca máxima Contenido de Humedad Óptimo

1.8.2.2 Cuantificación de las Variables Independientes

VARIABLE INDEPENDIENTE	CUANTIFICACIÓN	
Composición	Cloruros	205.00 mg/Kg
	Sulfatos	10 544.86 mg/Kg
	Plomo	1043.84 mg/Kg
	Zinc	1518.31 mg/Kg
	Cobre	323.59 mg/Kg
	Plata	0.57 mg/Kg
	Hierro	35111.05 mg/Kg
Granulometría	9.50 mm 6.30 mm 4.75 mm 2.36 mm 2.0 mm	

	850 micras 600 micras 425 micras 300 micras 250 micras 180 micras 150 micras 75 micras 38 micras
Humedad	18.43 %

1.8.3 Tipo y Nivel de Investigación

1.8.3.1 Tipo de Investigación

Exploratoria: En nuestro país, no existe un cuerpo teórico abundante en cuanto a la re utilización de relaves mineros, los resultados obtenidos serán un aporte a la búsqueda de soluciones para la actual problemática ambiental.

1.8.3.2 Nivel de la Investigación

Tecnológico: Esta investigación responde a problemas técnicos que representan en la actualidad los relaves como Pasivos Ambientales Mineros, está orientada a demostrar la validez de técnicas bajo las cuales se aplican principios científicos para demostrar su eficacia como agregado del cemento.

1.8.4 Método y Diseño de la Investigación

1.8.4.1 Método de la Investigación

Esta investigación incluye tanto trabajo de campo como de gabinete, en los cuales se utilizó el método científico para llegar a comprobar la hipótesis planteada. Se analizó la muestra obtenida en campo y se

aplicaron ensayos físico-mecánicos para obtener un material que cumpla con las condiciones establecidas en la normativa.

1.8.4.2 Diseño de la Investigación

Para alcanzar los objetivos planteados fue necesario seguir un proceso, el cual comprende los siguientes pasos:

a. Obtención de la Muestra:

Mediante un muestreo de suelos sistemático se obtuvo 100 kilogramos de relave, los cuales fueron utilizados para la elaboración de probetas, que fueron posteriormente analizadas en un laboratorio físico-mecánico.

b. Preparación de la muestra:

Se preparó en campo la cantidad de relave necesario para su análisis en el laboratorio químico. Utilizando el método de monitoreo de suelos sistemático y posterior cuarteo en campo se obtuvo 1 kilogramo representativo de muestra, la que fue estudiada para obtener su concentración de metales y porcentaje de humedad.

c. Análisis químico:

Se analizaron los siguientes parámetros:

- Plomo.
- Zinc.
- Cobre.
- Plata.
- Hierro.
- Contenido de cloruros.
- Contenido de sulfatos.

- Porcentaje de Humedad.

d. Preparación de probetas:

Se obtuvo probetas con la mezcla de cemento y relave, con los siguientes porcentajes del material en estudio: 40, 50, 66, 70, 75 y 80% de relave. Luego de preparadas las probetas, estas pasaron por un proceso de “curado”, en el cual deben estuvieron sumergidas en agua para ganar resistencia.

e. Análisis físico-mecánico:

Una vez obtenidas y curadas las probetas, estas fueron sometidas a pruebas de resistencia, porosidad y densidad seca máxima, para así comprobar la hipótesis planteada.

f. Análisis de resultados

En base a los resultados obtenidos en los análisis químicos, físicos y mecánicos se determinó el uso que se puede dar a este material, así como que relación relave-cemento es eficiente.

1.8.5 Población y Muestra

1.8.5.1 Población

Distrito de Madrigal (Caylloma – Arequipa).

1.8.5.2 Muestra

Relavera de Mina Inactiva Madrigal - Veta Santa Rosa.

1.9 Técnicas, Instrumentos y Fuentes de Recolección de Datos

1.9.1 Técnicas

Relave:

- Determinación porcentual de los siguientes analitos: Plomo, Zinc, Cobre, Plata, Hierro, Contenido de cloruros, Contenido de sulfatos.
- Determinación del porcentaje de Humedad.
- Análisis de granulometría.
- Análisis de densidad máxima.

Probetas:

- Análisis de resistencia.
- Análisis de porosidad.

1.9.2 Instrumentos

Relave:

- Absorción Atómica.
- Humedómetro – Speedy.
- Tamizador mecánico.

Probetas:

- Martillo de Schmidt.
- Determinación de Porosidad.
- Compactación Proctor.

1.9.3 Fuentes

Las fuentes consultadas para la investigación son las siguientes:

- Tesis de post grado relacionadas con el tema.
- Papers.
- Internet.

- Biblioteca.
- Revistas científicas.

1.10 Técnicas de Procesamiento y Análisis de Datos Recolectados

1.10.1 Selección y Representación por Variables

Se aplicó para todas las variables de la investigación un análisis de los datos cuantitativos obtenidos.

1.10.2 Estudios Experimentales

Se realizó un diseño de investigación para la elaboración de probetas, mediante el cual se obtuvo resultados para cada porcentaje de relave a estudiar. Dichos resultados serán analizados para determinar la relación porcentaje de relave - resistencia que sea la adecuada para posterior uso como agregado del cemento.

II. MARCO TEÓRICO

2.1 Marco Legal

- Constitución Política del Perú.
- Ley N° 28611, Ley General del Ambiente.
- Decreto Supremo N° 014-92-EM, Texto Único Ordenado de la Ley General de la Minería.
- Decreto Supremo N° 038-98-EM, Reglamento para las actividades de explotación minera.
- Decreto Supremo N° 033-2005-EM, Reglamento para el cierre de Minas.
- Guía para la Elaboración de Planes de Cierre de Minas – Ministerio de Energía y Minas.
- Ley N° 28271, Ley que regula los pasivos ambientales.
- Decreto Supremo N° 059-2005-EM, Reglamento de la Ley N° 28271.
- Decreto Supremo N° 002-2013-MINAM y Decreto Supremo N° 002 - 2014-MINAM, Estándares de Calidad Ambiental para suelo y disposiciones complementarias.

2.2 Marco Conceptual

- Relave: O residuo minero metalúrgico, son desechos, subproductos de procesos mineros y concentración de minerales, usualmente una mezcla de tierra, minerales, agua y rocas. Se definen como el desecho mineral sólido de tamaño entre arena y limo provenientes del proceso de concentración que son producidos, transportados o depositados en forma de lodo. [9]
- Cemento: conglomerante formado a partir de una mezcla de caliza y arcilla calcinadas y posteriormente molidas, que tiene la propiedad de endurecerse al contacto con el agua. Hasta este punto la molienda entre

estas rocas es llamada clinker, esta se convierte en cemento cuando se le agrega yeso, este le da la propiedad a esta mezcla para que pueda fraguar y endurecerse. Mezclado con agregados pétreos (grava y arena) y agua, crea una mezcla uniforme, maleable y plástica que fragua y se endurece, adquiriendo consistencia pétreo, denominada hormigón o concreto.

2.3 Marco Teórico

2.3.1 Relave Minero:

a) Definición:

Toda planta minera cuyo proceso de concentración es Flotación, produce residuos sólidos que se denominan relaves y que corresponden a una "Suspensión fina de sólidos en líquido", constituidos fundamentalmente por el mismo material presente in situ en el yacimiento, al cual se le ha extraído la fracción con mineral valioso, conformando una pulpa, que se genera y desecha en las plantas de concentración húmeda de especies minerales y estériles que han experimentado una o varias etapas en circuito de molienda fina; esta "pulpa o lodo de relaves" fluctúa en la práctica con una razón aproximada de agua/sólidos que van del orden de 1:1 a 2:1. Las características y el comportamiento de esta pulpa dependerá de la razón agua/sólidos y también de las características de las partículas sólidas. [9]

b) Origen y Producción de Relaves de Concentradoras:

El proceso de concentración comienza con el chancado del mineral proveniente de la mina hasta tamaños de partículas generalmente en el rango de centímetros o milímetros. El mineral chancado es luego reducido a tamaños menores a un milímetro, en grandes tambores

rotatorios clasificados como molinos de bolas, molinos de varillas y molinos semi-autógenos (SAG). Se agrega agua al mineral molido y el material permanece en forma de lodo (pulpa) a través del resto del proceso de extracción. El siguiente paso es llamado comúnmente flotación. La flotación opera sobre el principio de que partículas individuales que contienen el mineral que se desea extraer son hechas receptivas selectivamente, a pequeñas burbujas de aire que se adhieren a estas partículas y las elevan a la superficie de un tanque agitado. Las espumas que contienen estas partículas valiosas son retiradas de la superficie, procesadas, y secadas para transformarse en concentrado, este producto final de la concentradora, es embarcado a la fundición para su refinación. Entre tanto, las partículas de desecho que quedan constituyen los relaves. Después de recuperar algo del agua del proceso en tanques apropiados, conocidos como espesadores, los relaves son bombeados al lugar destinado para su almacenamiento.

Una variación de este proceso es mucho más comúnmente utilizado para los minerales de oro y plata. Los procesos de chancado y molienda se realizan en forma similar excepto que usualmente cuando se realizan hasta un tamaño más fino a fin de mejorar la recuperación de granos microscópicos de mineral. Para incrementar el pH hasta alrededor de 11 se agrega cal y la posterior adición de cianuro disuelve el oro y la plata. En el proceso convencional de cianuración, la solución de cianuro que contiene los metales disueltos es separada de los relaves a través de una decantación en contra-corriente (CCD). La solución final es diluida reduciendo las concentraciones de cianuro y descargada con los sólidos de los relaves. Los procesos similares, carbón en pulpa (CIP) y carbón en lixiviación (CIL) añaden carbón al mineral molido como una forma de recuperar el oro y la plata de la solución cianurada. Mientras que los relaves sólidos CIP y CIL son los mismos, las concentraciones de

cianuro en el líquido efluente que acompaña a los relaves son más altos que los obtenidos con CCD [10].

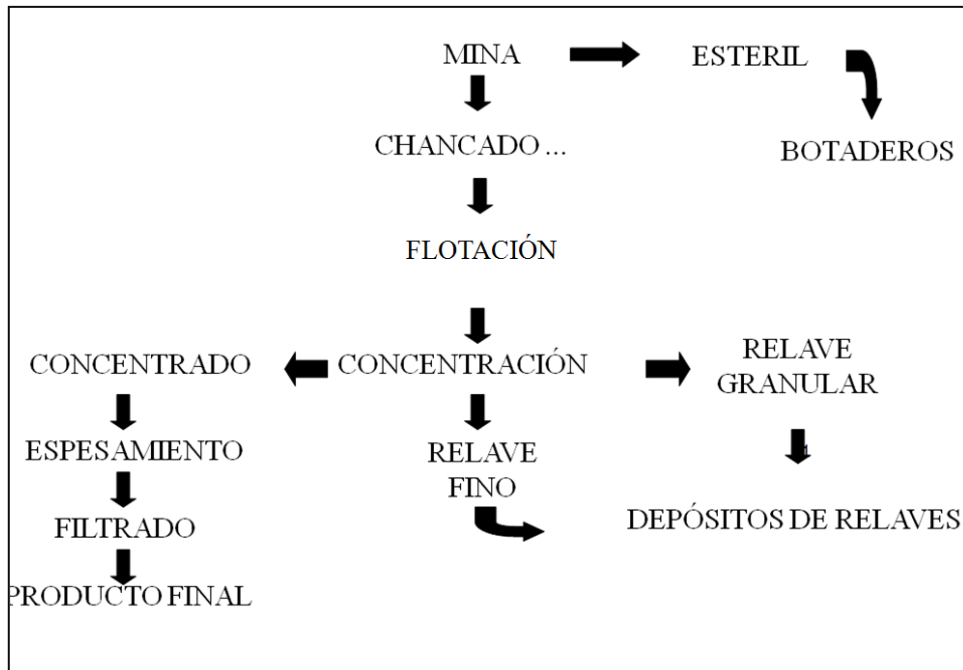


Diagrama 1: Proceso de Generación de Relaves

Fuente: Diseño de métodos de disposición de Relaves: Consideraciones Ambientales (Rojas P., 2011)

c) Otros Residuos Sólidos:

- *Placeres o Lavaderos*, son producidos por operaciones de dragados de oro y menos comúnmente en el dragado de minerales de estaño. Este material es usualmente del tamaño de grava gruesa o mayor y está desprovisto de nutrientes o material capaz de formar suelos. Los asuntos ambientales involucran problemas de sedimentación y revegetación en los arroyos los cuales son específicos para estos materiales. El contenido de mercurio de los residuos tanto de grandes dragas como operaciones en pequeña escala en la selva peruana son motivo de gran preocupación.
- *Relaves de Jig*, son producidos por la separación gravimétrica, casi siempre en combinación con la molienda en las operaciones auríferas

comunes. Tienen un tamaño mayor que los relaves de flotación pero en todo lo demás son similares. La amalgamación con mercurio es aún usada ampliamente para procesar concentrados gravimétricos de oro en pequeñas operaciones del Perú.

- *Relaves de Cianuración con Aglomeración y Peletización*, son producidos por el retratamiento de relaves de amalgamación ricos en oro, mayormente en operaciones muy pequeñas a lo largo de la costa. Los relaves consisten en pelets que van de uno a dos centímetros en tamaño y que son descargados en estado semi seco [11].

d) Drenaje Acido (ARD) de Relaves:

El ARD se refiere a procesos por los cuales el pH del agua en contacto con los relaves puede disminuir severamente, dando como resultado la disolución y transporte de metales tóxicos disueltos tales como arsénico, plomo, cadmio, y un conjunto de otros, además un drástico incremento del contenido de los sulfatos. Es casi imposible detener completamente el proceso una vez que se ha iniciado, y los efectos de la acidificación pueden continuar por muchos siglos. El ARD puede ser el tema ambiental asociado al manejo de relaves potencialmente más dañino y difícil de tratar, y puede no ser evidente aún muchos años después del período de cierre de operaciones. Más que ningún otro asunto, el potencial para ARD es específico para cada cuerpo mineralizado y para sus condiciones físicas y climáticas; no hay reglas generales para predecirla, en cualquier depósito sin el auxilio de pruebas geoquímicas [10].

2.3.2 Material de Construcción:

a) Cemento:

Se definen como cementos los conglomerantes hidráulicos que, convenientemente amasados con agua, forman pastas que fraguan y endurecen a causa de las reacciones de hidrólisis e hidratación de sus constituyentes, dando lugar a productos hidratados mecánicamente resistentes y estables tanto al aire como bajo agua.

b) Proceso Productivo del Cemento:

El proceso de fabricación del cemento se inicia con la explotación de los yacimientos de materia prima, en tajo abierto. El material resultante de la voladura es transportado en camiones para su trituración, los mismos que son cargados mediante palas o cargadores frontales de gran capacidad.

La trituración de la roca, se realiza en dos etapas, inicialmente se procesa en una chancadora primaria, del tipo cono que puede reducirla de un tamaño máximo de 1.5 m hasta los 25 cm. El material se deposita en un parque de almacenamiento. Posteriormente, luego de verificar su composición química, pasa a la trituración secundaria, reduciéndose su tamaño a 2 mm aproximadamente. El material triturado se lleva a la planta propiamente dicha por cintas transportadoras, depositándose en un parque de materias primas. En algunos casos se efectúa un proceso de pre-homogeneización.

La siguiente etapa comprende la molienda, por molinos de bolas o por prensas de rodillos, que producen un material de gran finura. En este proceso se efectúa la selección de los materiales, de acuerdo al diseño de la mezcla previsto, para optimizar el material crudo que ingresará al horno, considerando el cemento de mejores características.

El material molido debe ser homogeneizado para garantizar la efectividad del proceso de clinkerización mediante una calidad constante. Este

procedimiento se efectúa en silos de homogeneización. El material resultante constituido por un polvo de gran finura debe presentar una composición química constante.

La harina cruda es introducida mediante sistema de transporte neumático y debidamente dosificada a un intercambiador de calor por suspensión de gases de varias etapas, en la base del cual se instala un moderno sistema de pre calcinación de la mezcla antes de la entrada al horno rotatorio donde se desarrollan las restantes reacciones físicas y químicas que dan lugar a la formación del clinker. El intercambio de calor se produce mediante transferencias térmicas por contacto íntimo entre la materia y los gases calientes que se obtienen del horno, a temperaturas de 950 a 1100°C en un sistema de 4 a 6 ciclones en cascada, que se encuentran al interior de una torre de concreto armado de varios pisos, con alturas superiores a los cien metros.

El horno es el elemento fundamental para la fabricación del cemento. Está constituido por un tubo cilíndrico de acero con longitudes de 40 a 60m y con diámetros de 3 a 6m, que es revestido interiormente con materiales refractarios, en el horno para la producción del cemento se producen temperaturas de 1,500 a 1,600°C, dado que las reacciones de clinkerización se encuentra alrededor de 1,450°C. El clinker que egresa al horno de una temperatura de 1,200°C pasa luego a un proceso de enfriamiento rápido por enfriadores de parrilla. Seguidamente por transportadores metálicos es llevado a una cancha de almacenamiento.

Desde este depósito y mediante un proceso de extracción controlada, el clinker es conducido a la molienda de cemento por molinos de bolas a circuito cerrado o prensas de rodillos con separadores neumáticos que permiten obtener una finura de alta superficie específica. El cemento así obtenido es transportado por medios neumáticos para depositarse en silos donde se encuentra listo para ser despachado.

El despacho del cemento portland que produce la planta, se realiza en bolsas de 42,5Kg así como a granel.

El proceso de fabricación del cemento se puede agrupar en dos sistemas:

Procedimiento por vía seca:

En la cual las materias primas se muelen y se desecan en primer lugar, luego se mezclan dosificándolas y después son reducidas a polvo, pasando luego a los hornos.

Procedimiento por vía húmeda:

En que las materias primas después de haber sido molidas por separado, se dosifican y se mezclan, amasándolas con una cantidad considerable de agua; el lodo así formado pasa a los hornos.

El producto resultante de la calcinación en los hornos se llama clinker. Estos hornos pueden ser verticales o fijos e inclinados o giratorios. [12]

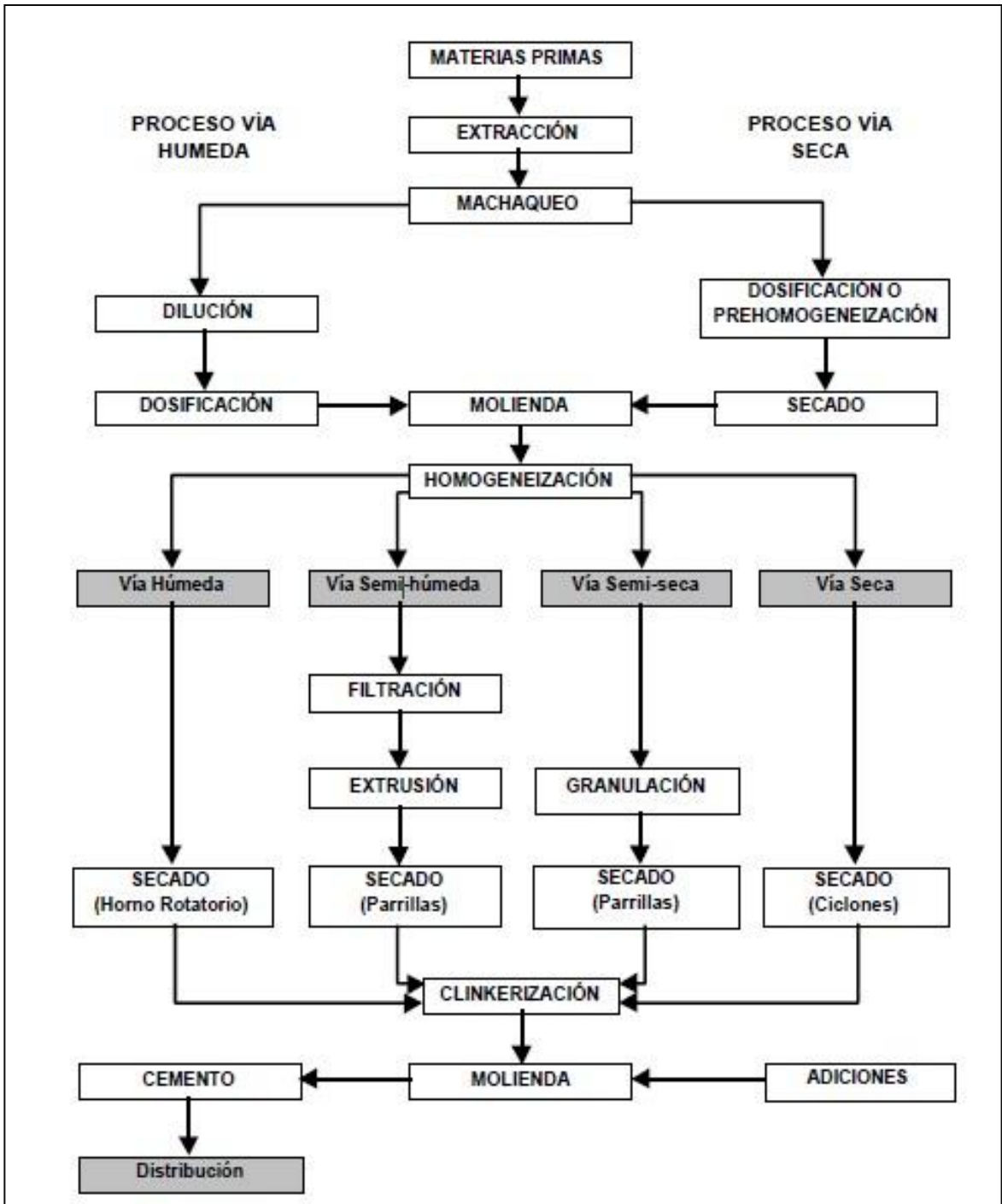


Diagrama 2: Proceso productivo del cemento
Fuente: Cementeras de Bolivia

Clasificación y tipología:

TIPO DE CEMENTO	CEM	Cementos comunes.
	CEM I	Cemento Pórtland
	CEM II	Cemento Pórtland con adiciones
	CEM III	Cemento con escorias de hornos alto.
	CEM IV	Cemento puzolánico
TIPOS DE SUBDIVISIONES DEL CEMENTO PRINCIPAL	CEM V	Cemento compuesto
	A, B ó C	Subtipos de cemento, van seguidos de guión (-) y la letra de la adición.
	M	Cementos Pórtland compuestos.
CLASE RESISTENTE	I, II, III, IV, V	Cementos con características adicionales (sin la letra CEM).
	32,5	Clase de resistencia (a compresión en N (mm ²)).
	42,5	
52,5		
TIPO RESISTENCIA	R	Cemento de alta resistencia inicial.
	N	Cemento de resistencia normal.
ADICIONES	S	Escoria de horno alto.
	O	Humo de sílice.
	P	Puzolana natural
	Q	Puzolana natural caliza
	V	Ceniza volante silíceas
	W	Ceniza volante calcárea
	T	Esquistos calcinados
	L y LL	Caliza.
CARACTERÍSTICAS ESPECIALES DE LOS CEMENTOS	SR	Cementos resistentes a los sulfatos.
	MR	Cementos resistentes al agua de mar
	BC	Cementos de bajo calor de hidratación
	ESP	Cementos para usos especiales
	MC	Cementos de albañilería
	X	Exentos de aditivo aireante
	BL	Cementos blanco comunes
CAC/R	Cementos de aluminato de calcio	

Ilustración 1. Clasificación de Cementos. Fuente: Universidad de Castilla – La Mancha “Cementos”

i) Componentes del cemento:

Clínker de cemento:

- Clínker de cemento pórtland (K): Son los productos que se obtienen al calcinar hasta fusión parcial mezclas muy íntimas, preparadas artificialmente, de calizas y arcillas, hasta conseguir la combinación prácticamente total de sus componentes. Los clínkeres de cemento Portland empleados en cementos resistentes a los sulfatos, y en cementos resistentes al agua de mar presentan limitaciones en su contenido de aluminato tricálcico y de la suma de sus contenidos de aluminato tricálcico y ferrito-aluminato tetracálcico.
- Clínker de cemento de aluminato de calcio (K): Son productos que se obtienen por fusión de una mezcla de calizas y bauxitas de composición y

granulometría adecuadas para conseguir un contenido mínimo de alúmina del 36 por 100.

Escoria granulada de horno alto (S):

Son granulados de horno alto, que se obtienen por templado o por enfriado brusco, con agua o con aire, de la ganga fundida procedente de procesos siderúrgicos. Deben poseer carácter básico e hidraulicidad latente o potencial, así como un contenido mínimo de fase vítrea.

Puzolanas (P, Q):

Las puzolanas son sustancias naturales de composición silíceo-aluminosa o combinación de ambas. Las puzolanas no endurecen por sí mismas cuando se amasan con agua, pero finamente molidas y en presencia de agua reaccionan, a la temperatura ambiente normal, con el hidróxido de calcio disuelto para formar compuestos de silicato de calcio y aluminato de calcio capaces de desarrollar resistencia. Estos compuestos son similares a los que se forman durante el endurecimiento de los materiales hidráulicos.

Las puzolanas naturales (P) son normalmente materiales de origen volcánico o rocas sedimentarias con composición química y mineralógica adecuadas.

Las puzolanas naturales calcinadas (Q) son materiales de origen volcánico, arcillas, pizarras o rocas sedimentarias activadas por tratamiento térmico.

Cenizas volantes (V, W):

Las cenizas volantes se obtienen por precipitación electrostática o mecánica de partículas pulverulentas arrastradas por los flujos gaseosos de hornos alimentados con carbón pulverizado. Las cenizas obtenidas por otros métodos no deberán emplearse en los cementos.

Las cenizas volantes pueden ser de naturaleza silíceas (V) o calcáreas (W). Las primeras tienen propiedades puzolánicas; las segundas pueden tener, además, propiedades hidráulicas.

Esquisto calcinado (T):

El esquisto calcinado, particularmente el bituminoso, se produce en un horno especial a temperaturas de aproximadamente 800°C. Debido a la composición del material natural y al proceso de producción, el esquisto calcinado contiene fases de clínker y proporciones mayores de óxidos puzolánicamente reactivos. En consecuencia, en estado finamente molido, el esquisto calcinado presenta propiedades hidráulicas como las del cemento Portland, así como propiedades puzolánicas.

Caliza (L, LL):

Son compuestos principalmente de carbonato cálcico en forma de calcita (superior al 85 %), que molidos conjuntamente con el clínker Portland, en proporciones determinadas, afectan favorablemente a las propiedades y comportamiento de los morteros y hormigones, tanto frescos como endurecidos. Su acción principal es de carácter físico: dispersión, hidratación, trabajabilidad, retención de agua, capilaridad, permeabilidad, retracción, fisuración.

Humo de sílice (D):

Es un subproducto de la obtención del silicio y del ferrosilicio. Se reduce en horno eléctrico cuarzo muy puro y carbón, recogiendo del humo generado, mediante filtro electrostático, partículas de muy pequeño diámetro formadas, principalmente, por sílice muy reactiva.

Componentes adicionales minoritarios:

Los componentes adicionales minoritarios son materiales minerales naturales o derivados del proceso de la fabricación del clínker. Estos

componentes no aumentarán sensiblemente la demanda de agua del cemento, no disminuirán la resistencia del hormigón o del mortero en ningún caso, ni reducirán la protección de las armaduras frente a la corrosión. Estos componentes suelen mejorar las propiedades físicas de los cementos, tales como la docilidad o la retención de agua.

Sulfato de calcio: El sulfato de calcio se añade durante la fabricación del cemento para controlar el fraguado. El sulfato de calcio puede ser yeso o anhidrita o cualquier mezcla de ellos. El yeso y la anhidrita se encuentran en la naturaleza. Además, el sulfato de calcio también puede obtenerse como subproducto de ciertos procesos industriales.

Aditivos: Son productos que pueden emplearse en la fabricación del cemento, para facilitar el proceso de molienda o bien para aportar al cemento o a sus derivados algún comportamiento específico (inclusores de aire). La dosificación de los aditivos debe ser inferior al 1 por 100 en masa.
[13]

c) Cemento Portland:

Cemento hidráulico producido mediante la pulverización del clinker, compuesto esencialmente de silicatos de calcio hidráulicos y que contiene generalmente una o más de las formas de sulfato de calcio como una adición durante la molienda.

Hasta hace pocos años este era el cemento más utilizado en las aplicaciones de concreto: simple y armado, así como en los trabajos de albañilería. El clinker está formado principalmente por cuatro compuestos mineralógicos y otros componentes secundarios.

Los principales compuestos del cemento son:

- El silicato tricálcico (C_3S).
- El silicato bicálcico (C_2S).

- El aluminato tricálcico (C_3A).
- El ferro-aluminato tetracálcico (C_4AF).

Normalmente el clinker contiene entre 70 y 75% de los dos primeros, entre 7 y 15% del Aluminato tricálcico y el resto lo conforma el ferro-aluminato tricálcico y los compuestos secundarios como el MgO y el SO₃. La proporción en que estos compuestos se presentan en el clinker, depende de la cantidad en que estén presentes en la materia prima, los elementos minerales que los conforman, es decir: Calcio, Silicio, Aluminio y Hierro.

i) Tipos de Cemento Portland:

- Tipo I: Es el cemento Portland destinado a obras de concreto en general, cuando en las mismas no se especifique la utilización de otro tipo. (Edificios, estructuras industriales, conjuntos habitacionales). Libera más calor de hidratación que otros tipos de cemento.
- Tipo II: De moderada resistencia a los sulfatos, es el cemento Portland destinado a obras de concreto en general y obras expuestas a la acción moderada de sulfatos o donde se requiera moderado calor de hidratación, cuando así sea especificado (Puentes, tuberías de concreto).
- Tipo III: Alta resistencia inicial, como cuando se necesita que la estructura de concreto reciba carga lo antes posible o cuando es necesario desencofrar a los pocos días del vaciado.
- Tipo IV: Se requiere bajo calor de hidratación en que no deben producirse dilataciones durante el fraguado.
- Tipo V: Usado donde se requiera una elevada resistencia a la acción concentrada de los sulfatos (canales, alcantarillas, obras portuarias). [14]

d) Cemento IP:

Es un cemento Portland adicionado al que se agrega en el momento de la molienda del clinker, una cantidad de puzolana natural activa de aproximadamente 30% en peso. La norma ASTM C-595 (Especificación Normalizada para Cementos Adicionados Hidráulicos), permite agregar hasta 40% de puzolana en peso.

Ventajas en estado endurecido:

La resistencia a la compresión de los concretos preparados con cemento IP, sigue aumentando con el tiempo, mucho más que la de los concretos producidos con cemento Portland I. Este incremento de resistencia se debe a la reacción de sílice contenida en la puzolana con cal libre que es producida durante la fragua del cemento. Este proceso continúa por un tiempo casi indefinido, sin embargo la ganancia significativa de resistencia, puede considerarse terminada a los 10 años. Como evidencia comparativa, un concreto puzolánico gana entre 60 y 70% más resistencia a la compresión al cabo de un año, mientras que un concreto normal en condiciones óptimas, es decir, en clima muy húmedo o curado por mucho mayor tiempo, habrá ganado un 25% de mayor resistencia al cabo de un año, tiempo en el que culmina en términos prácticos su ganancia de resistencia.

La permeabilidad del concreto puzolánico disminuye en el tiempo a causa de la reacción puzolánica y la cristalización de sus compuestos cementicios; esto hace que las construcciones hidráulicas o aquellas destinadas para contención de líquidos, que sean construidas con cemento puzolánico, tengan mayor impermeabilidad que las realizadas con cemento tipo I ó tipo II. [15]

e) Impactos Ambientales de la Industria Cementera:

Las partículas sólidas constituyen, el principal contaminante emitido a la atmósfera por la industria del cemento. Aunque no son realmente nocivas por su ausencia de toxicidad, son frecuentemente causa de molestias para la población circundante y puede producir perjuicios en la agricultura al cubrir las hojas de las plantas de una finísima capa de polvo.

Es interesante conocer el análisis granulométrico de los polvos emitidos por una planta cementera, ya que de ella dependen los perjuicios que de su acción sobre los seres vivos puede derivarse. Un 7 % aproximadamente de las partículas son pesadas, es decir mayores de 60 micras, lo que las configura como partículas sedimentables, que caerán muy cerca de la planta, con casi independencia de la altura de la chimenea.

Alrededor de un 25 % de las partículas se encuentran entre 1 y 10 micras. Dichas partículas serán transportadas a muy largas distancias. Sólo un 3 % de las partículas son sub micrónicas. Este tipo de partículas sería el más perjudicial si se encontrara muy concentrado al nivel del suelo, ya que puede producir neumoconiosis en los individuos sometidos a larga exposición ante los mismos.

Los principales aspectos medioambientales que caracterizan a esta industria son:

- Emisiones de NO_x , SO_2 y partículas, asociadas al funcionamiento del horno de clinker. Del mismo modo, la descarbonatación de la caliza entrante en el proceso, genera la emisión de CO_2 , vapor de agua y oxígeno.
- Se pueden producir emisiones de CO y COV durante la combustión. La cantidad liberada por el horno dependerá del contenido en materia orgánica del combustible, así como de las condiciones de la combustión.

- El eventual uso de residuos orgánicos, como combustibles alternativos, podría aportar un riesgo adicional, como es la posible generación de emisiones de dioxinas y furanos, asociadas a la presencia de cloro y compuestos orgánicos durante la combustión.
- Emisiones de partículas durante las operaciones de manipulación, transporte y almacenamiento de materias primas y combustibles sólidos.
- Emisiones de metales y sus compuestos, presentes tanto en las materias primas como en los combustibles utilizados en el horno.
- Residuos procedentes de la depuración de las materias primas durante el proceso de preparación del crudo.
- Residuos compuestos por las partículas acumuladas en los filtros, que no puedan ser recirculadas.
- Residuos originados en la instalación como consecuencia del mantenimiento mecánico de los equipos (aceites, filtros, baterías, material contaminado por Hidrocarburos). Igualmente, el mantenimiento eléctrico supone la generación de residuos peligrosos como fluorescentes, baterías, plásticos, o material contaminado con PCBs.
- Ruido asociado a procesos de molienda, ventilación, conducción de gases y enfriamiento. Generalmente, estos ruidos se ven atenuados con la utilización de cerramientos de materiales absorbentes y barreras acústicas.
- Contaminación de aguas pluviales por arrastre de los combustibles (carbón, coque), y ciertos aditivos, normalmente acumulados en acopios exteriores ubicados a la intemperie. [16]

2.3.3 Agregado del Concreto:

a) Características:

De acuerdo a la Norma Técnica de Edificación E.060 para construcciones de elementos estructurales (columnas, vigas, losas de piso en plantas industriales), el material obtenido en esta investigación deberá tener una resistencia especificada a la compresión del concreto igual a $f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$, para cumplir con los requisitos mínimos de resistencia establecidos en las diferentes normativas.

Así mismo deberá de establecerse una relación Agua – Cemento igual a 0.5, para cumplir con las especificaciones mencionadas en dicha norma:

$$\text{Relación} \frac{\text{Agua}}{\text{Cemento}} = 0.5$$

El cemento puzolánico Portland tipo IP utilizado en esta investigación, le dará al material obtenido la propiedad de impermeabilidad, la cual impedirá que flujos afecten al concreto, esta característica sirve de base para la determinación de los usos finales.

Finalmente, en el ensayo de granulometría, el acumulado pasante para la malla N° 200 debe ser menor a 4%, caso contrario, el relave debería ser lavado para que cumpla con lo establecido en la norma.

III. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1 Zona de Estudio y Ubicación

3.1.1 Mina Inactiva Madrigal – Veta Santa Rosa

Como se mencionó anteriormente, la Veta Santa Rosa se encuentra en el distrito de Madrigal, provincia de Caylloma, departamento de Arequipa. Se accede al lugar a través de la carretera asfaltada Arequipa - Chivay aproximadamente de 240 Km., a partir del pueblo de Chivay existen dos carreteras hacia el oeste, bordeando ambas márgenes del río Colca:

Desvío por la margen derecha uniendo los distritos de Coporaque, Ichupampa, Lari, Madrigal y el desvío por la margen izquierda que une los distritos de Yanque, Achoma, Maca, Pinchollo y Cabanaconde, con un tiempo de viaje de 4 horas desde Arequipa hasta el poblado de Chivay.

Otra vía de acceso es a través del ferrocarril que dista 170 Km. desde la ciudad de Arequipa hasta la estación de Sumbay, donde por medio de una carretera se une a la carretera Arequipa- Chivay.

El ferrocarril es también utilizado por la actividad minera cercana (Mina Arcata, Caylloma) como vía de transporte para sus concentrados de mineral, desde Sumbay hasta el puerto de Matarani.

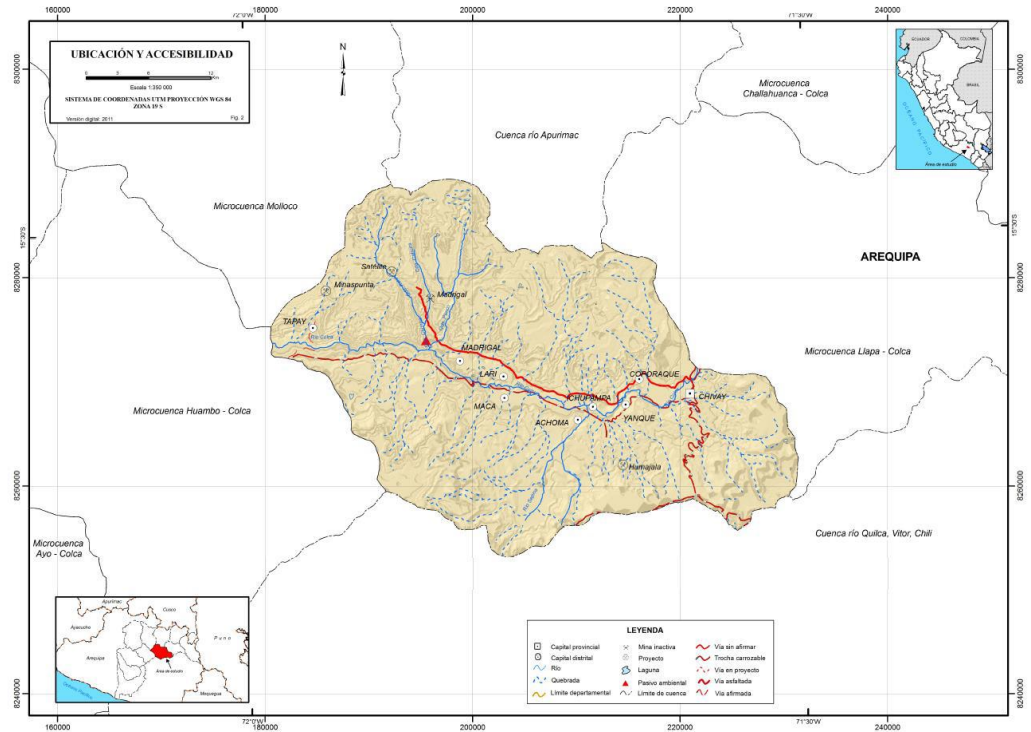


Ilustración 2: Ubicación y Accesibilidad (Villacorta J., 2013)

3.1.2 Clima

Las condiciones climáticas son muy cambiantes conforme se va llegando a altitudes mayores (2000 - 6000 m.s.n.m.) que presenta el valle interandino, siendo por lo general de temperaturas templadas en cierta parte del año, comprende así mismo áreas que se ubican en diferentes regiones geográficas: costa, sierra, sierra alta y puna, manifestándose marcadas diferencias en el régimen y condiciones orográficas del macizo rocoso andino, notándose un incremento a medida que nos alejamos de la influencia del litoral, generalmente con lluvias fuertes en la época de verano (enero-febrero-marzo) con temperaturas bajas (1° C a - 4° C), durante el invierno (Junio-Julio-Agosto) con precipitaciones inferiores a 0.5mm.

El clima del área de estudio corresponde a la parte de la sierra alta ubicada entre altitudes que van desde los 2000 a más de 5000 msnm.

3.1.3 Vegetación, Flora y Fauna

En el piso del valle, se cultivan productos como maíz, trigo, cebada, entre otros.

En las estribaciones andinas predominan el cactus, quinual cuya madera es utilizada en trabajos y como combustible, presenta arbustos de ambiente templado, plantaciones de eucaliptos.

Zona más alta se encuentra el ichu, yareta, tola, ocurre en altitudes que van hasta los 4000msnm, en niveles superiores es casi inexistente la presencia de plantas.

El clima que presenta el valle permite el cultivo de productos de pan llevar, tales como: árboles frutales (partes bajas), hallándose variedades cactáceas y otros arbustos silvestres, ichu (zonas elevadas). Se logra criar ganado vacuno, ovino, la fauna más difundida es la crianza de los camélidos. [6]

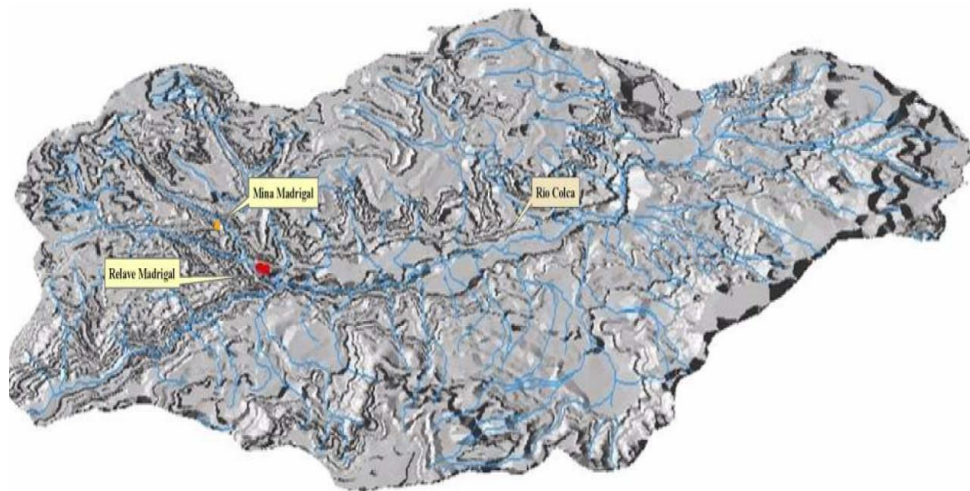


Ilustración 3: Vista en 3D de la microcuenca del río Colca y la relavera Madrigal (Villacorta J., 2013)

3.2 Muestreo de Suelo

3.2.1 Determinación del Tipo de Muestreo

Considerando los estudios preliminares realizados en la Relavera de la Mina Madrigal, donde se determina que los problemas actuales que afronta la zona son la generación de Drenaje Ácido de Roca y la migración de residuos sólidos provenientes de los relaves secos por acción eólica (reacciones químicas generadoras de acidez a profundidad) se estableció el tipo de muestreo para esta investigación.

El Muestreo de Identificación fue el idóneo en este caso ya que su objetivo es investigar la existencia de contaminación del suelo a través de, la obtención de muestras representativas con el fin de establecer si el suelo supera o no los Estándares de Calidad Ambiental para suelos.

3.2.2 Técnica de Muestreo:

En busca de obtener una muestra representativa, que permita caracterizar el suelo en estudio y así obtener una parte distintiva de este que presente las mismas características o propiedades del material en estudio, se elige una técnica de muestreo de acuerdo a los estudios anteriormente realizados en el área, condiciones edáficas, uso del suelo, etc.

Teniendo en cuenta lo citado en el Manual Práctico de Investigación de la Contaminación del Suelo⁵, se estableció la Distribución Sistemática al Azar como la técnica a utilizar para obtener la cantidad de relave necesaria para su estudio tanto químico como físico.

⁵ Sociedad Pública de Gestión Ambiental del Gobierno Vasco - IHOBE, *“Manual Práctico para la investigación de la contaminación del suelo”*.

a. Descripción del Proceso de Muestreo:

Una vez identificada el área de estudio, se despejó el terreno de cualquier tipo de objeto o residuo que pueda interferir con el proceso.

De acuerdo a la técnica elegida para el muestreo (Distribución Sistemática al Azar) se formó una cuadrícula de seis metros de largo por seis metros de ancho, colocando estacas cada dos metros.

Una vez ubicadas las estacas, estas fueron unidas con pavilo para poder enmarcar la cuadrícula y así evitar confusiones.

Teniendo sub áreas de superficie similar, se aplicó un sistema aleatorio de localización de los puntos de muestreo. Para el análisis químico de la muestra se tomó de cada una de las cuadrículas aproximadamente entre 0.5 – 1 kilogramo de relave. Para el análisis físico y considerando la cantidad de material que se necesitaría para la elaboración de probetas se tomó aproximadamente 10 kilos de relave de cada una de las cuadrículas obteniendo en total 120 kilogramos de relave.



Ilustración 4: Cuadrícula para muestreo

b. Obtención de muestra para análisis en laboratorio químico:

El volumen de muestra extraído de la cuadrícula requirió ser sometido a una partición, para así reducirlo y obtener una muestra compuesta representativa. Para ello, se mezcló la muestra extraída (aproximadamente 9 kilogramos) y luego fue cuarteada como se muestra en la ilustración. Fue necesario repetir este procedimiento en dos ocasiones.



Ilustración 5: Partición de muestras (LfUMerkblatt, 2010, Alemania)

Luego del cuarteo de la muestra, se pesaron 500 gramos de relave que fueron colocados en una bolsa plástica con cierre hermético. Se repitió este proceso se repitió en cinco ocasiones, teniendo como resultado las muestras R-1, R-2, R-3, R-4 y R-5.

Para el análisis en el laboratorio químico se necesitó 1 kilogramo de relave, por lo que se eligió las muestras R-2 y R-5 para que sean sometidas a estudio.

Para un correcto almacenamiento y transporte de las muestras, estas fueron trasladadas en un cooler a 4 °C, esta temperatura y el tipo de material en el que fueron transportadas (plástico con cierre hermético) son recomendados cuando se van a determinar propiedades que pueden verse afectadas por la actividad microbiológica.

3.3 Análisis del Tamaño de Partículas – Granulometría

3.3.1 Descripción del Proceso:

El análisis granulométrico es la determinación de los tamaños de las partículas de una cantidad de muestra de suelo, se emplea con otras propiedades para clasificarlo, determinar sus propiedades mecánicas y el cálculo de la abundancia de los correspondientes a cada uno de los tamaños previstos en una escala granulométrica.

3.3.2 Determinación del tipo de suelo según la clasificación SUCS:

Para determinar el tipo de suelo que representa la muestra de relave de acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) fue necesario emplear las tablas con los resultados obtenidos durante los ensayos de granulometría y determinar las siguientes variables:

- D_{10} : Diámetro de abertura del tamiz por el cual pasa el 10% de material.
- D_{30} : Diámetro de abertura del tamiz por el cual pasa el 30% de material.
- D_{60} : Diámetro de abertura del tamiz por el cual pasa el 60% de material.

Para determinar dichos diámetros se utiliza la siguiente fórmula:

$$D_x = \left[\frac{D_2 - D_1}{\log_{\%2} - \log_{\%1}} \times \log_{\%x} - \log_{\%1} \right] + D_1$$

- Coeficiente de Uniformidad: Se utiliza para evaluar la uniformidad del tamaño de las partículas de un suelo y se expresa como la relación entre D_{60} y D_{10} en la siguiente fórmula:

$$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

- Coeficiente de curvatura: Refleja la curvatura de la curva granulométrica, los suelos bien graduados presentan valores de este coeficiente comprendidos entre 1 y 3; esta variable se define en la siguiente fórmula:

$$Cc = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \times D_{10}}$$

Considerando la fórmula descrita anteriormente para determinar los diámetros D10, D30 y D60 se utilizaron las tablas obtenidas para ambas pruebas y se obtuvo el tipo de suelo en estudio.

3.4 Humedad de la Muestra:

La importancia del contenido de agua que tiene un suelo representa junto con la cantidad de aire una de las características más importantes para explicar el comportamiento de este (especialmente en aquellos de textura más fina), como por ejemplo cambios de volumen, cohesión y estabilidad mecánica.

Para esta investigación, se determinó el contenido de humedad de la muestra mediante el método Speedy; este es un instrumento portátil y sencillo consistente en un tanque presurizado, una balanza y una maleta de transporte.

El principio de funcionamiento está basado en la reacción entre el agua y el Carburo de Calcio (CaC_2), que produce una cantidad de gas (Acetileno C_2H_2) directamente proporcional a la cantidad de agua presente en la muestra. El acetileno es el que marca el cambio de presión dentro del Speedy.

3.5 Densidad Seca Máxima:

La densidad seca máxima es la densidad de un suelo en el estado más denso que se puede obtener aplicando el ensayo normalizado y se determina mediante la compactación por vibrado.

La compactación se define como el proceso mecánico mediante el cual se disminuye la cantidad de vacíos en una masa de suelo, obligando a sus partículas a un contacto más cercano entre sí, es decir, a un aumento de la densidad de un material determinado.

Este ensayo tiene por finalidad determinar la relación humedad – densidad de un suelo compactado en un molde normalizado mediante un pisón de masa normalizada, en caída libre y con una energía específica de compactación.

El ensayo consiste en compactar en un molde de volumen conocido muestras de un mismo suelo, pero con distintas humedades y con la misma energía de compactación. Se deben registrar las densidades secas, graficando los resultados, donde el punto más alto de la curva representa la Densidad Seca Máxima y su proyección en la abscisa el contenido de humedad óptimo. [17]

3.6 Prueba de Resistencia:

Determinar la resistencia de las probetas fue fundamental para poder hallar el uso adecuado que tendrá este material. En base a los porcentajes de relave a utilizar se determinaron las cantidades exactas de agua y cemento que necesitaría el ensayo.

Este proceso tuvo un período de duración de 28 días, desde el vaciado en los moldes de las probetas hasta la última prueba de resistencia. La resistencia de las probetas fue medida a los 7, 14, 21 y 28 días luego de haber iniciado el proceso.

Las probetas tuvieron que permanecer a temperatura ambiente y sumergidas en agua durante la duración del ensayo, esto debido a que el agua favorece a la resistencia (proceso de curado).

Normas técnicas de referencia para evaluar la resistencia:

- Norma Técnica de Edificación: E.060 Concreto Armado – Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento:

Esta Norma fija los requisitos y exigencias mínimas para el análisis, el diseño, los materiales, la construcción, el control de calidad y la supervisión de estructuras de concreto armado, pre esforzado y simple.

- Norma ACI 318: Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural (ACI 318S-05) y Comentario (ACI 318SR-05) – American Concrete Institute:

Este reglamento proporciona los requisitos mínimos para el diseño y la construcción de elementos de concreto estructural de cualquier estructura construida según los requisitos del reglamento general de construcción legalmente adoptado. En lugares en donde no se cuente con un reglamento de construcción legalmente adoptado, este reglamento define las disposiciones mínimas aceptables en la práctica del diseño y la construcción.

Ensayo de Compresión Simple:

- American Society for Testing and Materials – ASTM
ASTM C39 / C39M – 16: Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens
- Norma Técnica Peruana
NTP 339.034 Hormigón (Concreto). Método de ensayo normalizado para la determinación de la resistencia a la compresión del concreto, en muestras cilíndricas.

3.7 Determinación de la Porosidad

Se puede definir esta propiedad como “aquellos sistemas de vacíos presentes en la estructura interna del concreto endurecido, los cuales no contienen materia sólida”. Esta característica es la que condiciona el comportamiento posterior del concreto para absorber líquidos y su capacidad de flujo a través de él, siendo por lo tanto un factor de vital importancia para el estudio de la durabilidad del concreto. La porosidad depende a su vez de la relación agua – cemento, de la calidad del cemento y de los agregados.

Se debe tener en cuenta que el concreto es un material inherentemente poroso, debido a la formación de canales capilares como consecuencia de la evaporación del agua durante el proceso de fraguado, a la porosidad del agregado y a la reducción gradual de volumen de pasta cuando ocurre la reacción química entre el agua y el cemento.

La porosidad se puede clasificar en dos tipos: porosidad cerrada y porosidad abierta. La porosidad cerrada se considera como los poros que no se comunican entre ellos ni con el exterior y la porosidad abierta como aquellos que se comunican entre ellos y con el medio, permitiendo la absorción y transferencia de fluidos o intercambio de sustancias disueltas entre el interior del concreto y el ambiente circundante. [18]

IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1.1 Procedimiento de Análisis del Tamaño de Partículas - Granulometría

a. Equipos y Materiales:

- Balanza de 2.5 kg.
- Bandejas, cepillo y brocha.
- Tamizador mecánico.
- Serie de Mallas:

Tabla 1. Serie de Mallas estandarizadas

N°	Tamiz (mm)
3/8"	9.5
1/4"	6.3
4	4.75
8	2.36
10	2
20	0.85
30	0.6
40	0.425
50	0.3
60	0.25
80	0.18
100	0.15
200	0.075
400	0.038

Fuente: Elaboración Propia

b. Descripción del Proceso:

- Para realizar el ensayo fue necesario pesar 6 kg de relave en la balanza electrónica. Una vez realizado el pesado, se colocó el relave en una bandeja.

- Para obtener una muestra representativa se utilizó el método del cuarteo en tres ocasiones, obteniendo 500 gramos de relave, los cuales fueron llevados al tamizador mecánico para proceder con el ensayo.
- Se dispuso de las mallas de mayor a menor, colocando al final un receptáculo denominado fondo. Una vez colocadas todas las mallas en el tamizador mecánico se realizó el ensayo en un periodo de 10 minutos.



Ilustración 6: Tamizador mecánico

- Luego de haber realizado el ensayo en el tamizador, las 14 mallas deben ser pesadas. Para esto, se toma la primera malla comenzando de la parte superior y se agita, luego se pesó la cantidad de muestra que queda retenida en la malla. La cantidad de relave que cae al agitar la malla debe ser colocada en la siguiente. Se debe repetir este proceso hasta última malla (38 micras).

- Este proceso se realizó en dos ocasiones para comparar los pesos retenidos en las mallas en ambas oportunidades.

c. Procedimiento de Cálculo:

Una vez obtenidos los pesos retenidos en los tamices, se procede a calcular el porcentaje retenido por cada tamiz como sigue:

$$\% \text{ Retenido} = \frac{W_{\text{tamiz}}}{W_1} \times 100$$

Donde:

W_{tamiz} : Peso retenido en cada tamiz

W_1 : Peso de la muestra total

$$\% \text{ Que pasa en cada tamiz} = 100 - \% \text{ Retenido}$$

d. Resultados:

Luego de realizar en dos ocasiones el ensayo en el tamizador mecánico y el posterior pesaje de los pesos retenidos se obtuvieron los siguientes resultados:

Ensayo N° 1:

Tabla 2. Análisis granulométrico - Ensayo N° 1

N° malla	Tamiz (mm)	Peso retenido I (gr)	% Peso	% Acumulado Retenido	% Acumulado Pasante
3/8"	9.5	12.3	2.50	2.50	97.50
1/4"	6.3	15	3.05	5.55	94.45
4	4.75	13.5	2.74	8.29	91.71
8	2.36	44.8	9.11	17.40	82.60
10	2	19.3	3.92	21.33	78.67
20	0.85	295.3	60.03	81.36	18.64
30	0.6	4.3	0.87	82.23	17.77
40	0.425	16.5	3.35	85.59	14.41
50	0.3	25.9	5.27	90.85	9.15
60	0.25	13.3	2.70	93.56	6.44
80	0.18	17.5	3.56	97.11	2.89
100	0.15	6.4	1.30	98.41	1.59
200	0.075	6.8	1.38	99.80	0.20
400	0.038	1	0.20	100.00	0.00
		491.9			

Fuente: Elaboración Propia

Ensayo N° 2:

Tabla 3. Análisis granulométrico - Ensayo N° 2

N° malla	Tamiz (mm)	Peso retenido I (gr)	% Peso	% Acumulado Retenido	% Acumulado Pasante
3/8"	9.5	12.7	2.58	2.58	97.42
1/4"	6.3	15.7	3.19	5.78	94.22
4	4.75	13.7	2.79	8.56	91.44
8	2.36	30.4	6.18	14.75	85.25
10	2	20.1	4.09	18.84	81.16
20	0.85	377.1	76.71	95.55	4.45
30	0.6	2.6	0.53	96.07	3.93
40	0.425	4.8	0.98	97.05	2.95
50	0.3	4.8	0.98	98.03	1.97
60	0.25	2.9	0.59	98.62	1.38
80	0.18	2.9	0.59	99.21	0.79
100	0.15	1	0.20	99.41	0.59
200	0.075	2.4	0.49	99.90	0.10
400	0.038	0.5	0.10	100.00	0.00
		491.6			

Fuente: Elaboración Propia

Las tablas N° 2 y 3 para ambos ensayos representan los valores obtenidos en cada uno de los tamices y el peso retenido en ellos, valores con los que se calcula el % Peso, el % Acumulado retenido en cada malla y el % pasante por malla, valor con el que se determina la pérdida durante el procedimiento, la cual al no superar el 4 % en la malla N° 200 valida el procedimiento.

e. Curva Granulométrica:

Tomando en cuenta el peso total y los pesos retenidos, se procede a realizar la curva granulométrica, con los valores de porcentaje retenido que cada diámetro ha obtenido. La curva granulométrica permite visualizar la tendencia homogénea o heterogénea que tienen los tamaños de grano (diámetros) de las partículas.

Se muestra a continuación las curvas granulométricas correspondientes a los dos ensayos:

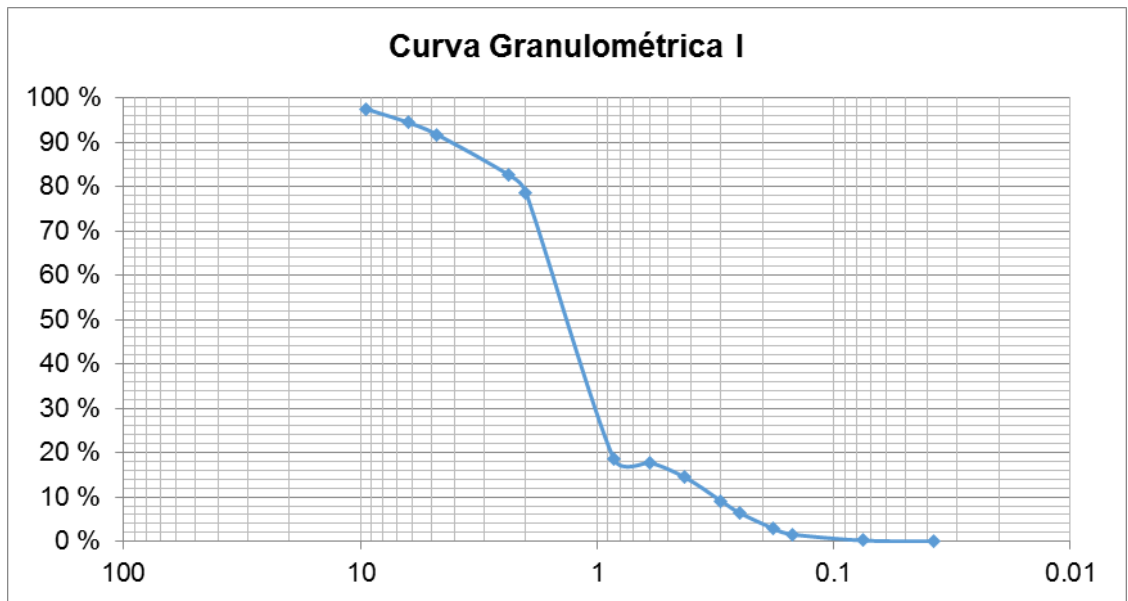


Gráfico 1. Curva granulométrica - Ensayo N° 1

Fuente: Elaboración propia

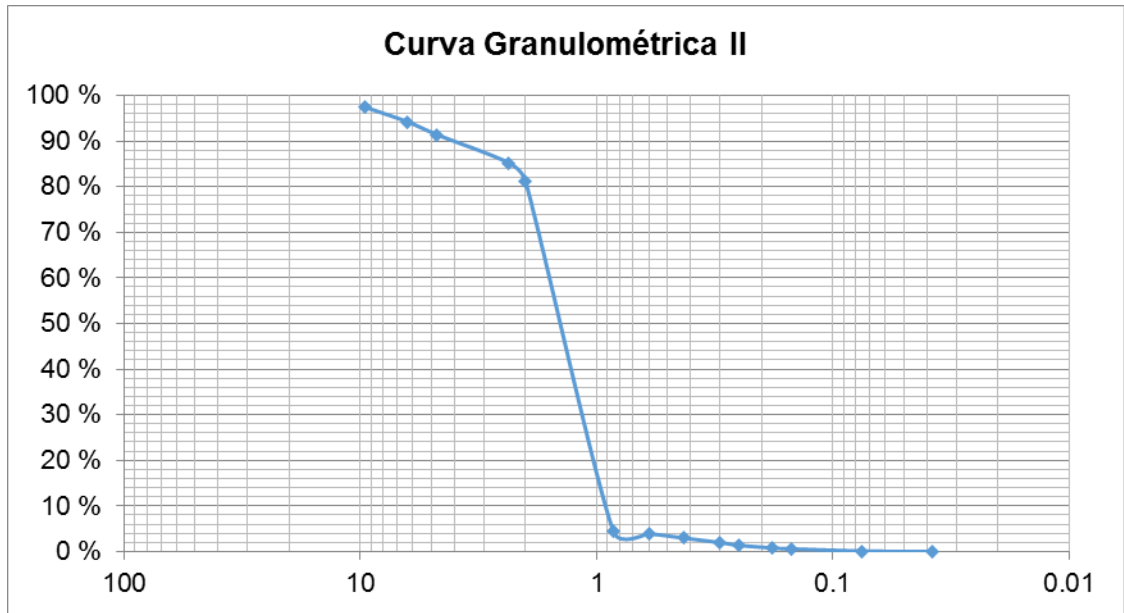


Gráfico 2. Curva granulométrica - Ensayo N° 2

Fuente: Elaboración propia

Para interpretar las curvas granulométricas representadas en los gráficos N° 1 y 2 es necesario tener en cuenta que los porcentajes de muestra que pasa por cada uno de los tamices, se encuentran en el eje de las ordenadas y a una escala aritmética, mientras que el orden de abertura del tamiz se encuentra en el eje de las abscisas y a una escala logarítmica.

El gráfico N° 1 muestra que se tuvo un % de peso retenido del 60.03% en la malla N° 20 (Tamiz 0.85 mm), cantidad que marca una granulometría discontinua con una curvatura irregular, la cual es propia de suelos mal graduados. De igual forma, el gráfico N° 2 muestra una curvatura similar conforme a suelos mal graduados, con un % de peso retenido del 76.71% en la malla N° 20 (Tamiz 0.85 mm).

f. **Determinación del tipo de suelo según la clasificación SUCS:**

Ensayo N° 1:

En base a la fórmula:

$$D_x = \left[\frac{D_2 - D_1}{\log_{\%2} - \log_{\%1}} \times \log_{\%x} - \log_{\%1} \right] + D_1$$

Se toma la tabla N°1 para obtener las variables D_{10} , D_{30} y D_{60} , para ello se trabaja cada porcentaje individualmente:

D_{10} :

Trabajando con la columna correspondiente al %Acumulado Pasante se determina aquellos dos números que comprenden al 10%; a partir de ello se traza una línea que atraviese la columna del Tamiz y en se fijan el D1 y D2 (comenzando de arriba abajo) de la siguiente manera:

Tabla 4. Determinación D_{10} - Ensayo N° 1

N° malla	Tamiz (mm)	Peso retenido l (gr)	% Peso	% Acumulado Retenido	% Acumulado Pasante
3/8"	9.5	12.3	2.50	2.50	97.50
1/4"	6.3	15	3.05	5.55	94.45
4	4.75	13.5	2.74	8.29	91.71
8	2.36	44.8	9.11	17.40	82.60
10	2	19.3	3.92	21.33	78.67
20	0.85	295.3	60.03	81.36	18.64
30	0.6	4.3	0.87	82.23	17.77
40	D1 0.425	16.5	3.35	85.59	14.41 %1
50	D2 0.3	25.9	5.27	90.85	9.15 %2
60	0.25	13.3	2.70	93.56	6.44
80	0.18	17.5	3.56	97.11	2.89
100	0.15	6.4	1.30	98.41	1.59
200	0.075	6.8	1.38	99.80	0.20
400	0.038	1	0.20	100.00	0.00
		491.9 gr			

Fuente: Elaboración Propia

Reemplazando en la fórmula:

$$D_x = \left[\frac{D_2 - D_1}{\log_{\%2} - \log_{\%1}} \times \log_{\%x} - \log_{\%1} \right] + D_1$$

$$D_x = \left[\frac{0.3 - 0.425}{\log_{9.15} - \log_{14.41}} \times \log_{10} - \log_{14.41} \right] + 0.425$$

$$D_x = 0.3258$$

D₃₀:

Tabla 5. Determinación D30 - Ensayo N° 1

N° malla	Tamiz (mm)	Peso retenido I (gr)	% Peso	% Acumulado Retenido	% Acumulado Pasante
3/8"	9.5	12.3	2.50	2.50	97.50
1/4"	6.3	15	3.05	5.55	94.45
4	4.75	13.5	2.74	8.29	91.71
8	2.36	44.8	9.11	17.40	82.60
10	D1 2	19.3	3.92	21.33	78.67 %1
20	D2 0.85	295.3	60.03	81.36	18.64 %2
30	0.6	4.3	0.87	82.23	17.77
40	0.425	16.5	3.35	85.59	14.41
50	0.3	25.9	5.27	90.85	9.15
60	0.25	13.3	2.70	93.56	6.44
80	0.18	17.5	3.56	97.11	2.89
100	0.15	6.4	1.30	98.41	1.59
200	0.075	6.8	1.38	99.80	0.20
400	0.038	1	0.20	100.00	0.00
		491.9 gr			

Fuente: Elaboración Propia

Reemplazando en la fórmula:

$$D_x = \left[\frac{D_2 - D_1}{\log_{\%2} - \log_{\%1}} \times \log_{\%x} - \log_{\%1} \right] + D_1$$

$$D_x = \left[\frac{0.85 - 2}{\log_{18.64} - \log_{78.67}} \times \log_{30} - \log_{78.67} \right] + 2$$

$$D_x = 1.23$$

D₆₀:

Tabla 6. Determinación D60 - Ensayo N° 1

N° malla	Tamiz (mm)	Peso retenido I (gr)	% Peso	% Acumulado Retenido	% Acumulado Pasante
3/8"	9.5	12.3	2.50	2.50	97.50
1/4"	6.3	15	3.05	5.55	94.45
4	4.75	13.5	2.74	8.29	91.71
8	2.36	44.8	9.11	17.40	82.60
10	D1 2	19.3	3.92	21.33	78.67 %1
20	D2 0.85	295.3	60.03	81.36	18.64 %2
30	0.6	4.3	0.87	82.23	17.77
40	0.425	16.5	3.35	85.59	14.41
50	0.3	25.9	5.27	90.85	9.15
60	0.25	13.3	2.70	93.56	6.44
80	0.18	17.5	3.56	97.11	2.89
100	0.15	6.4	1.30	98.41	1.59
200	0.075	6.8	1.38	99.80	0.20
400	0.038	1	0.20	100.00	0.00
		491.9 gr			

Fuente: Elaboración Propia

Reemplazando en la fórmula:

$$D_x = \left[\frac{D_2 - D_1}{\log_{\%2} - \log_{\%1}} \times \log_{\%x} - \log_{\%1} \right] + D_1$$

$$D_x = \left[\frac{0.85 - 2}{\log_{18.64} - \log_{78.67}} \times \log_{60} - \log_{78.67} \right] + 2$$

$$D_x = 1.78$$

Con los tres resultados, reemplazamos en las fórmulas del Coeficiente de Uniformidad y Coeficiente de Curvatura:

$$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

$$Cu = \frac{1.78}{0.3258}$$

$$Cu = 5.46$$

$$Cc = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \times D_{10}}$$

$$Cc = \frac{1.23^2}{1.78 \times 0.3258}$$

$$Cc = 2.6087$$

De acuerdo al Sistema de Clasificación de Suelos Unificado, los resultados obtenidos corresponden a arenas mal graduadas (SP) ya que si bien su Coeficiente de Curvatura comprende un valor de entre 1 y 3, el resultado del Coeficiente de Uniformidad no llega al valor de 6, ambas condiciones deben ser cumplidas para poder definir a este tipo de suelo como una arena bien graduada (SW).

Ensayo N° 2:

En base a la fórmula:

$$D_x = \left[\frac{D_2 - D_1}{\log_{\%2} - \log_{\%1}} \times \log_{\%x} - \log_{\%1} \right] + D_1$$

Se toma la tabla N°2 para obtener las variables D_{10} , D_{30} y D_{60} , repetimos los pasos descritos para el Ensayo N° 1:

D₁₀:

Tabla 7. Determinación D₁₀ - Ensayo N° 2

N° malla	Tamiz (mm)	Peso retenido I (gr)	% Peso	% Acumulado Retenido	% Acumulado Pasante
3/8"	9.5	12.7	2.58	2.58	97.42
1/4"	6.3	15.7	3.19	5.78	94.22
4	4.75	13.7	2.79	8.56	91.44
8	2.36	30.4	6.18	14.75	85.25
10	D1 2	20.1	4.09	18.84	81.16 %1
20	D2 0.85	377.1	76.71	95.55	4.45 %2
30	0.6	2.6	0.53	96.07	3.93
40	0.425	4.8	0.98	97.05	2.95
50	0.3	4.8	0.98	98.03	1.97
60	0.25	2.9	0.59	98.62	1.38
80	0.18	2.9	0.59	99.21	0.79
100	0.15	1	0.20	99.41	0.59
200	0.075	2.4	0.49	99.90	0.10
400	0.038	0.5	0.10	100.00	0.00
		491.6 gr			

Fuente: Elaboración Propia

Reemplazando en la fórmula:

$$D_x = \left[\frac{D_2 - D_1}{\log_{\%2} - \log_{\%1}} \times \log_{\%x} - \log_{\%1} \right] + D_1$$

$$D_x = \left[\frac{0.85 - 2}{\log_{4.45} - \log_{81.16}} \times \log_{10} - \log_{81.16} \right] + 2$$

$$D_x = 1.17$$

D₃₀:

Tabla 8. Determinación D30 - Ensayo N° 2

N° malla	Tamiz (mm)	Peso retenido I (gr)	% Peso	% Acumulado Retenido	% Acumulado Pasante
3/8"	9.5	12.7	2.58	2.58	97.42
1/4"	6.3	15.7	3.19	5.78	94.22
4	4.75	13.7	2.79	8.56	91.44
8	2.36	30.4	6.18	14.75	85.25
10	D1 2	20.1	4.09	18.84	81.16 %1
20	D2 0.85	377.1	76.71	95.55	4.45 %2
30	0.6	2.6	0.53	96.07	3.93
40	0.425	4.8	0.98	97.05	2.95
50	0.3	4.8	0.98	98.03	1.97
60	0.25	2.9	0.59	98.62	1.38
80	0.18	2.9	0.59	99.21	0.79
100	0.15	1	0.20	99.41	0.59
200	0.075	2.4	0.49	99.90	0.10
400	0.038	0.5	0.10	100.00	0.00
		491.6 gr			

Fuente: Elaboración Propia

Reemplazando en la fórmula:

$$D_x = \left[\frac{D_2 - D_1}{\log_{\%2} - \log_{\%1}} \times \log_{\%x} - \log_{\%1} \right] + D_1$$

$$D_x = \left[\frac{0.85 - 2}{\log_{4.45} - \log_{81.16}} \times \log_{30} - \log_{81.16} \right] + 2$$

$$D_x = 1.60$$

D₆₀:

Tabla 9. Determinación D₆₀ - Ensayo N° 2

N° malla	Tamiz (mm)	Peso retenido I (gr)	% Peso	% Acumulado Retenido	% Acumulado Pasante
3/8"	9.5	12.7	2.58	2.58	97.42
1/4"	6.3	15.7	3.19	5.78	94.22
4	4.75	13.7	2.79	8.56	91.44
8	2.36	30.4	6.18	14.75	85.25
10	D1 2	20.1	4.09	18.84	81.16 %1
20	D2 0.85	377.1	76.71	95.55	4.45 %2
30	0.6	2.6	0.53	96.07	3.93
40	0.425	4.8	0.98	97.05	2.95
50	0.3	4.8	0.98	98.03	1.97
60	0.25	2.9	0.59	98.62	1.38
80	0.18	2.9	0.59	99.21	0.79
100	0.15	1	0.20	99.41	0.59
200	0.075	2.4	0.49	99.90	0.10
400	0.038	0.5	0.10	100.00	0.00
		491.6 gr			

Fuente: Elaboración Propia

Reemplazando en la fórmula:

$$D_x = \left[\frac{D_2 - D_1}{\log_{\%2} - \log_{\%1}} \times \log_{\%x} - \log_{\%1} \right] + D_1$$

$$D_x = \left[\frac{0.85 - 2}{\log_{4.45} - \log_{81.16}} \times \log_{60} - \log_{81.16} \right] + 2$$

$$D_x = 1.88$$

Con los tres resultados, reemplazamos en las fórmulas del Coeficiente de Uniformidad y Coeficiente de Curvatura:

$$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}}$$

$$Cu = \frac{1.88}{1.17}$$

$$Cu = 1.61$$

$$Cc = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \times D_{10}}$$

$$Cc = \frac{1.60^2}{1.88 \times 1.17}$$

$$Cc = 1.16$$

De acuerdo al Sistema de Clasificación de Suelos Unificado, los resultados obtenidos corresponden a arenas mal graduadas (SP) ya que si bien su Coeficiente de Curvatura comprende un valor de entre 1 y 3, el resultado del Coeficiente de Uniformidad no llega al valor de 6, ambas condiciones deben ser cumplidas para poder definir a este tipo de suelo como una arena bien graduada (SW).

4.1.2 Procedimiento de determinación de Humedad de la muestra

a. Equipos y Materiales:

- Speedy.
- Carburo de Calcio.
- Balanza electrónica.

b. Descripción del Proceso:

- Se preparó y peso 20 gramos de relave, y se añadió la muestra al Speedy.

- Para una correcta realización del ensayo se necesitaron 26 gramos de Carburo de Calcio (CaC_2), los cuales fueron agregados al Speedy junto con dos billas de acero que forman parte del equipo.
- Se cerró el Speedy herméticamente y colocándolo en posición vertical se empezó a rotarlo en círculos para que las billas de acero empiecen a rotar. Fue necesario realizar esta operación durante diez segundos y luego dejarlo en reposo durante veinte segundos.
- El contenido de humedad (%) de la muestra será marcado en el dial.
- Finalmente, se alivia la presión lentamente y se vacía el contenido.



Ilustración 7: Determinación de la Humedad mediante el Speedy

c. Procedimiento de Cálculo:

La fórmula para determinar la humedad de la muestra es:

$$\text{Contenido de humedad} = 1.0991 \times \text{lectura \%} + 2.7286$$

$$\text{Contenido de humedad} = 1.0991 \times 8.9 \% + 2.7286$$

$$\text{Contenido de humedad} = 12.51 \%$$

4.1.3 Procedimiento de determinación de la Densidad Seca Máxima

a. Equipos y Materiales:

- Molde del proctor estándar para hallar peso específico.
- Balanza con capacidad de 10 kg.
- Probeta 1000 ml.
- Bandeja.
- Pisón de Proctor.
- Horno capaz de mantener temperaturas uniformes y constantes hasta $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$.

b. Preparación de la Muestra:

- Para realizar este ensayo se pesaron 3 Kilogramos de relave en la balanza, retirando cualquier roca de tamaño considerable.
- Se coloca el material en una bandeja y se pesa el molde en el cual se realizará el ensayo obteniendo los siguientes resultados:
 - Peso de la base: 1.665 kg.
 - Peso del collarín: 892.5 kg.
 - Peso del molde + base: 3.368 kg.
- La densidad del molde utilizado en el ensayo es de 943.3 cm^3 .



Ilustración 8. Proctor Estándar

c. Procedimiento:

- Una vez que se tiene preparada la cantidad de relave necesaria se realizarán diversas pruebas con el molde y el pistón del proctor.
- Para el primer ensayo se colocarán tres capas de relave en el molde, considerando que la segunda capa debe estar entre el collarín y el molde, luego enrasar.
- Una vez listo el molde se utilizó el pistón del proctor para dar 25 golpes al material, luego retirar el collarín y enrasar.



Ilustración 9. Proctor estándar y pistón

- Se pesa el molde con el material y se anota la cantidad para luego calcular cada una de las densidades.
- Se desarma el molde y de la base del bloque obtenido se retira una cantidad suficiente como para pesar en la balanza 30 gramos, llevar al horno durante 10 minutos.
- Este procedimiento se repite agregando 60 mililitros en cada uno de los ensayos hasta que el material rebasa el molde cuando se golpee con el pistón del proctor, para esta investigación se realizaron 7 ensayos antes de que el material ya no pueda ser golpeado.

d. Resultados:

Los pesos obtenidos en cada ensayo con el pistón del proctor fueron:

Tabla 10. Peso en gramos de cada muestra

Ensayo	Peso en gramos
Peso 1	4815
Peso 2	4944.1
Peso 3	4987.4
Peso 4	5047.5
Peso 5	5200.5
Peso 6	5186.2
Peso 7	5153.2

Fuente: Elaboración Propia

Los resultados de las siete muestras llevadas al horno fueron:

Tabla 11. Pesos de las muestras luego de llevarlas al horno

MUESTRA	PESO INICIAL (gr)	PESO MOLDE (gr)	PESO FINAL(gr)
M-1	42.1	13	29.1
M-2	39.2	10.5	28.7
M-3	42.5	14.4	28.1
M-4	41.2	14.4	26.8
M-5	40.4	14.4	26
M-6	39.4	14.4	25
M-7	37.7	13.2	24.5

Fuente: Elaboración Propia

La tabla N° 10 muestra los pesos obtenidos para las siete muestras en la primera etapa del ensayo, la cual consistió en la determinación del peso total del material dentro del proctor estándar luego de haber sido golpeado con el pisón, con una energía de compactación constante.

La Tabla N° 11 muestra los pesos iniciales obtenidos luego de haber sacado 30 g de cada muestra y llevarlas al horno; retirando el peso del molde, se obtiene el peso final de la muestra luego de ser sometida al calor.

e. Determinación de Densidad y Peso Específico para cada muestra:

Tabla 12. Determinación de la densidad y peso específico

A1	Peso del molde:	3368 gramos
	Peso proctor:	4815 gramos
	PESO A1	1447 gramos
	Volumen del molde:	943.3 cm ³
	Densidad A1:	1.533976466 gramos/cm ³
	W Peso específico:	3.092783505 %

A2	Peso del molde:	3368 gramos
	Peso proctor:	4944.1 gramos
	PESO A2	1576.1 gramos
	Volumen del molde:	943.3 cm ³
	Densidad A2:	1.670836425 gramos/cm ³
	W Peso específico:	4.529616725 %

A3	Peso del molde:	3368 gramos
	Peso proctor:	4987.4 gramos
	PESO A3	1619.4 gramos
	Volumen del molde:	943.3 cm ³
	Densidad A3:	1.716739107 gramos/cm ³
	W Peso específico:	6.761565836 %

	Peso del molde:	3368 gramos
	Peso proctor:	5047.5 gramos
	PESO A4	1679.5 gramos
A4	Volumen del molde:	943.3 cm ³
	Densidad A4:	1.780451606 gramos/cm ³
	W Peso específico:	11.94029851 %

	Peso del molde:	3368 gramos
	Peso proctor:	5200.5 gramos
	PESO A5	1832.5 gramos
A5	Volumen del molde:	943.3 cm ³
	Densidad A5:	1.94264815 gramos/cm ³
	W Peso específico:	15.38461538 %

	Peso del molde:	3368 gramos
	Peso proctor:	5168.2 gramos
	PESO A6	1800.2 gramos
A6	Volumen del molde:	943.3 cm ³
	Densidad A6:	1.908406657 gramos/cm ³
	W Peso específico:	20 %

	Peso del molde:	3368 gramos
	Peso proctor:	5153.2 gramos
	PESO A7	1785.2 gramos
A7	Volumen del molde:	943.3 cm ³
	Densidad A7:	1.892505036 gramos/cm ³
	W Peso específico:	22.44897959 %

Fuente: Elaboración Propia

Los valores obtenidos se determinaron de la siguiente manera:

- Se restó el peso del proctor estándar con cada uno de los pesos obtenidos luego de secar las muestras en el horno.
- Se halló la densidad de cada una de las muestras utilizando la fórmula:

$$Densidad = \frac{Masa}{Volumen}$$

- Para determinar el Peso específico de cada muestra se utilizó la siguiente fórmula:

$$W \text{ Peso Específico} = \frac{\text{Peso inicial} - \text{Peso final}}{\text{Peso final}} \times 100$$

Donde:

- Peso inicial: 30 gramos pesados inicialmente para cada muestra.
- Peso final: peso obtenido para cada muestra luego de llevarlas al horno.

f. Determinación de Densidad Seca Máxima para cada muestra:

Tabla 13. Densidad Seca Máxima

A1	Densidad A1:	1.53397647 gramos/cm ³
	%A1:	3.09278351 %
	Densidad seca máxima A1:	1.48795717

A2	Densidad A2:	1.67083643 gramos/cm ³
	%A2:	4.52961672 %
	Densidad seca máxima A2:	1.59843351

A3	Densidad A3:	1.71673911 gramos/cm ³
	%A3:	6.76156584 %
	Densidad seca máxima A3:	1.6080123

A4	Densidad A4:	1.78045161 gramos/cm ³
	%A4:	11.9402985 %
	Densidad seca máxima A4:	1.59053677

A5	Densidad A5:	1.94264815 gramos/cm ³
	%A5:	15.3846154 %
	Densidad seca máxima A5:	1.6836284

A6	Densidad A6:	1.90840666 gramos/cm ³
	%A6:	20 %
	Densidad seca máxima A6:	1.59033888

A7	Densidad A7:	1.89250504 gramos/cm ³
	%A7:	22.4489796 %
	Densidad seca máxima A7:	1.54554578

Fuente: Elaboración Propia

Los resultados fueron obtenidos mediante:

- Teniendo en cuenta los valores hallados en la Tabla 13 para la densidad y peso específico, se aplicó la siguiente fórmula para determinar la densidad seca máxima de cada muestra:

$$\text{Densidad Seca Máxima} = \frac{\text{Densidad}}{(1 + \text{Peso Específico})}$$

g. Densidad Seca Máxima y Contenido de Humedad Óptimo:

Tabla 14. Densidad Seca Máxima y Contenido de Humedad Óptimo

Muestra N°	γ_D	W%
1	1.49	3.09
2	1.60	4.53
3	1.61	6.76
4	1.59	11.94
5	1.68	15.38
6	1.59	20.00
7	1.55	22.45

Fuente: Elaboración Propia

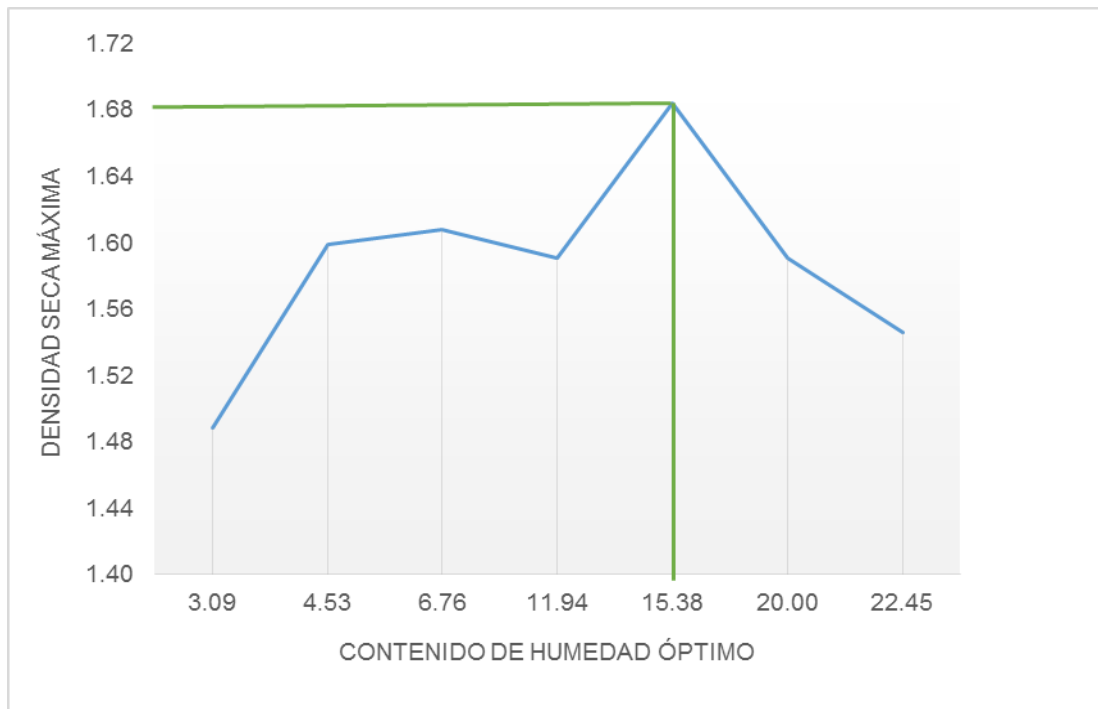


Gráfico 3. Densidad Seca Máxima y Contenido de Humedad Óptimo

Fuente: Elaboración Propia

En la Tabla N° 14 se relacionan los siete datos obtenidos para Densidad Seca Máxima y el Contenido de Humedad Óptimo, se puede observar como los valores van en estala creciente hasta la muestra ensayada N° 5 y luego decrecen, este valor máximo alcanzado indica los valores óptimos obtenidos en el ensayo.

Para interpretar la Gráfica N° 3 debemos tener en cuenta que en la compactación de suelos, la humedad juega un papel decisivo: mientras que un suelo seco necesita una determinada energía de compactación para vencer los rozamientos internos entre sus partículas, el mismo suelo ligeramente húmedo precisará un menor esfuerzo, ya que el agua se comporta como un agente lubricante formando una película alrededor de los granos y disminuyendo la fricción entre ellos. Al haber añadido agua al suelo (en este caso relave), llegó un momento en que esta ocupó la totalidad de los espacios en el mismo. Este hecho acarrió a un

aumento del volumen y una mayor dificultad para evacuarlo del suelo, por lo que su compacidad disminuyó. [19]

De lo expuesto, se concluye que existió una humedad óptima (15.38%) con la que se obtuvo una compacidad máxima (1.68 gr/cm^3), para una misma energía de compactación.

4.1.4 Ensayo de determinación de Resistencia

a. Equipos y Materiales:

- Martillo de Schmidt.
- Balanza electrónica.
- Bandejas de diversos tamaños.
- Tubería PVC SAP 4”.
- Varilla de hierro de ½”.
- 1 Bolsa de Cemento Portland tipo IP.
- 2 Metros de Plástico.
- Cajas de madera.
- Brochas de diversos tamaños.
- ½ Galón de Petróleo.

b. Preparación de las Probetas:

- Para la realización del ensayo y teniendo en cuenta la cantidad de material disponible, se consideró que el tamaño ideal para las probetas sería de 4 x 8 pulgadas (100 x 200 mm), estas son más pequeñas que las usadas comúnmente en la industria (6 x 12 pulgadas) y tienden a ser más fáciles de elaborar y manipular en el laboratorio. Ambos tamaños son normalizados.
- Debido al costo que implicaría el mandar a hacer moldes de hierro, considerando la cantidad de muestras requeridas, fue que se vio por conveniente hallar un material que pueda ser impermeable y que

resista el proceso de curado del cemento; es por ello que de una tubería de PVC tipo SAP de dos metros de largo se pudo obtener 12 moldes.

- A fin de conseguir que las probetas puedan mantenerse estables e impermeables durante el proceso de vaciado y posterior curado, es que se acondicionaron cajas de madera, previamente forradas con plástico, para que en cada una de ellas puedan entrar 4 moldes; estos fueron asegurados con tiras de madera para evitar movimientos durante el proceso. Las paredes interiores de los moldes de PVC fueron humedecidas con petróleo para garantizar que el desmolde de las probetas sea más rápido y se evite que alguna de ellas pueda salir dañada.



Ilustración 10. Preparación de las probetas

c. Diseño experimental:

Para establecer el diseño experimental de la determinación de la resistencia, fue necesario partir de dos condiciones:

- Para obtener 1 m³ de concreto de calidad de $f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$ se necesitan 10 bolsas de cemento (cada una con un peso de 42.5 Kg), entonces para 1 m³ de concreto necesitamos 425 Kg de cemento. Se

halló la cantidad de material (definido en esta investigación con la letra griega Theta – θ) de acuerdo al volumen de la probeta normalizada de 4" x 8".

Habiendo establecido que la resistencia especificada a la compresión del concreto será igual a $f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$, se determina que esa es la resistencia ideal que las probetas deben alcanzar. Se define este valor de acuerdo a lo establecido en la Norma Técnica de Edificación E.060 para construcciones de elementos estructurales (columnas, vigas, lozas de piso en plantas industriales).

Si se hubiera definido un valor menor para f'_c la cantidad de relave a emplear en los ensayos hubiera sido mayor, sin embargo ello implicaría obtener resistencias que podrían no haber alcanzado los valores de resistencia mínimos establecidos en la normativa. El caso opuesto, habiendo definido un valor mayor para f'_c también hubiera perjudicado la investigación, ya que el emplear una mayor cantidad de cemento para la elaboración de probetas, significaría desestimar el fin mayor de este estudio, que es emplear cantidades de relave significativas en la elaboración de concreto.

- Se determina el peso específico del relave de la siguiente manera:

Teniendo en cuenta que el peso específico (γ) es la relación entre el peso de una sustancia y su volumen, se consideraron los pesos específicos conocidos del cemento y agua:

$$\gamma_{\text{Cemento}} = 2850 \text{ kg/m}^3$$

$$\gamma_{\text{agua}} = 1000 \text{ kg/m}^3$$

Llenamos un Proctor Estándar con 1242.33 gramos de relave, cantidad necesaria para abarcar por completo el volumen del Proctor (943 cm³) y se enrasa.

$$\gamma_{Relave} = \frac{Peso}{Volumen}$$

$$\gamma_{Relave} = \frac{1242.33 \text{ gr}}{943 \text{ cm}^3}$$

$$\gamma_{Relave} = 1.317 \text{ gr/cm}^3$$

Este valor representa el peso específico del relave suelto con el que se va a elaborar el material. Así como se expuso en la condición anterior, si este valor de relave hubiera sido mayor, los porcentajes trabajados habrían sido mayores igualmente, lo que podría haber implicado la obtención resultados de resistencia bajos. El caso opuesto, valores menores de peso específico de relave, representarían porcentajes menores, los cuales necesitarían mayor cantidad de cemento.

Se concluye entonces, que ambas condiciones, tanto la resistencia especificada a la compresión del concreto y el peso específico del relave fueron fundamentales para determinar las cantidades de material y los porcentajes a trabajar, los cuales se establecieron de la siguiente manera:

d. Determinación de la cantidad de material:

Determinamos el volumen de una probeta estandarizada de 4" x 8":

$$Volumen_{probeta} = \frac{\pi(\emptyset Probeta)^2}{4} \times Altura_{probeta}$$

$$Volumen_{probeta} = \frac{3.1416(0.1016 \text{ m})^2}{4} \times 0.2032 \text{ m}$$

$$Volumen_{probeta} = 0.0016 \text{ m}^3$$

Siendo θ la cantidad de cantidad de material a hallar en base al volumen de una probeta de 4" x 8":

$$\theta_{\text{Cemento}} = \text{Peso } 1\text{m}^3 \text{ de concreto} \times \text{Volumen de la probeta}$$

$$\theta_{\text{Cemento}} = 425 \text{ Kg} \times 0.0016 \text{ m}^3$$

$$\theta_{\text{Cemento}} = 0.68 \text{ Kg}$$

$$\theta_{\text{agua}}: \text{Relación } \frac{\text{Agua}}{\text{Cemento}} = 0.5$$

$$\frac{\text{Agua}}{0.68 \text{ Kg/m}^3} = 0.5$$

$$\theta_{\text{agua}}: \text{Agua} = 0.34 \text{ Kg}$$

\therefore Volumen de materiales de acuerdo a la probeta:

$$V_{\text{cemento}} = \frac{\theta_{\text{Cemento}}}{\gamma_{\text{Cemento}}}$$

$$V_{\text{cemento}} = \frac{0.68 \text{ Kg}}{2850 \text{ Kg/m}^3}$$

$$V_{\text{cemento}} = 0.00024 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{agua}} = \frac{\theta_{\text{Agua}}}{\gamma_{\text{Agua}}}$$

$$V_{\text{agua}} = \frac{0.34 \text{ Kg}}{1000 \text{ Kg/m}^3}$$

$$V_{\text{agua}} = 0.00034 \text{ m}^3$$

$$\sum V_{\text{cemento}} + V_{\text{agua}} = 0.00024 \text{ m}^3 + 0.00034 \text{ m}^3$$

$$\sum V_{\text{cemento}} + V_{\text{agua}} = 0.00058 \text{ m}^3$$

$$V_{\text{relave-probeta}} = V_{\text{probeta}} - V_{\text{cemento+agua}}$$

$$V_{relave-probeta} = 0.0016 \text{ m}^3 - 0.00058 \text{ m}^3$$

$$V_{relave-probeta} = 0.00102 \text{ m}^3$$

$$\theta_{Relave} = 0.00102 \text{ m}^3 \times 1317 \text{ Kg/m}^3$$

$$\theta_{Relave} = 1.34 \text{ Kg}$$

Para determinar el primer porcentaje trabajado, que fue de 66%, se sumó la cantidad de cemento y cantidad de relave hallados ($\theta_{Cemento}$ y θ_{Relave}):

$$\theta = 0.68 \text{ Kg} + 1.34 \text{ Kg}$$

$$\theta = 2.02 \text{ Kg}$$

Luego se divide este valor y la cantidad de relave hallado:

$$Valor\ 1 = \frac{1.34 \text{ Kg}}{2.02 \text{ Kg}}$$

$$Valor\ 1 = 0.66$$

Entonces, el primer porcentaje a trabajar fue 66%, los porcentajes restantes fueron establecidos a criterio. Se consideró que trabajando con porcentajes de 40% y 50% se podría alcanzar valores de resistencia que se encuentren dentro de lo establecido por la normativa, así mismo los porcentajes 70%, 75% y 80% se determinaron para poder establecer el punto máximo en que las relaciones de cemento/agua/relave serían viables. Para cada uno de ellos, se elaboraron tres probetas testigo, en las cuales se realizará la prueba de resistencia.

Finalmente, la relación cemento/agua/relave, parte de lo establecido en la Norma Técnica de Edificación E.060 para construcciones de elementos estructurales:

$$Relación \frac{Agua}{Cemento} = 0.5$$

Se puede elegir trabajar con una relación menor a la establecida en la normativa, sin embargo esto se aplica sólo en casos de concretos especiales (de alta resistencia, autocompactante, fluido). Cabe resaltar, que las cantidades trabajadas de cemento y agua permanecieron constantes para todos los porcentajes, esto debido a que se buscaba obtener la cantidad ideal de relave y fue este valor el que se decidió incrementar o disminuir en busca de una resistencia que cumpliera la normativa.

Tabla 15. Determinación de las cantidades de materiales de acuerdo al porcentaje

Material	Peso (Kg) al 40%	Peso (Kg) para 3 testigos
Cemento	0.68	2.04
Agua	0.34	1.02
Relave	0.81	2.43

Material	Peso (Kg) al 50%	Peso (Kg) para 3 testigos
Cemento	0.68	2.04
Agua	0.34	1.02
Relave	1.01	3.03

Material	Peso (Kg) al 66%	Peso (Kg) para 3 testigos
Cemento	0.68	2.04
Agua	0.34	1.02
Relave	1.34	4.02

Material	Peso (Kg) al 70%	Peso (Kg) para 3 testigos
Cemento	0.68	2.04
Agua	0.34	1.02
Relave	1.42	4.26

Material	Peso (Kg) al 75%	Peso (Kg) para 3 testigos
Cemento	0.68	2.04
Agua	0.34	1.02
Relave	1.52	4.56

Material	Peso (Kg) al 80%	Peso (Kg) para 3 testigos
Cemento	0.68	2.04
Agua	0.34	1.02
Relave	1.62	4.86

Fuente: Elaboración Propia

e. Proceso de Vaciado y Curado:

- Una vez obtenidas las cantidades de relave, cemento y agua a utilizar se realiza la preparación de la mezcla. Dados los porcentajes a estudiar, se elaboraron tres probetas por cada porcentaje, a cada una de ellas se les designó las letras A, B y C.
- La mezcla se realizó de forma manual, vaciando los tres materiales en un balde de acuerdo a las cantidades a utilizar. Con una varilla de acero de ½” se llevó a cabo el proceso de “chuceado” el cual consiste en introducir la varilla en la mezcla y realizar movimientos de arriba hacia abajo con el fin de eliminar todo el aire que pueda haber en ella.
- Una vez que se obtenga una masa uniforme se realiza en vaciado en las probetas (cuyas paredes interiores fueron previamente bañadas en petróleo). Se llenaron las probetas hasta el tope de estas y se enrasaron con una espátula.
- Se obtuvo un total de dieciocho probetas, su tiempo de fraguado fue de un día. Luego de ello, se realizó el desmolde de las probetas para pasar al proceso de curado, el cual consiste en sumergir el material en agua, este procedimiento ayuda al cemento a ganar resistencia.

f. Ensayo de Resistencia a Compresión Simple:

- Las pruebas de resistencia se llevaron a cabo en cuatro ocasiones: a los 7, 14, 21 y 28 días, siendo este último el punto en el que las probetas alcanzaron su resistencia máxima.
- La prueba de resistencia a compresión simple fue realizada utilizando el martillo de Smichdt (también conocido como Esclerómetro), su uso es frecuente para hacer análisis en campo debido a su manejabilidad.
- El ensayo consistió en medir la resistencia al rebote de la superficie ensayada. La medida del rebote se correlaciona con la resistencia a compresión simple mediante el gráfico de Miller que contempla la densidad de la roca y la orientación del martillo respecto del plano ensayado. [20]

Principio de Funcionamiento:

- El martillo de Smichdt consiste básicamente en un vástago que lleva conectado un muelle. Se coloca el vástago sobre la roca y se introduce en el martillo empujándolo contra la roca, lo que da lugar a que se almacene energía en el muelle que se libera automáticamente cuando esa energía elástica alcanza un cierto nivel y lanza una masa contra el vástago. La altura que alcanza esta masa al rebotar, que se mide en una escala graduada de 0 a 100, es decir directamente proporcional a la dureza y por tanto a la resistencia a compresión simple de la superficie de la roca.

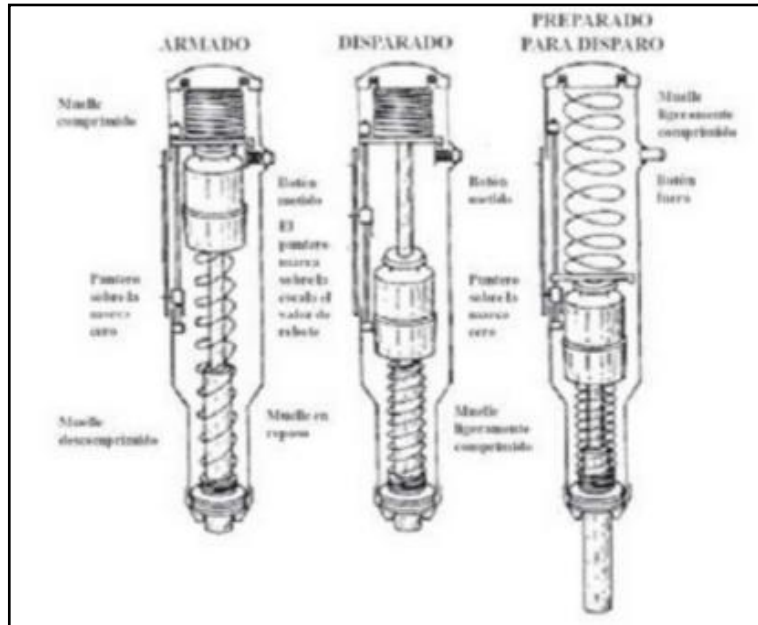


Ilustración 11. Principio de funcionamiento del martillo de Schmidt

Procedimiento de Medida:

- Primero, fue necesario alisar la superficie de ensayo de cada probeta, utilizando una piedra de amolar, esta superficie debe estar limpia y sin ningún signo de alteración ni fracturas.
- Luego, se posicionó el martillo perpendicularmente a la superficie de cada probeta, se disparó el vástago o punzón de impacto empujando el martillo hacia la superficie de ensayo hasta que el botón salte hacia fuera.
- Se pulsa el botón para bloquear el vástago de impacto después de cada prueba, finalmente, se lee y anota el valor de rebote indicado por el puntero en la escala.

- La medida del rebote se correlaciona con la resistencia mediante el gráfico de Miller, que tiene en cuenta la densidad de la muestra y la orientación del martillo respecto al plano del cuerpo de prueba ensayado.

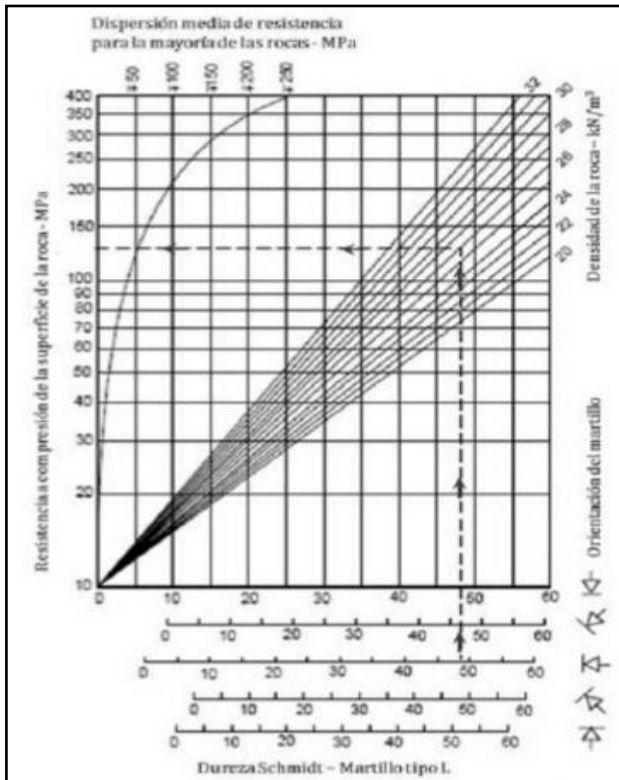


Ilustración 12. Correlación para el martillo Schmidt entre resistencia a compresión, densidad de la roca y rebote

g. Ensayo normalizado para la determinación de la resistencia a la compresión del concreto

- Para verificar los resultados obtenidos en el ensayo con el martillo Schmidt, se enviaron cuatro probetas a un Laboratorio de concretos y ensayo de materiales, para que puedan ser analizadas mediante el ensayo normalizado para la determinación de la resistencia a la compresión del concreto.
- El método consiste en aplicar una carga de compresión axial a las probetas a una velocidad normalizada en un rango prescrito mientras ocurre la falla. La resistencia a la compresión de la probeta es

calculada por división de la carga máxima alcanzada durante el ensayo, entre el área de la sección recta de la probeta.

- Se eligieron cuatro probetas de los porcentajes en estudio (40% C, 50% A, 66% B y 70% A), el criterio para la elección de dichas probetas estuvo basado en los resultados obtenidos en cada uno de los ensayos.
- Debido a que este ensayo exige la compresión de las probetas hasta su rotura, es que se descartaron las probetas de 75% y 80%. Mediante un análisis visual se puede apreciar como algunas zonas de dichas probetas se desprendían; cabe resaltar que es un requisito indispensable para el laboratorio que realizó el ensayo que la probeta se encuentre intacta y sin fracturas.

4.1.5 Procedimiento de Determinación de la Porosidad

a. Equipos y Materiales:

- Balanza.
- Cubeta.
- Horno de secado.

b. Procedimiento:

Se seleccionó dos testigos de entre el total de probetas, una con una relación relave – cemento del 40% y la segunda de una relación del 50% (40% A y 50% B). Se eligieron dichas muestras debido a su buen rendimiento en el ensayo de resistencia.

Para eliminar cualquier presencia de agua en la probeta fue necesario someterlas a calor en un horno de secado a 200 °C durante 24 horas.

Se pesaron las probetas para saber sus pesos secos, obteniendo los siguientes resultados: la probeta de 40% tuvo un peso de 2.980 kg y la de 50% obtuvo 3.200 kg.

Luego, se sumergieron ambas probetas en una cubeta lo suficientemente llena de agua como para cubrirlas por completo y se dejaron en reposo durante 24 horas. Al cumplirse dicho lapso de tiempo se volvió a tomar el peso de cada probeta obteniendo los pesos de 3.800 kg y 4.000 kg para las probetas de 40% y 50% respectivamente.

Tabla 16. Pesos secos y húmedos por probeta

TESTIGO	PESO EN SECO	PESO HÚMEDO
40% A	2.980 Kg	3.800 Kg
50% B	3.200 Kg	4.000 Kg

Fuente: Elaboración Propia

c. Cálculo:

Para determinar la porosidad de ambas probetas se realizan los siguientes cálculos:

40% A:

$$\Delta P_{40\%A} = \text{Peso húmedo} - \text{Peso seco}$$

$$\Delta P_{40\%A} = 3800 \text{ gr} - 2980 \text{ gr}$$

$$\Delta P_{40\%A} = 820 \text{ gramos}$$

Volumen de vacíos:

$$V_{\text{agua}} = 1 \text{ gr/cm}^3$$

$$V_{\text{vacío}} = 820 \text{ cm}^3$$

Volumen total:

$$V_T = V_{\text{probeta}} \times (100^3) \text{cm}^3$$

$$V_T = 0.0016 \times (100^3) \text{cm}^3$$

$$V_T = 1600 \text{ cm}^3$$

Porosidad:

$$n = \frac{V_v}{V_T}$$

$$n = \frac{820}{1600} \times 100$$

$$n = 51.25 \%$$

Relación de vacíos:

$$n = \frac{e}{1 + e}$$

$$0.51 = \frac{e}{1 + e}$$

$$e = 0.51 + 0.51e$$

$$0.49e = 0.51$$

$$e = 1.04$$

50% A:

$$\Delta P_{40\%A} = \text{Peso húmedo} - \text{Peso seco}$$

$$\Delta P_{40\%A} = 4000 \text{ gr} - 3200 \text{ gr}$$

$$\Delta P_{40\%A} = 800 \text{ gramos}$$

Volumen de vacíos:

$$V_{\text{agua}} = 1 \text{ gr/cm}^3$$

$$V_{\text{vacío}} = 800 \text{ cm}^3$$

Volumen total:

$$V_T = V_{\text{probeta}} \times (100^3) \text{ cm}^3$$

$$V_T = 0.0016 \times (100^3) \text{cm}^3$$

$$V_T = 1600 \text{ cm}^3$$

Porosidad:

$$n = \frac{V_v}{V_T}$$

$$n = \frac{800}{1600} \times 100$$

$$n = 50 \%$$

Relación de vacíos:

$$n = \frac{e}{1 + e}$$

$$0.5 = \frac{e}{1 + e}$$

$$e = 0.5 + 0.5e$$

$$0.5e = 0.5$$

$$e = 1$$

La relación de vacíos (e) es aquel vínculo entre el volumen de vacíos y el de los sólidos, su valor puede ser mayor a uno y alcanzar valores muy alto.

La compacidad de un suelo se refiere al grado de acomodo alcanzado por las partículas del suelo, dejando más o menos vacíos entre ellas. La bibliografía menciona en el estado más suelto $n = 47.6\%$, $e = 0.91$ y en el estado más compacto $n = 26\%$, $e = 0.35$.

De acuerdo a los resultados obtenidos, se puede concluir que este tipo de suelo se encuentra en un estado suelto.

4.2 DISCUSIONES

4.2.1 Resultados Químicos

Como se menciona en el capítulo anterior, las muestras de relave R-2 y R- 5 fueron sometidas a ensayos químicos para determinar su humedad y composición. Ambas muestras fueron mezcladas para obtener una única muestra representativa de un kilogramo de peso de acuerdo al requerimiento del laboratorio.

Se determinó que los parámetros a evaluar en el análisis químico fueran Plomo, Zinc, Cobre, Plata y Hierro, ya que la Mina Madrigal se dedicó a la explotación de dichos metales. Fue necesario evaluar también el contenido de Cloruros y Sulfatos ya que estos ejercen influencia en el comportamiento del concreto.

Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Tabla 17. Composición Química del Relave de la Mina Madrigal

PARÁMETRO	UNIDAD	RESULTADO
Humedad	%	18.43
Cloruros	mg/1000g	205.00
Sulfatos	mg/1000g	10544.86
Plomo	mg/1000g	1043.84
Zinc	mg/1000g	118.31
Cobre	mg/1000g	323.59
Plata	mg/1000g	0.57
Hierro	mg/1000g	35111.05

Fuente: Laboratorio SERVILAB-UNSA

4.2.1.1 Interpretación de Resultados:

a. Humedad:

El contenido de humedad obtenido en el ensayo (18.43%) evidencia una probable infiltración de contaminantes que podrían llegar a niveles inferiores en el suelo, produciendo posibles cambios en las características químicas de los elementos, ocasionando la movilidad de contaminantes y generación de drenaje ácido. Las muestras fueron tomadas en época seca en la zona, por lo que no se pudo ver influenciada por el clima o la acción del hombre ya que la Relavera se encuentra en una zona alejada al pueblo y de difícil acceso. Un estudio a una profundidad mayor a la realizada (20 cm) podría confirmar si existe transporte de contaminantes en el subsuelo; y las posibles consecuencias que este haya estado ocasionando en el Madrigal desde el inicio de las operaciones de la Mina, su posterior cierre en los años ochenta y la etapa de abandono en la que se encuentra actualmente.

b. Concentración de Metales:

Los resultados obtenidos mediante el Análisis de Absorción Atómica arrojan concentraciones de Zinc, Cobre, Plata y Hierro que no son significativas para fines económicos, sin embargo se demuestra la existencia de elementos que asociados al azufre generan minerales altamente peligrosos para el medio ambiente y la salud humana, este elemento no fue analizado en la muestra procesada por el Laboratorio de ensayo químico. De acuerdo a la bibliografía existente sobre estudios en la zona se conoce que existen áreas que si tienen presencia de este elemento, tal como se cita en la Investigación Relavera Mina Inactiva Madrigal [6]. Por lo tanto, no se tiene la información necesaria para conocer el grado de afectación que podría generar el Azufre en el concreto.

Sin embargo, cabe mencionar que existen diversas tecnologías de remediación de suelos contaminados con este elemento, dentro de las cuales se pueden considerar los tratamientos fisicoquímicos, los cuales utilizan las propiedades físicas y/o químicas de los contaminantes o del medio contaminado para transformar, separar o inmovilizar el contaminante. Son tratamientos económicamente factibles y la mayoría se encuentra disponible comercialmente, por lo cual son las técnicas más empleadas para la remediación de diferentes matrices contaminadas con residuos peligrosos desde hace décadas. Estas tecnologías involucran una variedad de procesos como: filtración, neutralización, precipitación oxidación/reducción, sorción, evaporación y floculación, entre otros.

c. Concentración de Plomo:

La concentración de Plomo fue de 1043.84 mg/Kg, la cual comparada con el Estándar de Calidad Ambiental para Suelo superan la concentración determinada en la normativa para Suelo Agrícola (70 mg/Kg) y Suelo Residencial/Parques (140 mg/Kg), manteniéndose dentro del límite de 1200 mg/Kg para Suelo Comercial/Industrial/Extractivo. La Relavera de la Mina Madrigal se encuentra en el área de propiedad de la compañía Mountain Minerals, hallándose abandonada en la actualidad, este terreno no se utiliza para el desarrollo de actividades agrícolas o recreacionales; la presencia de este metal no representa de momento una amenaza directa para la población o el medio, sin embargo su presencia en un posible transporte de contaminantes en el subsuelo o en efluentes cercanos puede representar una grave amenaza para la salud humana.

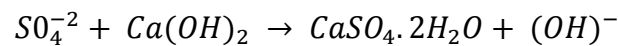
d. Contenido de Sulfatos y Cloruros:

Sulfatos:

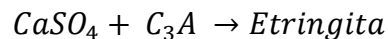
Los sulfatos representan uno de los mayores riesgos de agresión química para el concreto, existen reacciones químicas que se producen debido a ellos que pueden llevar a la formación de productos expansivos, en el concreto ya endurecido pueden dar lugar a efectos perjudiciales ya que la expansión puede producir tensiones mecánicas internas, las cuales, eventualmente se traducen en deformaciones y desplazamientos en diferentes partes de la estructura, aparición de grietas y fisuras, desconchados, etc.

Las dos reacciones químicas involucradas en el ataque de sulfatos al concreto son:

- Reacción del sulfato con hidróxido de calcio liberado durante la hidratación del cemento, formando sulfatos de calcio (yeso)



- Reacción del sulfato de calcio con el aluminato de calcio hidratado formando sulfoaluminato de calcio (etringita).



El hidróxido de calcio, liberado en la hidratación del cemento, reacciona con los sulfatos produciendo sulfato de calcio dihidratado que genera una expansión del 18% del sólido, y produce también etringita que es el compuesto causante de la fisuración del concreto. [21]

La degradación de los hormigones por la acción de los sulfatos se debe, principalmente, a los fenómenos de expansión relacionados con la cristalización de etringita denominada “secundaria”, para diferenciarla de la “primaria”, que se obtiene en las primeras etapas de hidratación del cemento Portland por reacción del yeso y del aluminato. Esta etringita “primaria” nunca da lugar a fenómenos de expansión. [22]

El cemento utilizado en esta investigación fue el cemento Yura Tipo IP; de acuerdo a su ficha técnica la capacidad de la puzolana que utiliza para fijar este hidróxido de calcio liberado y a su mayor impermeabilidad, es que es más resistente a los sulfatos y al ataque químico de otros iones agresivos. Debido a la cantidad obtenida de sulfatos en el análisis químico, fue necesario elegir un tipo de cemento que pueda resistir el ataque de sulfatos y otros iones agresivos.

Cloruros:

El contenido de cloruros en el concreto puede ser determinante para que se presente el fenómeno de la corrosión. De acuerdo a la National Ready Mixed Concrete Association la corrosión se define como “la reacción química o electroquímica entre un material, usualmente un metal y su medio ambiente, que produce un deterioro del material y de sus propiedades”; cuando los cloruros se mueven dentro de concreto provocan la ruptura de la capa pasiva de protección del acero, causando que este se oxide y deslamine.

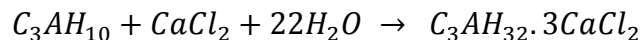
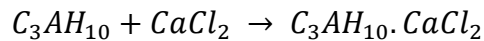
El ion cloruro (Cl^-) penetra en el hormigón a través de la red de poros. Estos iones se disuelven en el agua que contienen los poros y avanzan hacia el interior por difusión u otros mecanismos de transporte. Sin embargo, los iones cloruro disueltos en los poros pueden interaccionar con las fases sólidas del hormigón quedando inmovilizados, por tanto, el cloruro dentro del hormigón puede encontrarse en varios estados:

Cloruro libre: Es el que permanece disuelto en el agua que contiene los poros. Se desplaza por el interior del hormigón mediante difusión u otros mecanismos.

Cloruro ligado: Es el que permanece unido a las fases sólidas del hormigón. Este cloruro queda inmovilizado, sin posibilidad de moverse hacia el interior del hormigón.

Cloruro total: Es la cantidad de cloruro que contiene el hormigón, sin hacer distinción entre cloruro libre y ligado. La concentración de cloruro total en un hormigón es igual a la suma de concentraciones de cloruro libre y ligado.

Los procesos mediante los cuales se unen los cloruros en las fases sólidas, son tanto de tipo químico como de tipo físico. El principal responsable de la unión química de los cloruros es el aluminato tricálcico. Este componente del cemento reacciona con los cloruros de los poros, para formar el monocloroaluminato hidratado o “sal de Friedel” $C_3AH_{10} \cdot CaCl_2$ y el tricloroaluminato hidratado $C_3AH_{32} \cdot 3CaCl_2$ según las reacciones:



La unión física de los cloruros a las fases sólidas del hormigón se produce mediante el fenómeno conocido como adsorción. Los cloruros disueltos en el agua de los poros se unen a la superficie de las partículas sólidas del hormigón. El principal sólido responsable de la adsorción es el gel CSH (Silicato cálcico hidratado $CaO \cdot SiO_2 \cdot H_2O$, uno de los principales compuestos hidratados del Cemento Portland, que es responsable de las propiedades resistentes del cemento), que durante la hidratación del hormigón precipita en forma coloidal presentando un área superficial muy elevada. Sobre esta gran superficie se adsorben los cloruros.

Existen métodos para el control y tratamiento de estructuras que se han visto perjudicadas por los cloruros, en el caso de los **cloruros** tenemos tres metodologías que se utilizan para la reparación del hormigón dañado:

- **Protección catódica:** Consiste en llevar las armaduras embebidas en el hormigón a un potencial de valor tal que la corrosión no pueda tener lugar, ello se consigue reduciendo el contenido de oxígeno, o haciendo actuar a toda la armadura como cátodo.

- **Realcalinización:** Método que puede ser utilizado aplicando o no aplicando corriente eléctrica; en el primer caso se aplica una corriente eléctrica que produzca OH^- en las armaduras por electrólisis, el segundo caso se basa en el hecho de la elevada movilidad de los iones OH^- , los cuales se difunden desde el exterior hacia el interior.
- **Extracción electroquímica de cloruros:** Consiste en aplicar una corriente eléctrica continua entre la armadura que actúa como cátodo y un ánodo exterior que se coloca de forma temporal sobre la superficie del hormigón. El electrodo externo es preferentemente una malla de titanio, y debe estar en contacto con un electrolito, que se coloca sobre la superficie del hormigón, para asegurar la conducción al refuerzo. [23]

En cuanto a los **sulfatos** la resistencia del concreto a los sulfatos puede mejorarse significativamente produciendo un concreto impermeable y denso, hecho de cemento resistente a sulfatos, con una baja relación de agua-cemento con suficiente contenido de cemento y que sea apropiadamente colocado, compactado y curado.

Los porcentajes de sulfatos y cloruros presentes en la muestra de relave estudiada constituyen el 1.05% y 0.0205% de un kilogramo analizado. Como se ha expuesto dichos componentes pueden afectar al concreto de diversas maneras, en esta investigación el contenido de sulfatos es una variable a tener en cuenta en el análisis del uso propuesto para el material obtenido.

4.2.2 Resultados Físicos

4.2.3 Ensayo de Resistencia a Compresión Simple - Martillo Schmidt

En base a las cuatro pruebas realizadas a las probetas (7, 14, 21 y 28 días) se logró determinar que cinco de las dieciocho probetas presentan resistencias que alcanzan el límite necesario, para poder ser utilizadas en la industria. Los porcentajes de 40 y 50 % obtuvieron las resistencias más altas por lo que se trabajará en base a los resultados obtenidos para determinar la aplicación tecnológica que tiene el material basado en relave y cemento Portland tipo IP.

Tabla 18. Resultados de resistencia para cada probeta

		TIEMPO							
		7 días		14 días		21 días		28 días	
		Superior	Inferior	Superior	Inferior	Superior	Inferior	Superior	Inferior
PORCENTAJE	80 A	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	80 B	<10	<10	<10	<10	12	<10	12	<10
	80 C	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	75 A	<10	<10	12	<10	12	<10	12	<10
	75 B	<10	<10	<10	<10	10	<10	12	10
	75 C	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10	<10
	70 A	12	<10	14	12	16	12	16	13
	70 B	<10	<10	12	12	12	12	14	12
	70 C	<10	<10	10	<10	13	13	14	12
	66 A	13	12	14	12	14	13	15	14
	66 B	13	10	16	12	18	14	18	14
	66 C	12	12	14	12	17	16	17	16
	50 A	14	18	16	16	14	16	29	26
	50 B	14	14	22	20	25	20	30	27
	50 C	10	11	10	14	12	14	16	14
	40 A	16	14	18	16	21	20	29	25
	40 B	16	16	20	16	18	19	24	20
	40 C	16	12	18	18	20	19	25	24

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 19. Equivalencias entre los resultados

Resultado Martillo	Equivalencia en Kg/cm ²	Equivalencia en MPa
20	145	14.5
21	150	15
22	180	18
23	190	19
24	205	20
25	220	22
26	240	24
27	260	26
28	270	27
29	290	29
30	300	30

Fuente: Elaboración Propia

Comparación de Resultados con calidad de la Materia Prima utilizada en la elaboración del Concreto

Tabla 20. Características Técnicas del Cemento puzolánico Yura Tipo IP

REQUISITOS QUÍMICOS	CEMENTO PORTLAND PUZOLÁNICO YURA TIPO IP		Requisitos Norma NTP 334.090 ASTM C-595	
MgO (%)	1.99		6.00 Máx.	
SO ₃ (%)	1.75		4.00 Máx.	
Pérdida por ignición (%)	2.14		5.00 Máx.	

REQUISITOS FÍSICOS	CEMENTO PORTLAND PUZOLÁNICO YURA TIPO IP		Norma NTP 334.090 ASTM C-595		Comparativo con Norma Tipo I y Tipo V Requisitos Norma Técnica NTP 334.009 / ASTM C 150	
Peso específico (gr/cm ³)	2.85		-		-	
Expansión en autoclave (%)	0		0.80 Máx.		-	
Fraguado Vicat inicial (minutos)	170		45 Mín.		-	
Fraguado Vicat final (minutos)	270		420 Máx.		-	
Resistencia a la compresión	Kgf/cm ²	MPa	Kgf/cm ²	MPa	Cemento Tipo I	
					Kgf/cm ²	MPa
1 días	104	10	-	-	-	-
3 días	199	20	133 Mín.	13	122	12
7 días	247	24	204 Mín.	20	194	19
28 días	342	34	255 Mín.	25	-	-
60 días	397	39	-	-	-	-
Resistencia a los sulfatos	Cemento IP				Cemento Tipo V	
% Expansión a los 14 días	0.018		-		0.04 Máx.	

Fuente: Cementos Yura S.A.

Comparación de la resistencia a la compresión:

En las Tablas N° 18 y 19 se muestran los resultados obtenidos en las pruebas realizadas a las probetas a los 7, 14, 21 y 28 días después del proceso de vaciado y curado, resultados en los cuales se basa el planteamiento del uso del material para tapones de cierre de labores mineras y pavimentos urbanos.

En la Tabla N° 20 se muestran las características técnicas del cemento puzolánico Yura tipo IP, en la cual se muestra la resistencia a la compresión que tiene este cemento a 1, 3, 7, 28 y 60 días después del vaciado.

De los resultados obtenidos en esta investigación se distingue el valor alcanzado a los 28 días, el cual alcanzó los 30 MPa, resultado aproximado a lo obtenido por Cementos Yura; de igual forma, si consideramos la resistencia máxima obtenida en el ensayo de compresión simple, que fue de 34.52 MPa se puede concluir en que las características de ambos concretos son similares en cuanto a la resistencia a la compresión, ensayo principal al cual fueron sometidas las probetas, el cual está directamente relacionado con los objetivos de la investigación.

4.2.4 Ensayo de Resistencia a Compresión Simple – Laboratorio:

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en las pruebas con el martillo Schmidt se eligieron las probetas 40% C, 50% A, 66% B y 70% A para que puedan ser analizadas en laboratorio y hallar su esfuerzo de rotura.

Se descartaron las probetas de 75% y 80% debido a la carencia de resultados durante las cuatro pruebas con el martillo. Haciendo un análisis visual de las características de cada probeta, se pudo determinar que las seis probetas de estos porcentajes presentaban una textura poco firme y una coloración muy cercana a la del relave.

Los resultados obtenidos en el ensayo confirman los primeros obtenidos con el martillo Schmidt.

4.3 Propuesta de Uso para el Material

4.3.1 Usos masivos:

a. Tapones para el cierre de labores mineras:

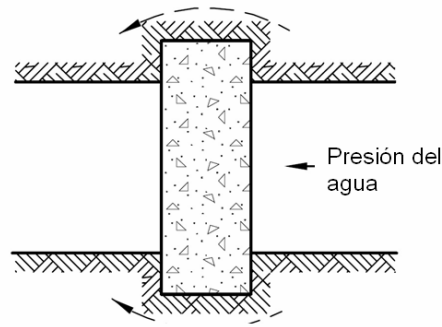
De acuerdo a la Guía para el Diseño de Tapones para el cierre de Labores Mineras se define un tapón como una “barrera permanente o estructura de bloqueo para retener fluidos bajo presiones elevadas”, su inestabilidad puede producir serios riesgos para la salud humana y el medio ambiente, lo que trae consigo pérdidas económicas como la pérdida de reservas de mineral y/o la interrupción del proceso productivo de una mina. Esta Guía menciona que la construcción de este tipo de estructuras de retención de agua en minas subterráneas está regulada en muchas jurisdicciones mineras en el mundo; es por ello que este trabajo se basa en las recomendaciones dadas por el Ministerio de Energía y Minas para comprobar que los resultados obtenidos con las probetas elaboradas cumplen con los requisitos mínimos para su uso como tapones en el cierre de labores mineras. [24]

El uso de tapones es una práctica ampliamente usada en nuestro país, por ejemplo en el cierre de operaciones mineras de la mina Mimosa (Compañía de Minas Buenaventura S.A. - Unidad Julcani) y el Plan de Cierre de Mina de la Unidad San Genaro propiedad de Castrovirreyna Compañía Minera S.A., donde se cerraron cincuenta y cuatro bocaminas, diecinueve chimeneas, seis chimeneas rajo y diez rajos.

Para el diseño de un tapón monolítico (Imágenes a – d) se debe tener en cuenta que, por lo general se construyen de uno o múltiples vertidos de concreto sin refuerzo de acero al interior de la geometría del tapón, lo cual favorecería el material propuesto debido a que el contenido de cloruros no podría generar corrosión en alguna

estructura metálica. Para túneles de gran diámetro (mayor a 6 metros) se utiliza el diseño de tapones de núcleo hueco (Imágenes e -g).

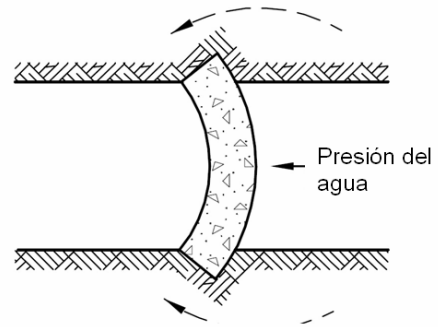
Posible trayectoria de salida del agua a través del estrato



Posible trayectoria de salida del agua a través del estrato

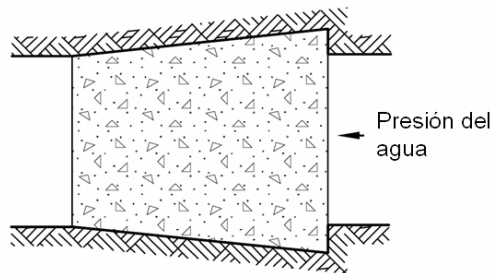
(a)

Posible trayectoria de salida del agua a través del estrato

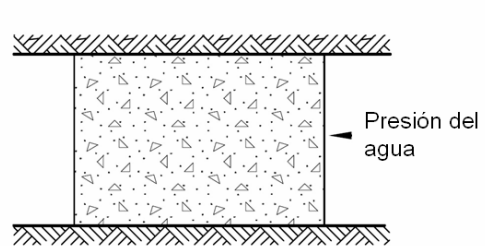


Posible trayectoria de salida del agua a través del estrato

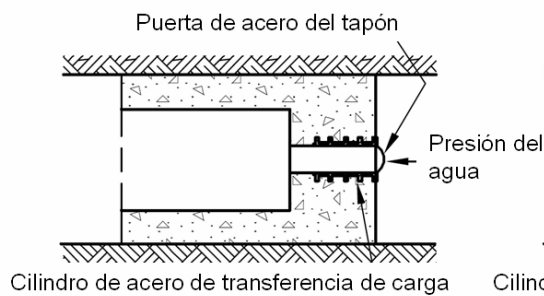
(b)



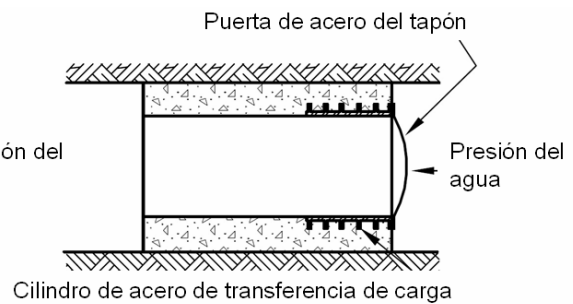
(c)



(d)



(e)



(f)

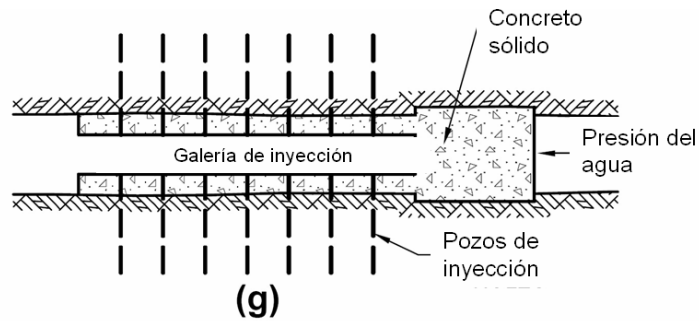


Ilustración 13. Clases de tapones utilizados en el cierre de labores mineras (MINEM, 2007)

Así mismo, la Guía menciona requerimientos de estudios para la construcción de un tapón de cierre para garantizar su estabilidad a largo plazo como la actividad sísmica de la zona, la resistencia del material del tapón y los esfuerzos sobre este, y la caracterización del macizo rocoso sobre el cual se ubicará el tapón. Se deben considerar también los impactos ambientales negativos a nivel subterráneo que pueden generarse a raíz de una falla en la estructura del tapón.

Los criterios para el diseño de tapones permanentes, establecen una resistencia a la compresión mayor que 30 MPa, la mezcla del concreto debe ser diseñada de acuerdo a los mejores estándares de resistencia al ataque por ácido, ataque por sulfatos y a la reacción álcali agregado. Teniendo en cuenta lo establecido en la guía, se puede determinar que es viable el uso de un concreto con una composición del 50% de relave proveniente de la Relavera de la Mina Madrigal y 50% de Cemento Portland tipo IP, ya que esta ha obtenido un esfuerzo de rotura de 34.52 MPa, el cual cumple con lo recomendado. Del mismo modo, se podría considerar una relación de 40% relave y 60% cemento ya que se alcanzó un esfuerzo de rotura de 30.01 MPa.

b. Backfill:

El backfill o relleno hidráulico en minas es definido como “el proceso por el cual materiales de desecho son colocados en las aberturas creadas en los trabajos de minería, es esencial en muchas operaciones subterráneas para lograr un proceso integral de extracción”. Los tipos de material de relleno y los procesos varían, sin embargo se suele utilizar una mezcla de ligantes, agua de procesado y agregados que van desde roca, conglomerado, grava y arena de cantera hasta residuos del procesamiento de material. Master Builders Solutions de la compañía BASF sostiene que “el relleno en una mina está ganando cada día más importancia debido a las tendencias en la minería hacia una excavación más profunda, la optimización de la recuperación del mineral y del agua, una mejora del ciclo de la mina y de la producción, la reducción del impacto medioambiental y del coste en general”.⁶

De acuerdo a la investigación “Caracterización de la pasta de relave para uso como relleno en labores mineras” se demuestra que el relave polimetálico posee características técnicas adecuadas, para ser utilizado en pasta de relleno hidráulico en túneles de la minería subterránea.⁷

Basándonos en esta investigación, se propone el desarrollo de un estudio complementario al desarrollado en esta tesis para comprobar que los relaves mineros provenientes de la extracción polimetálica de la Mina Madrigal, pueden ser utilizados como relleno hidráulico en trabajos de minería, dicha investigación deberá comprobar si el relave cuenta con las propiedades óptimas para su uso como relleno de pasta, realizando ensayos de slump (velocidad de sedimentación) y velocidad de percolación.

⁶ Master Builders Solutions, “*Mine Backfill, Soluciones para construcción subterránea*”

⁷ Romero, A., Flores, S., “*Caracterización de la pasta de relave para uso como relleno en labores mineras*”

4.3.2 Otros usos:

a. Pavimentos Urbanos – Adoquines:

Se define a un adoquín como un “elemento macizo, piedras prefabricadas de espesor uniforme e iguales entre sí con forma de prisma rectangular, que al colocarlos sobre una superficie encajan unos con otros de manera que solamente quede un pequeño espacio entre ellos”.⁸

Los adoquines deben tener las siguientes características:

- Cara superior (superficie de desgaste): Sobre la cual circulará el tráfico peatonal o vehicular y que define la forma del adoquín.
- Cara inferior: Igual a la superior, sobre la que se apoya en la capa de arena.
- Caras laterales o paredes, curvas o rectas, pero verticales que conforman el volumen y determinan el espesor.
- Aristas o bordes: Donde empalman dos caras o los quiebres de la cara lateral.
- Bisel: Es un plano inclinado en las aristas o bordes de la cara superior que se puede o no hacer en el momento de la fabricación. No debe tener más de 1 centímetro de ancho y no es indispensable, pero mejora la apariencia de los adoquines, facilita su manejo y contribuye al llenado de la junta.
- Espesor: Los adoquines se fabrican en espesores de 6 cm para tránsito peatonal y vehicular liviano, 8 cm para tránsito medio y pesado y 10 cm para tránsitos muy pesados.

Se definen tres tipos de adoquines:

- Tipo I: Adoquines rectangulares, son prácticos y populares por la facilidad de su fabricación y colocación. Tienen 20 cm de largo por 10 de ancho.

⁸ Tellez, J., Villanueva, J., 2003, “La resistencia a la compresión de los adoquines de concreto en Nicaragua”

- Tipo II: Son adoquines que se colocan en hileras y se debe tratar de que estas queden atravesadas a la dirección de circulación de los vehículos.
- Tipo III: Adoquines que por su peso y tamaño no se pueden alzar con una sola mano (miden unos 20 cm x 20 cm o más) y sólo se pueden colocar en hileras, también se debe tratar que las hileras queden atravesadas en la misma dirección de circulación de los vehículos. A este tipo de adoquines pertenecen lo que tienen forma de cruz, trébol, etc. [25]

Calidad de los adoquines:

De acuerdo al Reglamento Nacional de Edificaciones Norma CE.010 Pavimentos Urbanos y en base a lo considerado en la Norma Técnica Peruana NTP 399.611:2003, se tiene que la resistencia a la compresión que se requiere según cada tipo de adoquín es la siguiente:

Tabla 21. Clasificación y Resistencia de adoquines según la NTP

TIPO	ESPESOR (mm)	PROMEDIO (MPa)	MINIMO (MPa)
I	40	31	28
	60	31	28
II	60	41	37
	80	37	33
III	100	35	32
	≥80	55	50

Fuente: NTP 399.611:2003

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos con las probetas de 40% y 50% (30.01 MPa y 34.52 MPa respectivamente) se determina lo siguiente:

- Ambos porcentajes de relación Cemento – Relave cumplen con la resistencia promedio de 31 MPa necesaria para los Adoquines Tipo I.

- Adoquines para pavimentos de uso peatonal, tanto para un espesor de 40 mm como de 60 mm.
- La relación Relave – Cemento en un 50% / 50% se encuentra dentro del rango requerido para Adoquines Tipo II – Adoquines para pavimentos de tránsito vehicular ligero con un espesor de 80 mm.
- La relación Relave – Cemento en un 50% / 50% se encuentra dentro del rango requerido para Adoquines Tipo III – Adoquines para tránsito vehicular pesado, patios industriales y de contenedores con un espesor de 100 mm.

Beneficio social:

El uso de relave como agregado del cemento para la obtención de adoquines podría beneficiar a poblaciones que carecen de vías asfaltadas como es el caso del pueblo de Madrigal. Desde el poblado de Ichupampa hasta el Madrigal la carretera se encuentra sin asfaltar con tramos donde el tránsito es bastante complicado para un vehículo liviano. Entre ambos lugares hay aproximadamente 20 Km de distancia.

La condición de las vías de comunicación no sólo afecta a la población de la zona, sino también al turismo local ya que difícilmente los turistas que llegan al Valle del Colca buscan realizar actividades recreativas en esta zona.

Las características de la Relavera Madrigal, las cuales permiten plantear esta alternativa de solución, son las siguientes:

Área:	212.795 m ²	Volumen:	425.59 m ³
Densidad:	2.53 gr/cm ³	Tonelaje:	1076 TM
Profundidad:	2.00 m	Largo y ancho:	500 m x 300 m

Con esta cantidad de relave polimetálico ubicado en la zona, se lograría asfaltar no sólo las vías de comunicación hacia el Distrito, sino también

las calles del mismo ya que sólo el centro del poblado cuenta con vías pavimentadas.

Evaluando las condiciones actuales de la vía que une los distritos Ichupampa, Lari y Madrigal, y teniendo en cuenta que este último tramo no se encuentra afirmado, se determina la cantidad de adoquines que se necesitaría para pavimentar estas vías.

Es necesario tener en cuenta, que debido a que el pavimento con adoquines está compuesto por un gran número de piezas, el tráfico sobre este generaría más ruido que sobre otros tipos de pavimentos, e induce mayor vibración al vehículo; por estas razones no se recomendaría el paso de vehículos a velocidades superiores a los 80 km/hora.

Pavimentos adoquinados implican una capa de rodadura recuperable y reutilizable, con adaptaciones a las variaciones de la vía, resultando ideal para vías que no tengan redes de servicios completas como en este caso. El proceso de construcción sería sencillo y con utilización de poca maquinaria. Esta mejora en las vías de comunicación de la zona podría estar a cargo de la Compañía Mina del Madrigal como parte de un programa de beneficio social a su área de influencia. [26]

Determinación del total de Adoquines necesarios para la pavimentación de vías:**1 Ichupampa - Lari - Madrigal:**

1.1	Longitud del pavimento:	20.54 Km	20 540 m
1.2	Ancho del pavimento:		
	A la salida de Ichupampa	10.51 m	
	A la salida de Lari	10.55 m	
	A la entrada del Madrigal	10.02 m	
	Ancho promedio:	10.36 m	
1.3	Nº de adoquines por m ² (n):	Para adoquines de 10 x 20 cm = 50	
1.4	Área del pavimento (a):	20 540 m x 10.36 m	
		212 794.4	m ²
1.5	Total de Adoquines:		
	Na = a x n x 1.5		
	Na = 212 794.4 x 50 x 1.5		
	Na = 15 959 580 unidades vía Ichupampa - Lari - Madrigal		

2 Lari - Madrigal:

2.1	Longitud del pavimento:	4.23 Km	4 230 m
2.2	Ancho del pavimento:		
	A la salida de Lari	10.55 m	
	A la entrada del Madrigal	10.02 m	
	Ancho promedio:	10.29 m	
2.3	Nº de adoquines por m ² (n):	Para adoquines de 10 x 20 cm = 50	
2.4	Área del pavimento (a):	4 230 m x 10.29 m	
		43 505.55	m ²
2.5	Total de Adoquines:		
	Na = a x n x 1.5		
	Na = 43 505.55 x 50 x 1.5		
	Na = 3 262 916.2 unidades vía Lari - Madrigal		

Ilustración 14. Total de Adoquines para pavimentación de la zona

Fuente: Elaboración Propia

4.4 Cierre de Pasivo Ambiental

Desde el cese de las labores de Mountain Mineral en la zona en los años 80, la población del Madrigal se ha visto directamente influenciada por sus pasivos ambientales. La erosión presentada en esta área, la cual arrastra partículas contaminantes, no sólo afecta a la actividad agrícola de la zona sino también a los cursos de agua que se encuentran en el área de influencia (Ver Anexo D Fenómenos Erosivos Eólicos).

Así mismo, considerando la disposición de relaves llevada a cabo durante las actividades de la Mina Madrigal, la cual carecía de estructuras que impidieran la lixiviación hacia el subsuelo como geotextiles, ha ocasionado una visible alteración del medio. De acuerdo a la información recogida en el lugar, se optó como medida de remedio el cubrir las zonas afectadas con tierra y sembrar pastizales, acción que no hizo más que agravar el problema.

En nuestro país existen casos de cierre de pasivos ambientales que se han llevado a cabo incluso años después de haber culminado operaciones. Por ejemplo, la Compañía Minera Colquirrumi ha venido desarrollando trabajos de cierre de pasivos ambientales mineros en la ciudad de Cajamarca, que han permitido recuperar más de 328 000 m² de suelos, donde en la actualidad crecen especies vegetales y se realizan actividades de pastoreo, los pasivos ambientales que se encuentran allí datan de los años 40, época en la cual no se tomaba en cuenta el cuidado del medio ambiente como parte de las actividades de explotación minera. En total, se tiene registrado que esta compañía ha restaurado cerca de 444 pasivos, de los cuales menos del 28% fueron generados por sus operaciones. [27] Así como en este caso, todo impacto negativo causado por la inadecuada disposición de relaves en la Mina Madrigal puede ser remediado, para ello es necesario realizar labores de desmantelamiento de estructuras en abandono, trabajos de estabilidad física, geoquímica, hidrológica, revegetación y programas sociales.

4.5 Validación de Resultados

Para validar los resultados obtenidos en la investigación se determinó mediante el coeficiente de correlación de Pearson la relación entre la Resistencia a la compresión simple utilizando el esclerómetro, y la Resistencia al esfuerzo de rotura. Este coeficiente es utilizado para medir el grado de relación entre dos variables siempre y cuando estas sean cuantitativas; y se determina utilizando la siguiente fórmula:

$$r_{xy} = \frac{n \sum X_i Y_i - \sum X_i \sum Y_i}{\sqrt{n \sum X_i^2 - (\sum X_i)^2} \sqrt{n \sum Y_i^2 - (\sum Y_i)^2}}$$

Donde:

- n = número de variables.
- X = se define mediante los resultados obtenidos en el ensayo a la compresión simple mediante el esclerómetro.
- Y = se define mediante los resultados obtenidos en el ensayo a la compresión por esfuerzo de rotura.

Para aplicar la fórmula se define cada una de las variables:

Tabla 22. Resultados para determinar el coeficiente de correlación de Pearson

	X	Y	X ²	Y ²	XY
40C	25	30.01	625	900.6001	750.25
50A	29	34.52	841	1191.6304	1001.08
60B	18	28.34	324	803.1556	510.12
70A	16	24.81	256	615.5361	396.96
Σ	88	117.68	2046	3510.9222	2658.41

Fuente: Elaboración Propia

En la columna X se representan los resultados de resistencia obtenidos mediante el ensayo de compresión simple utilizando el esclerómetro; la columna Y contiene los valores de resistencia al esfuerzo de rotura. Las columnas X^2 y Y^2 elevan al cuadrado los resultados de las primeras dos columnas, y la última implica la multiplicación de ambas variables. Finalmente se determina la sumatoria de cada ítem.

Se eligieron los resultados obtenidos en para las probetas 40%C, 50%A, 60%B y 70%A, ya que estas probetas pasaron por los ensayos de Compresión simple con el esclerómetro y la medición del esfuerzo de rotura.

Reemplazando estos valores en la fórmula:

$$r_{xy} = \frac{n \sum X_i Y_i - \sum X_i \sum Y_i}{\sqrt{n \sum X_i^2 - (\sum X_i)^2} \sqrt{n \sum Y_i^2 - (\sum Y_i)^2}}$$

$$r_{xy} = \frac{4(2658.41) - (88 * 117.68)}{\sqrt{4(2046) - 88^2} \sqrt{4(3510.92) - 117.68^2}}$$

$$r_{xy} = \frac{277.8}{20.976 * 13.97}$$

$$r_{xy} = \frac{277.8}{293.034}$$

$$r_{xy} = 0.94$$

De acuerdo a lo establecido en estadística, el valor del índice de correlación r varía en un intervalo de [-1,1], entonces para el resultado de 0.94 obtenido para las variables analizadas se puede definir que existe una correlación positiva.

4.5.1 Confirmación de la Hipótesis planteada:

De acuerdo a la correlación positiva obtenida en la validación de resultados mediante el Coeficiente de Correlación de Pearson, se comprueba la hipótesis planteada al haber comprobado que la resistencia obtenida tanto en el ensayo de compresión simple utilizando el esclerómetro, como en el ensayo de resistencia al esfuerzo de rotura cumplen con los estándares establecidos en la Norma Técnica de Edificación E.060, para construcciones de elementos estructurales donde la resistencia especificada a la compresión del concreto debe ser igual o mayor $f'_c = 210 \text{ kg/cm}^2$ (o 20.59 MPa), en esta investigación se logran valores que alcanzan los 34.52 MPa; por lo que el material obtenido puede ser utilizado en la industria de la construcción tal como se plantea en la hipótesis de la investigación.

V. CONCLUSIONES

- Se demuestra que es posible utilizar relaves provenientes de una mina polimetálica como agregados del cemento Portland tipo IP, al haber obtenido en ensayos de resistencia, valores que comprueban que este material puede tener diversas aplicaciones en la industria de la construcción y minera, mitigando los pasivos ambientales de la zona del Madrigal y contribuyendo con la industria cementera, al evitar la explotación de nuevas canteras. Se alcanzaron resistencias que se encuentran en un rango de entre 20 MPa hasta 30 MPa, resultados que se encuentran dentro las especificaciones técnicas exigidas para las alternativas de uso propuestas.
- Se estudiaron las características físicas y químicas tanto del relave como del material obtenido, las cuales son factores que influyen directamente en la resistencia del concreto y que son determinantes para definir los usos posibles de este material. Al haber estudiado dichas características se concluye que el relave se clasifica como una arena mal graduada, considerándolo como un suelo en estado suelto, con un contenido de humedad del 12.51%, una humedad óptima de 15.38% con la que se obtuvo una compactación máxima de 1.68 gr/cm^3 , para una misma energía de compactación.

En cuanto a los resultados obtenidos en el ensayo químico del relave se obtuvo que el principal parámetro presente es el Hierro, en una cantidad de 35111.05 mg/Kg, así como Sulfatos con 10544.86 mg/Kg y Plomo con 1043.84 mg/Kg.

- Se obtuvieron diversas probetas (o testigos) para realizar el ensayo de resistencia en cada una de ellas, de acuerdo a los periodos de tiempo descritos en la teoría. Así mismo, cumplieron con la resistencia establecida en la Norma Técnica de Edificación E.060 para construcciones de

elementos estructurales (columnas, vigas, lozas de piso en plantas industriales), lo que comprueba la hipótesis planteada en esta investigación.

- Se propone como alternativa de aplicación para este material el emplearlo en la elaboración de tapones para el cierre de labores mineras y la obtención de pavimentos urbanos - adoquines.

El uso de los relaves de la zona en tapones para el cierre de labores mineras implicaría una inversión para la Compañía Minera del Madrigal que debe estar contemplada en su Plan de Cierre de Pasivos Ambientales, y Plan de Cierre de Mina no sólo beneficia directamente al medio ambiente al mitigar los pasivos ambientales que han afectado la zona durante décadas, sino también se utilizan sub productos de lo que fueron sus procesos productivos.

Esta investigación también plantea como alternativa de uso, el empleo del material obtenido para la construcción de pavimentos de adoquines en las vías sin asfaltar Ichupampa – Lari – Madrigal, siendo un proceso de pavimentado más sencillo, con mano de obra artesanal y con una posible reducción en el costo del proyecto ya que la materia prima sería extraída de la zona impactada.

VI. RECOMENDACIONES

- En pro de una investigación más profunda en cuanto a la resistencia del material obtenido, se recomienda trabajar cantidades de relave más amplias. Debido al difícil acceso a la zona de estudio, es necesario considerar que el transporte en un vehículo de carga pesada podría ser la mejor alternativa para lograr llegar al lugar sin inconvenientes y obtener una cantidad de relave significativa, la cual podría ser utilizada en una investigación que implique más testigos y un tiempo de ensayo que evidencie el comportamiento del concreto a largo plazo.
- Considerando la disposición de relaves en la zona, un estudio sobre la dispersión de contaminantes en el subsuelo sería un complemento a esta tesis. La cantidad de metales contenidos en la muestra de relave estudiada, puede ser considerada como una base para determinar aquellos analitos que pueden estar afectando la calidad de suelo del Distrito de Madrigal.
- Se propone como una aplicación de este tipo de relave, su uso como backfill, proceso de relleno con material aquellos trabajos creados en los trabajos de minería; para ello será necesario realizar estudios de velocidad de sedimentación y velocidad de percolación.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Ministerio de Energía y Minas, *Anuario Minero*, 2014.
- [2] S. L. Flores Chávez, *Estudio integral y técnicas de remediación de la relavera de flotación de minerales polimetálicos de Ticapampa*, 2012.
- [3] E. I. M. León, *Aplicación de Relaves como agregado para el concreto*, 2015.
- [4] A. A. Romero y S. L. Flores, *Reuso de relaves mineros como insumo para la elaboración de agregados de la construcción para fabricar ladrillos y baldosas*, 2010.
- [5] Ministerio de Energía y Minas, *Inventario de Minas Inactivas del Departamento de Arequipa*, 2001.
- [6] J. D. Villacorta Gutierrez, *Relavera - Mina Inactiva Madrigal*, 2013.
- [7] N. Manrique, *Colonialismo y Pobreza Campesina: Caylloma y el Valle del Colca Siglos XVI - XX*, 1986.
- [8] S. Charpentier y J. Hidalgo, *Las Políticas Ambientales en el Perú*, Lima, 1999.
- [9] N. A. R. Morandé, *Guía Técnica de Operación y Control de Depósitos de Relaves*, 2007.
- [10] Banco Mundial - Programa de Asistencia Técnica al Ministerio de Energía y Minas del Perú, *Guía Ambiental para el Manejo de Relaves Mineros*.
- [11] T. Bustamante y L. Rommel , *El Dorado o la Caja de Pandora: Matices para pensar la minería en Ecuador*, 2010.
- [12] Cementos Bio Blo, *Cementos, fabricación y clasificación*.
- [13] Universidad de Castilla - La Mancha, *Cementos*.
- [14] A. Polzinetti, *Cemento Portland*.
- [15] Cemento Yura, *Cemento Portland Puzolánico IP*.
- [16] A. Enseñat de Villalonca, *La industria del cemento dentro de la problemática de la contaminación atmosférica*.
- [17] Pontificia Universidad Católica de Valparaíso - Facultad de Geotecnia, *Manual de Laboratorio: Relación Densidad - Humedad*.

- [18] L. Quintero Ortiz, J. Herrera, L. Corzo y J. García, *Relación entre la resistencia a la compresión y la porosidad del concreto evaluada a partir de parámetros ultrasónicos*, 2011.
- [19] L. Bañón Blázquez, *Manual de Carreteras*.
- [20] A. Lozano, *Martillo Schmidt (Esclerómetro)*.
- [21] Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, *Cemento y Concreto resistentes a sulfatos*.
- [22] Universidad de Oviedo, *Resistencia a los Sulfatos*.
- [23] M. J. Sánchez de Rojas, *Extracción electroquímica de cloruros del hormigón armado*.
- [24] Ministerio de Energía y Minas del Perú, *Guía para el Diseño de Tapones para el Cierre de Labores Mineras*, Lima, 2007.
- [25] J. Buzón Ojeda, *Fabricación de Adoquines para uso en vías peatonales, usando cuesco de palma africana*.
- [26] R. Miranda Ortiz y R. C. Calle Alarcón, *Bases hacia el desarrollo sostenible: Ventajas y aplicaciones de los pavimentos de adoquines de concreto en centros históricos y alrededores de las principales ciudades y aeropuertos de la Macroregión Sur como una alternativa de pavimento durable.*, 2012.
- [27] Revista Minería - Instituto de Ingenieros de Mineas del Perú, *Colquirrumi: Cierre de Pasivos Ambientales*, 2015.

ANEXOS

A. PANEL FOTOGRÁFICO DEL SITIO DE ESTUDIO



Anexo A - Foto 1. Distrito de Madrigal, Provincia de Caylloma, Departamento de Arequipa



Anexo A – Foto 2. Suelo contaminado con relave



Anexo A – Foto 3. Muestreo de calidad de suelo mediante la técnica de Distribución Sistemática al Azar



Anexo A – Foto 4. Relave minero en abandono



Anexo A – Foto 5. Partición y obtención de muestra representativa para análisis químico



Anexo A – Foto 6. Muestras de relave R1, R2, R3, R4 y R5 a ser analizadas

B. PANEL FOTOGRÁFICO DEL LABORATORIO FÍSICO - MECÁNICO



Anexo B – Foto 1. Serie de tamices utilizados en el ensayo de granulometría



Anexo B – Foto 2. Obtención de 500 g de muestra para su uso en el tamizador mecánico



Anexo B – Foto 3. Tamizador mecánico



Anexo B – Foto 4. Determinación del peso específico del relave con el proctor estándar



Anexo B – Foto 5. Adición de Carburo de Calcio (CaC_2) al Speedy. Ensayo para la determinación de la Humedad



Anexo B – Foto 6. Mezcla de cemento, relave y agua



Anexo B – Foto 7. Llenado y enrasado de probetas



Anexo B – Foto 8. Probetas para ensayo de resistencia



Anexo B – Foto 9. Proceso de curado y vaciado de probetas



Anexo B – Foto 10. Ensayo de resistencia con el Martillo Schmidt



Anexo B – Foto 11. Probetas en el día 28 después del vaciado. Última prueba de resistencia



Anexo B – Foto 12. Pesado de muestra en proctor estándar. Determinación de Densidad Seca Máxima



Anexo B – Foto 13. Pesado de la muestra de 50g luego de haber sido secada en el horno



Anexo B – Foto 14. Probetas de 40% y 50% sumergidas en agua para el ensayo de Porosidad

C. CERTIFICADOS DE ENSAYOS

I. ENSAYO QUÍMICO



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTÍN DE AREQUIPA
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y FORMALES
Unidad de Producción de Bienes y Prestación de Servicios
Laboratorio SERVILAB

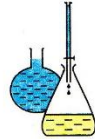


INFORME DE ENSAYO FÍSICO QUÍMICO

Nº DE REPORTE: 15682-15

NOMBRE DEL CLIENTE	: CLAUDIA ARENAS TEJADA
DIRECCIÓN	: AREQUIPA
ASUNTO	: ANÁLISIS FÍSICO QUÍMICO
PRODUCTO	: RELAVE
CANTIDAD DE MUESTRAS	: 01
LUGAR Y FECHA DE RECEPCIÓN	: AREQUIPA, 2015-10-16
CARACTERÍSTICAS Y CONDICIONES	: BOLSA DE PLÁSTICO
FECHA DE ENTREGA DE RESULTADOS	: AREQUIPA, 2015-10-27
REFERENCIA	: MUESTRA PROPORCIONADA POR EL CLIENTE
PROCEDENCIA	: EL MADRIGAL - CAYLLOMA
OBRA	
CODIGO DE REGISTRO DE MUESTRA	: 20634

- LOS RESULTADOS OBTENIDOS CORRESPONDEN AL ANÁLISIS SOLICITADO EN LA MUESTRA RECIBIDA.
- ESTE FORMATO NO SERÁ REPRODUCIDO SIN AUTORIZACIÓN DEL LABORATORIO SERVILAB



INFORME DE ENSAYO


N° DE REPORTE: 15682-15

DETERMINACIÓN DE :					
Humedad	%	18,43			
Cloruros	mg/1000 g	205,00			
Sulfatos	mg/1000 g	10544,86			
Plomo	mg/1000 g	1043,84			
Cinc	mg/1000 g	1518,31			
Cobre	mg/1000 g	323,59			
Plata	mg/1000 g	0,57			
Hierro	mg/1000 g	35111,05			
OBSERVACIONES:					

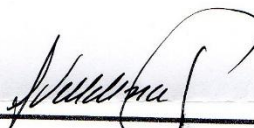
DETERMINACIÓN	METODO DE ENSAYO	
	METODO DE ENSAYO APLICADO	NORMA /REFERENCIA / NOMBRE
Humedad.	Método 2.013 de la AOAC	
Cloruros	Método Mercurimétrico (1, 2)	33.067 de la AOAC
Sulfatos	Método Turbidimétrico (1, 2)	de la AOAC
Plomo	Método de Absorción Atómica.	
Cinc	Método de Absorción Atómica.	
Cobre	Método de Absorción Atómica.	
Plata	Método de Absorción Atómica.	
Hierro	Método de Absorción Atómica.	

Emitido en Arequipa (Perú), el 26 de Octubre del 2015.

PAGINA 2 DE 2


 P MSc. Adriana Larrea Valdivia
 Jefe de Laboratorio
 RCQP - 479




 Lic. Fredy Valdivia Peña
 Químico Responsable
 RCQP - 842

II. ENSAYO FÍSICO – RESISTENCIA



UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN AGUSTIN
DE AREQUIPA

Av. Independencia s/n - Area Ingenierias



FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
LABORATORIO DE CONCRETO Y EMC
Teléfono N° 299992

ENSAYO: COMPRESION SIMPLE

SOLICITA CLAUDIA NANCY ARENAS TEJADA
 OBRA TESIS "INVESTIGACION TECNOLOGICA SOBRE EL USO DE RELAVES COMO AGREGADO DEL CEMENTO"
 UBICACIÓN UNIVERSIDAD ALAS PERUANAS
 MUESTRA **PROBETAS DE CONCRETO ESTANDAR (4" x 8")**
 NORMA ASTM C 39-96; NTP 339.034
 EXPEDIENTE 20-2350
 FECHA AREQUIPA 2016, ENERO 15

FECHA DE VACIADO	ESPECIFICACION DE MUESTRA	FECHA DE ENSAYO	EDAD Dias	DIAMETRO cm.	CARGA kg	ESFUERZO DE ROTURA f'c= kg/cm ²	ESFUERZO DE ROTURA f'c=MPa
25/10/2015	40%C	15/01/2016	82	10,50	26535	306	30,01
25/10/2015	50%A	15/01/2016	82	10,52	30617	352	34,52
18/10/2015	66%B	15/01/2016	89	10,54	25175	289	28,34
18/10/2015	70%A	15/01/2016	89	10,58	22226	253	24,81

NOTA

Las Probetas Cilíndricas fueron colocadas en el Laboratorio por el solicitante.

Laboratorio de Concreto y Ensayo de Materiales
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL - UNSA

Ing. Jorge A. Inuri Pérez
JEFE DE LABORATORIO
CIP N° 37242

D. FENÓMENOS EROSIVOS EÓLICOS

EROSIÓN EÓLICA DEFINICIÓN Y CONSECUENCIAS
<p>Se entiende por erosión eólica el proceso de disgregación, remoción y transporte de las partículas del suelo por la acción del viento. El movimiento de las partículas se produce por acción del viento y puede ser, en función de su tamaño, rodando (>0,5 mm), por saltación (0,05-0,5 mm), o en suspensión (< 0,1 mm).</p> <p><i>Daños producidos por la erosión eólica:</i></p> <ol style="list-style-type: none">a. Superficiales: La acción de los vientos determina una erosión que conllevan acciones superficiales para los cultivos, causando una serie de daños.<ul style="list-style-type: none">- Arranque de tierra dejando al descubierto el sistema radicular o semillas sin germinar.- Recubrimiento de pastos y sembrados.- Aterramiento de superficies agrícolas e industriales.- Transporte de partículas contaminadas (como es el caso de lo ocasionado por la Relavera Abandonada de la Mina Madrigal)b. Edáficos: Se corresponden con las acciones que alteran, destruyen o transforman las texturas de los suelos. El viento arranca y transporta limo, arcilla y materia orgánica fundamentalmente, dejando in situ las fracciones gruesas. De esta forma el suelo queda más arenoso y, por tanto, más susceptible de erosión. Estos efectos suelen ser irreversibles o de difícil y costosa solución.c. Secundarios: Como efectos secundarios podemos enumerar los siguientes:<ul style="list-style-type: none">- Posible transporte de materiales salinos, principalmente yeso y sales de sodio hacia zonas de cultivo, cuya consecuencia es contribuir a salinizar los suelos en que se asientan.- Pérdida de fósforo, pudiendo ocasionar alteraciones serias en los suelos.- Desecación del suelo. <p>En conjunto, los efectos causados por la erosión eólica conducen a una degradación paulatina de los recursos edáficos y una alteración lenta pero continuada del medioambiente. La erosión eólica determina una nueva distribución de las partículas superficiales, originando una esqueletización de los suelos, a la vez que una homogeneización en el tamaño de las partículas transportadas. Estos efectos se han definido como eolización y conllevan no sólo la destrucción del suelo, sino también la formación de nuevos depósitos superficiales que se incorporan a otros suelos.</p>

E. DAÑO AL MEDIO AMBIENTE POR SUSPENSIÓN DE RELAVES

MOVILIDAD DE METALES PESADOS EN SEDIMENTOS PROVENIENTES DE RELAVES EN ABANDONO

El estudio “Evaluación de la movilidad de metales pesados en sedimentos de Quebrada en el entorno de la Mina Madrigal mediante el método de especiación química”, sostiene que el estudio de los metales pesados en los sedimentos de la zona de Madrigal tiene una especial finalidad por tratarse de una zona con presencia minera; así mismo establecen la necesidad de evaluar la capacidad que tienen los metales pesados para movilizarse.

En el estudio también se determina que el factor de movilidad del Cadmio, Arsénico, Cobre, Zinc y Plomo, se encuentran dentro de un rango medio a muy alto, estableciendo que existe riesgo de contaminación puesto que los elementos están en una fase móvil dentro del ambiente geológico de la zona y bajo las condiciones ambientales existentes.

Se propone que para la situación actual de la Relavera abandonada de la Mina Madrigal es necesario estabilizar el depósito de relaves secos que posee más del 75% de sólidos por peso, cuyo tamaño de grano se encuentra entre arena y limo, esto mediante el uso de cobertura con geomembranas.

Así mismo, para lograr la estabilidad física de los relaves abandonados en la zona, lo que implica la prevención de derrumbes, control de polvo y erosión eólica, se pueden utilizar técnicas como una cubierta de vegetación, bloques de piedra y estabilización con berma de pie.