

*Universidad Nacional*  
*"José Faustino Sánchez Carrión"*



**FACULTAD DE INGENIERIA QUÍMICA Y METALURGICA**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA METALÚRGICA**

**TESIS**

**"EVALUACIÓN Y TRATAMIENTO DEL RELAVE EN LA PLANTA  
CONCENTRADORA DE LA MINERA AURIFERA 04 DE ENERO  
S.A. (MACDESA) – AREQUIPA 2020"**

**PRESENTADO POR:**

**EVELYN MARIA TASAYCO GONZALES**

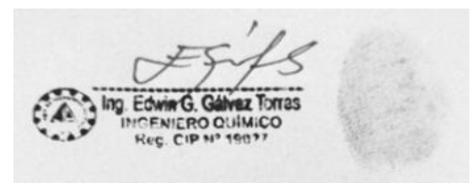
**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO METALÚRGICO**

**ASESOR :**

**Dr. EDWIN GUILLERMO GALVEZ TORRES**

**Reg. C.I.P. N° 95579**

**Ciudad Universitaria, Setiembre 2020**



## Huacho - Perú

### DEDICATORIA

#### **A DIOS:**

A quien debo la luz de mi existencia, por haberme puesto en este mundo y permitirme admirar los secretos de la sabiduría.

#### **A mis padres:**

Por permitirme dar la oportunidad de desarrollarme como un Futuro Profesional de bien al servicio de la Nación.

#### **A mi Esposa e Hija:**

Quien con su apoyo incondicional en mi formación profesional y logro de mis aspiraciones son fuente inagotable de estímulo y superación.

## **AGRADECIMIENTO**

El agradecimiento a la Empresa Minera Aurífera 4 de Enero (MACDESA), por darme la oportunidad de iniciarme y contar con experiencia profesional que me ha valido para poder realizar la presente investigación y a todos los docentes de la UNJFSC, y personas que han colaborado de una u otra manera en el desarrollo de la presente investigación.

**Evelyn María**

# INDICE

	<b>Pág.</b>
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTO	iii
INDICE	iv
INDICE DE FIGURAS	ix
INDICE DE TABLAS	x
RESUMEN	xi
ABSTRACT	xiii
INTRODUCCIÒN	xv
<b>CAPITULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA</b>	<b>01</b>
1.1 DESCRIPCIÒN DE LA REALIDAD PROBLEMÁTICA	01
1.2 FORMULACIÒN DEL PROBLEMA	04
1.2.1 Problema General	04
1.2.2 Problemas Específicos	04
1.3 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÒN	05
1.3.1 Objetivo General	05
1.3.2 Objetivos Específicos	05
1.4 JUSTIFICACIÒN DE LA INVESTIGACIÒN	05
1.4.1 JustificaciÒn Práctica	05
1.4.2 JustificaciÒn Legal	06
1.4.3 JustificaciÒn Socio-Económica	06
	<b>iv</b>

1.4.4	Justificación Social	06
1.4.5	Justificación Cultural	06
1.4.6	Justificación Tecnológica	06
1.4.7	Justificación Política-Administrativa	07
1.5	Delimitaciones del Estudio	07
1.5.1	Delimitación Especial	07
1.5.2	Delimitación Temporal	07
1.5.3	Delimitación Teórica	08
1.6	Viabilidad del Estudio	08
1.6.1	Legal	08
1.6.2	Recursos Humanos, personal adecuado como	08
1.6.3	Recursos materiales y equipos	09
<b>CAPITULO II: MARCO TEÓRICO</b>		<b>10</b>
2.1	ANTECEDENTES DE LA EMPRESA MINERA AURIFERA CUATRO DE ENERO (MACDESA)	10
2.1.1.	Ubicación	11
2.1.2.	Estructura Organizacional	13
2.1.2.1.	Directorio	13
2.1.2.2.	Plana Ejecutiva	13
2.1.3.	Visión y misión de la empresa	14
2.1.3.1.	Visión	14
2.1.3.2.	Misión	14
2.1.4.	Producto o servicio principal que ofrece la empresa	15

2.1.5.	Proceso productivo de la empresa	15
2.1.5.1	Descripción de los Procesos	15
2.2	ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN	26
2.2.1	Investigaciones nacionales	26
2.2.2	Investigaciones internacionales	32
2.3	BASES TEÓRICAS	35
2.3.1	Sociedad moderna y relaves mineros	35
2.3.2	Relave	38
2.3.3	Descarga de los relaves	40
2.2.4	Manejo de relaves	41
2.3.5.	Métodos de presas de relave	44
2.3.5.1.	Método aguas abajo	44
2.3.5.2.	Métodos de eje central o línea central	45
2.4	DEFINICIONES CONCEPTUALES	45
2.5	FORMULACIÓN DE LA HIPÓTESIS	47
2.5.1	Hipótesis General	47
2.5.2	Hipótesis Específicas	47
2.6.	OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES	47
2.7.	DISPOSICIÓN DE LOS RELAVES	48
2.7.1.	Disposición de residuos sólidos	48
2.7.2.	Disposición de relaves	48
	<b>CAPITULO III: METODOLOGÍA</b>	<b>52</b>
3.1	DISEÑO METODOLÓGICO	42

3.1.1	Tipo	52
3.1.2	Diseño de la investigación	52
3.2	POBLACIÓN Y MUESTRA DEL ESTUDIO	53
3.2.1	Población	53
3.2.2	Muestra	53
3.3	TECNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS	54
3.4	TÉCNICAS PARA EL PROCEDIMIENTO DE INFORMACIÓN	54
	<b>CAPITULO IV: RESULTADOS</b>	<b>60</b>
4.1	RELAVE	60
4.1.1.	Objetivos	60
4.1.2	Disposición del relave	60
4.1.3	Sistema de Bombeo de Agua (recirculación de la solución barren)	61
4.2	DISPOSICIÓN DE RELAVES	61
4.2.1.	Disposición de Relaves de Cianuración	61
4.2.2	Instalación	62
4.2.2.1.	Preparación de la Sub Rasante	62
4.2.2.2.	Excavación y relleno de la trinchera de anclaje	62
4.2.2.3.	Transporte y almacenamiento	62
4.2.2.4.	Despliegue	63
4.2.2.5.	Colocación	63
4.3	RESULTADOS	65
	<b>CAPITULO V: DISCUSIÓN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>71</b>
5.1.	DISCUSIÓN	71

5.2.	CONCLUSIONES	73
5.3.	RECOMENDACIONES	73
	<b>CAPITULO VI: FUENTES DE INFORMACIÓN</b>	<b>75</b>
6.1	FUENTES BIBLIOGRÁFICAS	75
	<b>ANEXOS:</b>	
	Anexo 1: Matriz de consistencia	77

## INDICE DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
<b>Figura N° 1:</b> Auditorio construido por Macdesa para la capacitación de sus accionistas/trabajadores	11
<b>Figura N° 2:</b> Ubicación de MACDESA	12
<b>Figura N° 3:</b> Ubicación geográfica	12
<b>Figura N° 4:</b> Organigrama General	13
<b>Figura N° 5:</b> Circuito de Chancado	16
<b>Figura N° 6:</b> Diagrama de flujo - área de molienda de la planta de beneficio MACDESA	17
<b>Figura N° 7:</b> Instrucciones de Trabajo del Jefe de Turno	23
<b>Figura N° 8:</b> Preparación de muestras provenientes de mina y planta	24
<b>Figura N° 9:</b> Análisis de soluciones, método chiddy	25
<b>Figura N° 10:</b> Diseño del Depósito de Relave, método línea central	51
<b>Figura N° 11:</b> Cancha de relaves	61
<b>Figura N° 12:</b> Modelo de Torrealba – Kalinsky – Paredes	64
<b>Figura N° 13:</b> Modelo para Diseño de Anclajes Geomembrana	68

## INDICE DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla N° 1:</b> Principales Insumos en la etapa de refinación	19
<b>Tabla N° 2:</b> Dosificación de Insumos para el área de Laboratorio Químico	21
<b>Tabla N° 3:</b> Porcentaje de sólidos, volumen y consistencia de relaves	40
<b>Tabla N° 4:</b> Operacionalización de variables	48
<b>Tabla N° 5:</b> Características de la presa final	49
<b>Tabla N° 6:</b> Factores de seguridad Mínimos para Análisis de Estabilidad Física en Presas de Tierra	58
<b>Tabla N° 7:</b> Valores Utilizados Para Cálculo de Tasas y Reducción de Fugas en Geomembrana	66
<b>Tabla N° 8:</b> Valores Utilizados Para Cálculo de Espesor de Geomembrana	67
<b>Tabla N° 9:</b> Resultados Cálculo Espesor Geomembrana	68
<b>Tabla N° 10:</b> Bases de Diseño Anclaje	69

## RESUMEN

Esta investigación está diseñado para proporcionar mejoras en la estabilidad física de los desechos minerales generados por todas las plantas de procesamiento de minerales que procesan minerales de nuestros recursos naturales. Creo que es un tema ambiental que algunas empresas mineras no se toman en serio. Como resultado, la cola de la mina no se procesa adecuadamente, se produce la licuefacción y el muro de contención se debilita. Esto está relacionado con la contaminación de suelos y ríos. Causando problemas sociales con la comunidad circundante, también contamos con leyes y regulaciones ambientales para crear un ambiente sustentable en las PyMEs. El propósito del documento es definir y explicar la evaluación de las colas mineras en la planta de procesamiento de minerales MACDESA. responde a una necesidad académica, social y económica del país; inversión en el sector minero para alcanzar un desarrollo sostenible para la provincia de Caraveli - Arequipa, área circundante de los trabajos de explotación del proyecto MACDESA y su procesamiento. Huacho 2020. Método: en campo, se prueba a fondo. El objetivo presentado en este estudio, que busca demostrar la evaluación de los residuos mineros y su almacenamiento en la instalación beneficiaria MACDESA, establece la relación entre estas variables y su tamaño. Los resultados obtenidos son los siguientes: Utilizar los bordes de los materiales prestados para acumular residuos aguas abajo y utilizar ciclones líquidos para asegurar la estabilidad de los residuos ante posibles terremotos. El objetivo de la obra es incidir en la estabilidad física de la presa de relaves N ° 2, las modificaciones a realizar en el diseño, el sistema de tratamiento de relaves, la restauración de su cuerpo de agua y los parámetros constructivos. Resultados: Ante problemas sísmicos, la acumulación de residuos se realiza aguas abajo, en el

borde del material prestado, y un ciclón líquido para garantizar la estabilidad de los residuos.

Conclusión: Existe una relación directa entre las dos variables entre la evaluación de los residuos mineros y su tratamiento, y una hipótesis específica que confirma esta relación, los residuos mineros como factor estático y virtual de 1. 71. Hay un factor de seguridad obtenido en el No. 2. De acuerdo con las Pautas de Medio Ambiente Sostenible, el valor mínimo de 1.066 excede el gradiente de residuos sólidos de la mina (VEA). Lima, agosto de 2000), que garantiza un depósito físicamente estable de Relaves # 2.

Palabra clave: Relave minero. Evaluación, Tratamiento. Planta de beneficio.

## **ABSTRACT**

This research is designed to provide improvements in the physical stability of mineral waste generated by all mineral processing plants that process minerals from our natural resources. I think it is an environmental issue that some mining companies do not take seriously. As a result, the mine tail is not processed properly, liquefaction occurs, and the retaining wall is weakened. This is related to the contamination of soils and rivers. Causing social problems with the surrounding community, we also have environmental laws and regulations to create a sustainable environment in SMEs. The purpose of the document is to define and explain the assessment of tailings at the MACDESA mineral processing plant. responds to an academic, social and economic need of the country; investment in the mining sector to achieve sustainable development for the province of Caraveli - Arequipa, the surrounding area of the MACDESA project exploitation works and its processing. Huacho 2020. Method: in the field, it is thoroughly tested. The objective presented in this study, which seeks to demonstrate the evaluation of mining waste and its storage in the MACDESA beneficiary facility, establishes the relationship between these variables and their size. The results obtained are as follows: Use the edges of the borrowed materials to accumulate waste downstream and use liquid cyclones to ensure the stability of the waste against possible earthquakes. The objective of the work is to influence the physical stability of tailings dam No. 2, the modifications to be made in the design, the tailings treatment system, the restoration of its body of water and the construction parameters. Results: Faced with seismic problems, the accumulation of waste is carried out downstream, at the edge of the borrowed material, and a liquid cyclone to guarantee the stability of the waste. Conclusion: There is a direct relationship between the two

variables between the evaluation of mining waste and its treatment, and a specific hypothesis that confirms this relationship, mining waste as a static and virtual factor of 1. 71. There is a safety factor obtained in No. 2. According to the Sustainable Environment Guidelines, the minimum value of 1,066 exceeds the mine's solid waste gradient (VEA). Lima, August 2000), which guarantees a physically stable deposit of Tailings # 2.

**Keyword:** Mining tailings. Evaluation, Treatment. Benefit plant.

## INTRODUCCIÓN

La presente investigación sobre la evaluación y tratamiento del relave en la planta concentradora de la minera aurífera 04 DE ENERO S.A. (MACDESA) – AREQUIPA 2020, tiene su propósito es que pueda ser usada como un documento de referencia y soporte técnico para ayudar en la preparación de los Estudios de Impacto Ambiental y los Programas de Adecuación y Manejo Ambiental (PAMA) según lo requiere la regulación para la protección ambiental en las actividades mineras y metalúrgicas (DS No. 016-93-EM) y su modificación (DS No. 059-93EM). En una perspectiva a largo plazo, se propone ayudar a la industria, a los consultores, y al personal del gobierno a comprender el amplio y complejo problema asociado con el manejo de los relaves, enfatizando no sólo las condiciones operacionales sino también aquellas posteriores a la clausura. Para este fin, se orienta primariamente hacia lectores que tienen diversas experiencias técnicas con poco contacto con los tópicos tratados. A excepción de unos pocos factores de particular importancia, los detalles pertinentes a la investigación y análisis no son tratados explícitamente, pero se hace referencia a ellos en la literatura técnica respectiva.

Este renovado interés en la minería en el siglo XXI en sus diversos aspectos económicos, sociales y ambientales está asociado a los cambios profundos en el sector y a sus múltiples impactos en nuestro país. Las reformas de la década de 1990 eliminaron a las empresas estatales y promovieron la inversión privada y extranjera, resultando en cambios dramáticos en la estructura de propiedad y en una acelerada expansión geográfica de la minería a nivel nacional. Esta expansión contribuyó al notable crecimiento económico peruano y ha llegado a aportar el 13% del PBI entre 1995 y 2015, además de representar más del 75% del valor total de exportaciones entre

2002 y 2015 (Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería, Osinergmin, 2017). Hoy el Perú se encuentra entre los principales productores mundiales de cobre, plomo, zinc, estaño, plata y oro. Y mientras la minería estuvo concentrada en regiones del centro y sur del país antes de la década de 1990, con estos cambios, las regiones del norte, debido a su enorme riqueza mineralógica, también se han convertido en un creciente foco de atracción para la minería transnacional. Esta transformación y la expansión territorial de la minería en el país ha venido acompañada de mayores riesgos ambientales y conflictos sociales. Las tensiones alrededor de las actividades mineras se concentran en lo que la Defensoría del Pueblo denomina como «conflictos socioambientales», los cuales involucran enfrentamientos entre la población local y las empresas que operan en los territorios que ella ocupa, incluyendo disputas sobre tierras, agua, medios de transporte y contaminación. Este tipo de conflictos, muy distintos de los laborales, ha pasado de representar alrededor del 48% del total de conflictos sociales registrados por la Defensoría en 2008 a más del 65% en 2019 (Defensoría del Pueblo, 2008, 2019). No debe sorprendernos, entonces, que tanto el crecimiento del sector minero como sus múltiples impactos en la sociedad sean materia de estudio en la realidad peruana. También considera el establecimiento de mega empresas en el sur peruano, la mayor visibilidad de la minería artesanal, el desarrollo de una creciente institucionalidad ambiental y la incorporación de mecanismos de consulta y participación a las poblaciones afectadas, entre varias otras. La tarea de actualizar y sistematizar el conocimiento sobre la minería se vuelve aun más necesaria al considerar la nueva hoja de ruta plasmada por dicho sector en «Visión de la minería en el Perú hacia el 2030» (Grupo Visión Minera 2030, 2019). Esta nueva visión busca articularse con los Objetivos del Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas, por lo cual es necesario discutir la correspondencia entre sus propuestas y los hallazgos de la evidencia empírica.

El depósito de relaves de la Minera Aurífera 04 de Enero S.A., ubicada en Arequipa, Perú, almacena relaves en dos depósitos que están integrados, uno para relaves de flotación y el otro para relaves de cianuración; el almacenamiento se efectúa por el método de eje central. El propósito de este estudio fue determinar la estabilidad física durante la fase de operación, encaminada a controlar la cantidad y calidad de los relaves, la altura y calidad de la membrana geotérmica utilizada; mantener el espejo de aguas alejada del dique; conservar el desnivel entre la corona del dique y el nivel de espejo de aguas sobre una altura mínima de dos metros (borde libre); detectar deformaciones o asentamientos, filtraciones anormales o presencia de grietas. Los resultados de los factores de seguridad para ambos depósitos de relaves arrojan valores superiores a los factores de seguridad mínimos requeridos por la legislación vigente, por lo que se concluye que ambas estructuras son físicamente estables, tanto en condiciones estáticas como pseudo-estáticas.

# CAPITULO I

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

### 1.1. Descripción de la Realidad Problemática.

Existe una preocupación ambientalista a nivel mundial en cuanto a la evaluación y tratamiento de relaves mineros; Productos de la explotación de recursos naturales lleva hacer un procedimiento validado por las autoridades del Ministerio de Energía y Minas (MEM) donde se aplica con mayor frecuencia en aquellos países en donde abundan los minerales valiosos comerciables.

La Planta Concentradora de la Empresa MACDESA se encuentra ubicada en la región Arequipa, provincia de Caraveli, distrito de Chaparra en una zona eriaza, a una altitud aproximada de 760 m.s.n.m. a unos 35 km. de la ciudad de Huacho, provincia de Huaura; departamento y región Lima.

La minería desarrollada en Empresa Minera MACDESA, es minería convencional, su minado es subterráneo y su diseño está dado por blocks de 40 m. De longitud y el ancho de la labor es aproximadamente 1.2 m. (Con proyección a 39 disminuir a 0.80 m.) en tanto que la altura de estos blocks o tajeos está limitado por los niveles que son entre 30 y 50 m. En explotación se viene aplicando el método de “corte y relleno Ascendente”; con el uso de puntales de seguridad (redondas de madera de 6” de diámetro por 1.20 m.) que van sosteniendo las cajas. El yacimiento de cuatro horas fue explotado en forma artesanal desde el año 1980, desarrollando una explotación a base de puntas (cinceles) y combas, posteriormente fueron organizándose hasta formar una asociación de mineros denominada ADEMIC donde su explotación empieza a realizarse en base a pistolas Bosch para el des

quinche y la perforación, actualmente se viene utilizando máquinas perforadoras JackLeg. La empresa viene desarrollando sus operaciones en tres zonas de mayor importancia (San Martin-Victoria-Esperanza) cuyas operaciones son de preparación y desarrollo de labores con producción (Tabla 3.1 y el método de explotación aplicado en UEA Cuatro Horas MACDESA S.A. es CORTE Y RELLENO ASCENDENTE (OverCut And Fill).

El tratamiento de los minerales se realiza mediante métodos de chancado, molienda, flotación y secado de concentrados, accediendo a través de la infraestructura de obras civiles y preparaciones existentes y bajo el planteamiento de operación.

Los minerales son extraídos por minería subterránea de una veta a 4 Km de la planta concentradora, a través de los socavones y arrojado hacia los echaderos de tal forma que este mineral extraído es recogido y transportado en volquetes de 30 TM de capacidad hacia la Planta Concentradora.

El proceso metalúrgico a que se somete el mineral, son operaciones unitarias sucesivas de chancado, molienda, amalgamación, cianuración, CIP, desorción y fundición. La capacidad instalada de planta de beneficio es de 60 TM / D en promedio actualmente

El mineral transportado a la Planta de Beneficio, son acumuladas en una cancha de minerales con una capacidad para 700 TM., donde son trasladados a la parrilla con el cargador frontal. Posteriormente ingresan a la sección chancado primario y secundario, el mineral es reducido a ½ ” de tamaño y acumulado en la tolva de finos con una capacidad para 30 TM.

El mineral acumulado en la tolva de finos ingresa a la sección molienda a través de una faja transportadora, donde se tiene dos molinos primario y secundario para reducir a un tamaño de Malla -200 = 60%.

El mineral en forma de pulpa ingresa a la sección flotación a través del Over Flow del hidrociclón donde obtendremos dos productos: el concentrado valioso y comerciable en el mercado internacional y los relaves sin valor económico.

En la Planta de Beneficio de minerales, existe un control de monitoreo para los relaves finales que son depositadas en unas pozas protegidas por una geo membrana de 0.7 mm de espesor, las aguas de relaves que son acumuladas en las pozas son recirculadas al proceso a través de una bomba de agua.

Las actividades mineras en nuestro país requieren una infraestructura de diseño de equipos, energía, cancha de relave, agua entre otros requiriendo una gran inversión.

Cancha de relave antes no se le daba tanta importancia, hoy en día es nuestra carta de presentación en cuanto a la fiscalización MEM.

Dentro de estos relaves los encontramos con diferentes características, de acuerdo a su origen del mineral, su manejo es importante para evitar fugas y accidentes durante su tratamiento, evitar grietas que puedan afectar el medio ambiente, como a las comunidades cercanas a la planta de beneficio.

Cada día de tratamiento de minerales en una planta de beneficio, la producción de relaves va en aumento en forma exagerada, originando un problema ambiental como la contaminación de nuestros recursos naturales (agua, suelo y aire) en caso no lo controlamos en forma eficiente.

El problema de relave minero es muy complejo en las zonas de alto andino, donde las lluvias son constantes, que en algunas oportunidades han ocasionado la fuga de relave hacia los ríos, afectando la flora y la fauna y por ende problema social con las comunidades cercanas a las operaciones planta de beneficio.

La mejor solución a un problema es la prevención; la estrategia para la gestión adecuada de los residuos sólidos (relave minero) debe ser la evaluación y su tratamiento, cuyos objetivos es dar un tratamiento más vulnerable a cada posible falla por deslizamiento del dique de contención, determinar sus propiedades resistentes que conforman el dique y sus propiedades geotécnicas de los relaves donde se depositarán.

Cierre: El periodo de cierre comienza al término de las operaciones de la planta de beneficio y de la descarga de los relaves, se construye instalaciones adicionales para alcanzar la estabilidad física, por ejemplo, zanjas y conductos permanentes de derivación de agua y se inicia la rehabilitación por encapsulamiento, también debe incluirse el plan de contingencia para la suspensión temporal de las operaciones planta.

Post-cierre: Llamado también “abandono” comienza a continuación de culmina la medida de cierre, que se extiende para que la estabilidad física-química del depósito de relave quede asegurada. En la práctica significa que ello puede alcanzar periodos de hasta 1000 años (Abadjiev, C. 1985).

## **1.2. Formulación del Problema**

### **1.2.1. Problema General**

¿Qué relación existe entre evaluación del relave minero y su tratamiento en la planta de beneficio MACDESA – Arequipa 2020?

### **1.2.2. Problemas Específicos**

- ¿Qué relación existe entre los factores de seguridad estáticos y pseudoestáticos del relave minero y su tratamiento en la planta de beneficio MACDESA – Arequipa 2020?

- ¿Qué relación existe entre las propiedades resistentes de los materiales que conforman el dique del relave minero y su tratamiento en la planta de beneficio MACDESA – Arequipa 2020?
- ¿Qué relación existe entre las propiedades geotécnicas del relave minero y su tratamiento en la planta de beneficio MACDESA – Arequipa 2020?

### **1.3. Objetivos de la Investigación**

#### **1.3.1. Objetivo General**

Determinar la relación entre evaluación del relave minero y su tratamiento en la planta de beneficio MACDESA – Arequipa 2020.

#### **1.3.2. Objetivos Específicos**

- Determinar si los factores de seguridad estáticos y pseudoestáticos del relave minero afectan el tratamiento en la planta de beneficio MACDESA – Arequipa 2020.
- Determinar si las propiedades resistentes de los materiales que conforman el dique del relave minero afectan el tratamiento en la planta de beneficio MACDESA – Arequipa 2020.
- Determinar si las propiedades geotécnicas del relave minero afectan en el tratamiento en la planta de beneficio MACDESA – Arequipa 2020.

### **1.4. Justificación de la Investigación.**

#### **1.4.1. Justificación Práctica:**

El estudio de esta problemática proporcionará conocimientos acerca de tratamiento de relave minero de tal manera que asegure su estabilidad física en cumplimiento de las normas y el manejo de relaves.

#### **1.4.2. Justificación Legal:**

Su propósito es que pueda ser usado como un documento de referencia y soporte técnico para conseguir una ayuda en la preparación de estudios de Impacto Ambiental y Programas de Adecuación y Manejo Ambiental (PAMA) según lo requiere la regulación para la protección ambiental en las actividades mineras-metalúrgicas (DS N° 016-93-EM) y su modificación (DS N° 059-93-EM).

#### **1.4.3. Justificación Socio-Económica:**

Al realizar el siguiente proyecto se puede aprovechar para la fabricación de ladrillos, área verde con plantaciones de gras, entre otros en la superficie del relave de la planta de beneficio 2011-11.

#### **1.4.4. Justificación Social:**

Frente a ésta realidad minera, es concientizar a las comunidades cercanas a la planta beneficio 2011-II, que no existe contaminación ambiental por estar en zona alejada en un terreno eriazo y que se cumplen con las normas que estipula MEM.

#### **1.4.5. Justificación Cultural:**

Del presente proyecto se puede rescatar la confiabilidad del proceso de las operaciones planta, la educación ambiental que se les brinda a los trabajadores y población, así como el cuidado del medio ambiente.

#### **1.4.6. Justificación Tecnológica:**

Este proyecto mejorara y posibilitara el desarrollo de nuevas técnicas, instrumentos y equipos que mejoraran la estabilidad de muro de contención del dique y su estabilidad física de relave minero.

#### **1.4.7. Justificación Política-Administrativa:**

Los resultados, determinaran una toma de decisiones por parte de la DREM para una mejor confianza en proyectos futuros.

El propósito del siguiente trabajo de investigación es determinar en qué medida los cambios realizados en el diseño de ingeniería original, en lo que respecta al método de disposición, caracterización del relave minero y sus parámetros operativos, pueden afectar la estabilidad física del depósito de relaves N°3 y en caso de detectarse algún signo de debilidad, establecer trabajos con el fin de asegurar la estabilidad física del depósito. De modo que una vez asegurada se puedan disponer relaves en pulpa directamente de la planta de beneficio MACDESA – Arequipa 2020 y así conseguir una disposición de relaves en forma continua sin la necesidad de paralizar las operaciones planta.

De esta manera, la empresa que trata los minerales en la planta de beneficio MACDESA, tendrá las herramientas básicas que les permita mejorar sus condiciones como la estabilidad física de relave minero.

#### **1.5. Delimitaciones del Estudio:**

##### **1.5.1 Delimitación Especial**

Lugar	Comunidad de Chaparra.
Distrito	Cuatro de Enero
Provincia	Caraveli
Departamento	Arequipa

##### **1.5.2 Delimitación Temporal**

Año 2020

### **1.5.3 Delimitación Teórica**

Política Ambiental

Clasificación de sólidos y finos en relave.

Almacenamiento en depósito de relave minero.

Las restricciones son de tipo económico y la disponibilidad de laboratorios para los análisis de muestras constantes, la Empresa HTE SAC pertenece a La Pequeña Minería y Minería Artesanal, con un tratamiento hasta 25 toneladas métricas por día (TMPD), con recursos económicos limitados.

Como parte del proceso, se producen relaves de flotación, donde se señala que el depósito de relave N°1 culminó su ciclo.

- Se hicieron calicatas en el suelo para la toma de muestras y estar informado de sus características e información geológica proporcionada por una empresa privada, solicitada por el titular minero.
- No se realizaron sondeos diamantinos, pero si calicatas en los suelos donde se ubicara la cancha de relave minero N° 2.
- Se toman datos de lecturas a través del Piezómetro por una empresa especializada encargada de instalación, monitoreo e interpretación de las lecturas en mención.

## **1.6. Viabilidad del Estudio**

### **1.6.1. Legal**

La Ley General de Minería, aprobada por decreto Supremo N° 014-92-EM, publicada el 04-05-92-EM, publicada el 04-06-92.

### **1.6.2. Recursos Humanos, personal adecuado como**

- Técnicos capacitados en la toma de muestras.

- Asesor y jurados de Tesis.
- Investigador de la Tesis.

### **1.6.3. Recursos materiales y equipos**

Se cuenta con útiles de escritorio y oficina, también se cuenta con equipos inmobiliarios, equipos electrónicos, finalmente también se cuenta con un lugar de laboratorio donde se podrá realizar análisis de datos, cruzar información y realizar informes.

El proyecto tiene viabilidad técnica, está relacionada con la disponibilidad de los recursos materiales, económicos, humano y tiempo; además, se cuenta con la autorización de la empresa para realizar las investigaciones, ya que también es un aporte para dar soluciones en cuanto a la prevención de cuidado de relaves ante cualquier daño a la naturaleza, conservando la salud de sus trabajadores y poblaciones cercanas a la planta de beneficio MACDESA.

## **CAPITULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1 ANTECEDENTES DE LA EMPRESA MINERA AURIFERA CUATRO DE ENERO (MACDESA)**

La mina de Cuatro Horas, descubierta recientemente en los años 2001/2002, se ha convertido rápidamente en la comunidad minera artesanal más grande del "Sur Medio" del Perú, con más de 3000 habitantes. Su historia temprana como "reventazón" (gold rush) e "invasión" tenía rasgos de una "minería artesanal incontrolable" según la clasificación de E. Chaparro. La conformación de la empresa MACDESA ha cambiado el panorama a tal punto que Cuatro Horas se convirtió en uno de los poblados minero artesanal más ordenado y con mayor desarrollo de toda la zona.

Una vez aprobado el subproyecto, se dio una situación curiosa: Durante varios meses (de abril a junio 2005) los mineros no querían iniciar con su ejecución; hasta que un día informaron que para mejor aprovechamiento de la capacitación- habían terminado de construir un auditorio para 300 personas, equipado con sistema de sonido, proyector multimedia, etc.

La atención a un gran número de 300 a 400 participantes (con asistencia sostenida durante todas las charlas) ha -en cierta forma- absorbido parte del tiempo inicialmente previsto para un trabajo de acompañamiento dirigido a la directiva de la empresa. No obstante, el informe institucional de la Directiva de MACDESA, manifestó su conformidad con las actividades realizadas y los resultados alcanzados (considerando lo que mencionó el gerente de MACDESA en una reunión con GAMA: "*Nuestros accionistas son muy exigentes*").



Figura 1. Auditorio construido por Macdesa para la capacitación de sus accionistas/trabajadores

### **2.1.1 Ubicación**

#### **MACDESA “MINERA AURIFERA CUATRO DE ENERO S. A.”**

Esta Organización se fundó el 1999 como asociación y el año 2005 como empresa con 450 socios y un capital social de S/348,000.00 soles, se encuentra ubicada en el Centro Poblado de Cuatro Horas Distrito de Chaparra, Caravelí Arequipa, tiene un total de 990.00 hectáreas de concesiones mineras y un contrato de cesión de derechos por 400 hectáreas. Con una producción mensual de 4,500 Tm de mineral y producción de oro de 35.00Kg.

La empresa de mineros artesanales MACDESA, constituida por 350 accionistas trabajadores mineros, se encuentra explotando mineral en el paraje de Cuatro Horas, distrito de Chaparra, provincia de Caravelí, departamento de Arequipa; con el consentimiento de la empresa Titular minera con la que está negociando la firma de un nuevo contrato de explotación minera.

**Figura N° 02. Ubicación de MACDESA**

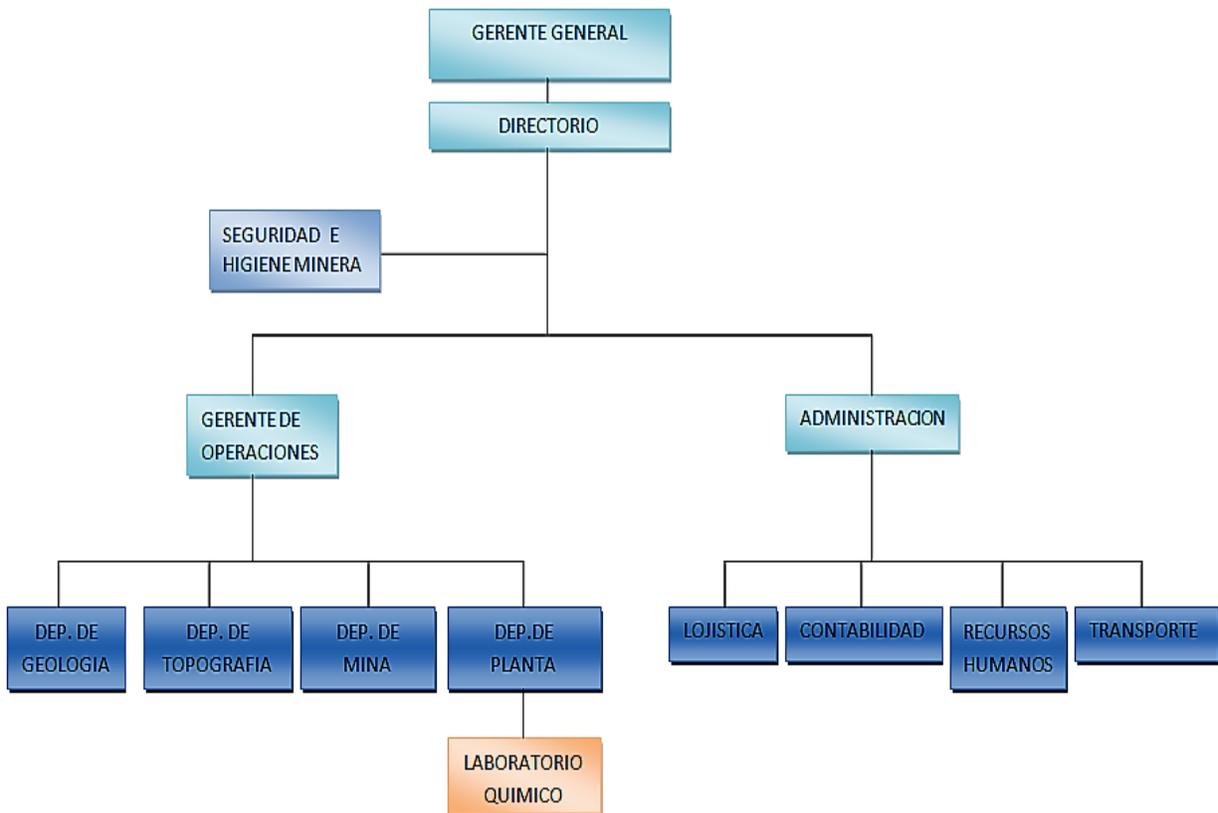


**Figura N° 03. Ubicación geográfica**



## 2.1.4. Estructura Organizacional

Figura N° 04. Organigrama General



### 2.1.2.1. Directorio

La política y la estrategia empresarial de la Empresa Minera Aurífera Cuatro de Enero S.A. son en primera instancia responsabilidad del Directorio de la empresa, cuyos integrantes son los encargados de orientar y visionar la perspectiva a seguir por todos y cada uno de sus integrantes.

### 2.1.2.2. Plana Ejecutiva

#### 1) Gerencia General

Lidera la gestión empresarial, es el primer estamento responsable por las diversas actividades desarrolladas dentro de la organización.

De la Gerencia General se desprenden regularmente de manera directa la Administración y Operaciones, es el área de la organización encargada de administrar eficientemente los recursos financieros de los que se dispone, así como también es la dependencia que jefatura y controla a los departamentos responsables de las actividades logísticas, de comercialización, administración de personal, registros contables, presupuesto y tesorería entre otras.

Área en que se desarrolló la presente investigación y que es la responsable de dirigir el conjunto de actividades que permiten la producción de oro y plata.

### **2.1.3. Visión y misión de la empresa**

#### **2.1.3.1. Visión**

Efectuar las actividades de la empresa con liderazgo, eficiencia y productividad, en un ambiente de trabajo seguro y saludable; formando trabajadores competitivos, de calidad, productividad y con plena conciencia de la importancia de la protección ambiental respetando los derechos y obligaciones de su entorno.

#### **2.1.3.2. Misión**

Ser una empresa competitiva a nivel nacional y formar parte del mercado internacional dedicándose eficientemente al desarrollo de sus vetas y procesos productivos siguiendo procedimientos seguros, cuidando la calidad, seguridad y el medio ambiente con responsabilidad social, proporcionando rentabilidades económicas, niveles favorables para la empresa y sus trabajadores.

#### **2.1.4. Producto o servicio principal que ofrece la empresa**

El Producto que ofrece esta Planta es oro refinado en un 99.99 % de pureza y también brinda servicio de análisis de muestras de minerales auríferos a terceros.

#### **2.1.5. Proceso productivo de la empresa**

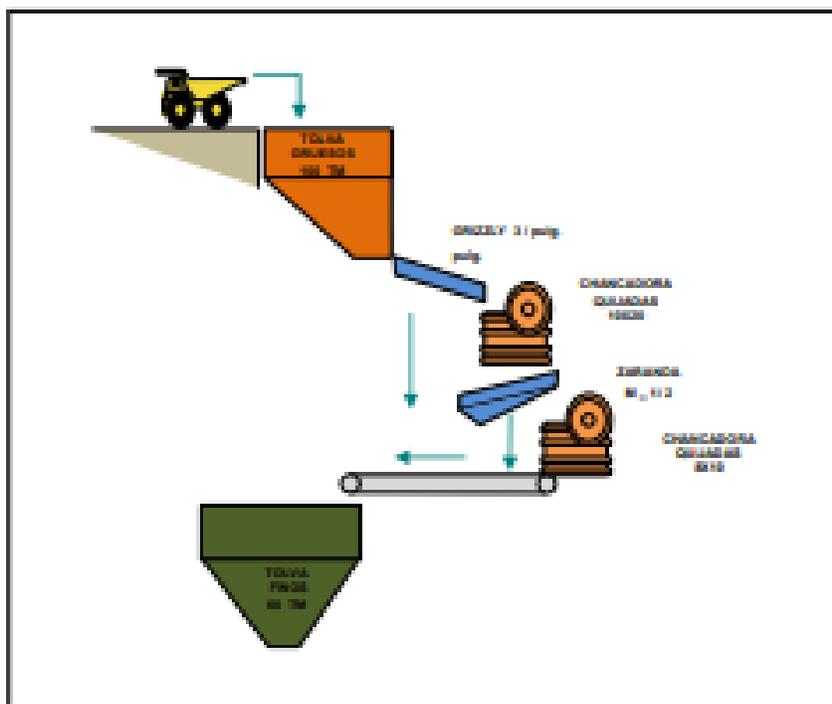
##### **2.1.5.1. Descripción de los Procesos**

La Planta de Beneficio MACDESA se encuentra ubicado en cuatro horas en el distrito de Chaparra, provincia de Caravelí, departamento de Arequipa. Tiene una capacidad de tratamiento de minerales a 120 TPD, utilizando para ello los procesos de Lixiviación-Adsorción Desorción- Electrodeposición, refinación y fundición para lo cual el mineral proveniente de las minas será pesado y almacenado en canchas de recepción, los que son separados de acuerdo a su procedencia.

##### **Chancado**

El circuito de Chancado estará conformado por una tolva de gruesos de 100 TM, una chancadora de quijadas primaria de 10"x20" y una chancadora de quijadas secundaria de 8"x 10", los que tratarán el mineral grueso provenientes de la mina, los cuales serán posteriormente reducidos a tamaños de - 1/2", los finos serán 71 almacenados en una tolva de 60 toneladas, los gruesos recircularán en el circuito de chancado. Este proceso se desarrollará de manera independiente y está adaptado a las características de acopio de mineral que proviene de operaciones mineras que se encuentran lejanas del área del proyecto.

Figura N° 5. Circuito de Chancado



### Molienda

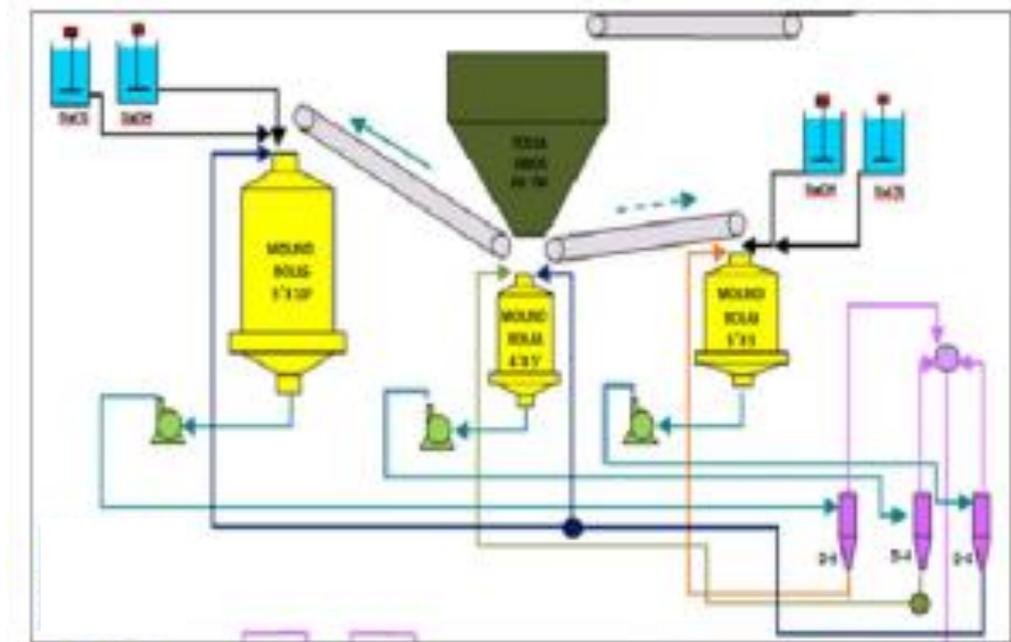
Los minerales producto del proceso de chancado y que tienen  $- \frac{1}{2}$  " serán transportados a la tolva de mineral fino ( $- \frac{1}{2}$  ") se trasladará el material por medio de una faja transportadora a la sección molienda, en la que existirá una molienda primaria y molienda secundaria integrada con sistemas de clasificación y recirculación de carga, utilizándose para ello hidrociclones. El circuito de molienda primaria estará conformado por 2 molinos de bolas destinados a la molienda del mineral que proviene de la sección chancado y que ingresará con una malla  $- \frac{1}{2}$  ", estos molinos tendrán las siguiente característica:

- 01 Molino de 5'x 10' (M-1)
- 01 Molino de 5' x 5' (M-2)

El circuito de molienda secundaria estará compuesto de otros 2 molinos que cumplirán las funciones de molienda del material fino acopiado para el tratamiento, estos molinos tendrán las siguientes características:

- 01 Molino de 5' x 5' (M-1)
- 01 Molino de 4' x 5' (M-2)

**Figura N° 6. Diagrama de flujo del área de molienda de la planta de beneficio MACDESA**



### **Procedimiento de desorción.**

Procedimiento con Alcohol. En la planta MACDESA se empleará como base el mismo circuito de desorción y electro-obtención simultánea con una solución de 1% NaOH + 0.2% NaCN a la cual se le agrega en un 15-20% en volumen de Alcohol, en una operación a 70 - 80 0C, contando con un tanque de desorción (stripper) la solución eluyente pasará a un intercambiador de calor antes de llegar a la celda de electrodeposición, para su respectiva electrólisis y luego pasará a

una bomba de soluciones calientes para ser retornado al reactor o stripper, este proceso será para 1800 Kg de carbón con su respectivo tanque de almacenamiento de solución barren para su posterior reutilización.

### **Electrodeposición.**

En esta etapa se reducirá el oro con electrones sin adición de reactivos mediante un rectificador de corriente de 400 Amp. a 2.5 Voltios; la electrólisis ocurrirá en una celda de 2.20x0.6x0.8m la cual contará con 9 Ánodos y 8 Cátodos. Una vez que termina la electrodeposición se retira los cátodos con todo el material adherido y se coloca en un recipiente; este material contiene oro y plata; como lodo anódico y lana. Esta lana también tiene material fino de oro; antes de desecharla se lava con ácido muriático hasta su dilución total. El lodo que se obtiene se junta con el lodo anódico. Todo este lodo se le agrega agua regia precalentada a 60°C hasta que termina la reacción exotérmica. La solución obtenida es el oro diluido. Esta solución se lleva a decantar, utilizando como filtro algodón, para eliminar cloruros suspendidos; repitiendo este proceso hasta terminar la reacción de los lodos.

### **Refinación.**

En esta etapa se hará dos operaciones para obtener el oro refinado: la primera que tendrá que eliminar todos los metales menos la plata, y la segunda el refinado propiamente dicho que consiste en la separación de estos dos metales. Para el mineral de MACDESA se hará el Proceso de Disolución con Agua Regia, ya que en nuestro mineral la plata no asciende a más de 7% por el contenido de Cobre.

Además se contará con una campana extractora de gases con Neutralizador de óxidos nitrosos (NOx). Los insumos se detallan en cuadro N° 5.

**Tabla N° 1. Principales Insumos en la etapa de refinación**

ETAPAS	INSUMOS	DOSEIFICACION
Disolución de Lana	AcidoClorhídrico o Sulfurico	0.8 l/100g de lana al 28%
Disolución de Au Con Agua Regia	AcidoClorhídrico(HCL) al 28%	10.2 l/kg Au al 28%
	AcidoNítrico(HNO3) al 68.2%	1.15 l/kgAu al 68.2%
Precipitación de Au	Urea ( $CO(NH_2)_2$ )	0.76 gr/g Au
	Bisulfito de Sodio (NaHSO3)	0.64 gr/g Au
Lavado	AcidoNítrico(HNO3) al 68.2%	0.1 l/kg Au
Refinación de Plata	AcidoClorhídrico o Sal Comun	0.3 l /Kg de Ag o 4600g/kg Ag
	Polvo de Zinc	215 g/kg Ag

Fuente: Elaboración propia

### Fundición

En este proceso se contará con un horno de crisol accionado por petróleo o gas con un ventilador de 0.5 Hp de motor, para canalizar los gases generados por el precipitado de oro se contará con una campana extractora. En esta etapa el precipitado de oro se le adiciona 10 – 20 gr de bórax 76.

### Reactivación del carbón activado

#### Lavado Químico.

En este proceso se hará un lavado simple con agua a fin de eliminar Soda residual de la desorción y lamas; para pasar a una lixiviación con HCl al 3% eliminando así los carbonatos, sílice y sulfatos de calcio. Para este proceso utilizaremos una columna de acero inoxidable para 1500kg de carbón seco.

### **Reactivación Térmica.**

Este es un proceso altamente eficiente que permite activar los carbones y dejarlos en condiciones muy parecida a los carbones nuevos, se hará la remoción de productos acumulados y restauración de la estructura porosa y actividad del carbón con menor daño posible. Se llevará hasta la oxidación selectiva alcanzando temperatura de 800°C. para luego pasar por una zaranda para eliminar el carbón fino y dejar el carbón listo para su reutilización en los tanques de agitación por el método CIP

### **Área de muestreo y preparación de muestras**

La importancia en que una muestra sea representativa radica en la influencia que proporcionan los resultados de ensayos que se practiquen, por eso el Laboratorio MACDESA contará con una chancadora de quijada tipo Denver, un cuarteador jones, una mesa de rolado y cuarteo; con extractor de polvos para que no exista contaminación por el conocido oro volador u oro fino. La muestra fragmentada pasará a un secador o estufa para luego llevarla a un pulverizador de anillos. Para este proyecto contaremos con dos pulverizadores de anillos con sus respectivas ollas de pulverizado; manejaremos tiempos diferentes según el tipo de análisis como Newmont o normal pasando por malla de la serie Tyler. Estas muestras serán pesadas con su flux respectivo para luego ser llevadas a fundición; también contaremos con una compresora para limpiar las mallas y área de trabajo, se tendrá en esta área un filtro prensa para sacar los líquidos de la pulpa, con su respectivo lavadero de bandejas. Los insumos a utilizar se detallan el tabla N° 9.

Tabla N° 2. Dosificación de Insumos para el área de Laboratorio Químico

INSUMOS Y REACTIVOS	DOSIFICACION
Litargirio (PbO)	30 g/10g min.
Bicarbonato de Sodio (NaHco3)	15 g/10g min.
Bórax (Na2B4O7·10H2O)	10 g/10g min.
silice (SiO2)	2-2.5 g/10g min.
Almidón	2.5 g/10g min.
Nitrato de Plata (AgNO3)	0.0016 mg
Nitrato de Potasio (KNO3)	0.8-5g/10g min.

Fuente: Elaboración Propia

### Área de fundición y copelación

En esta área el Laboratorio de MACDESA contará con dos hornos de fundición de 3.5 kW con controlador de temperatura de 24 crisoles y uno pequeño para copelación de 10 crisoles de capacidad, es muy importante tener un buen horno y mantener una buena temperatura de colada, se contara con 12 lingoteras de fierro fundido de 4 coladas. Además de un almacenamiento de crisoles usados. En esta área se llevará a cabo la fundición y copelación por el método FireAssay y así obtener el bullón.

### Área de ataque químico.

En el área de ataque químico se contará con una plancha eléctrica de 450 °C para llevar a cabo el ataque químico del bullón. Para dicho ataque se utilizará: ácido nítrico al 68.2%, ácido clorhídrico al 28%, en una relación de 1 a 3. Un crisol de porcelana de 15 ml, así mismo se harán los análisis de carbón, doré y soluciones cianuradas. En esta área se contará con un lavadero para materiales de vidrio, se

medirá la fuerza de cianuro, el porcentaje de malla. Para evitar la contaminación por gases nitrosos se contará con una campana extractora para gases.

### **Área de pesado.**

Esta área es la parte final del análisis en laboratorio de MACDESA y es de suma importancia por eso contaremos con las balanzas debidamente calibradas y de alta precisión con sus respectivas mesas anti vibratorias. Se tendrá: una balanza micro analítica con una precisión de +/- 0.001 mg de error, una balanza Analítica con una precisión de +/- 0.001g de error y una balanza de humedad con luz halógena; con sus respectivos software a cada balanza.

El proceso Productivo del laboratorio es garantizar resultados óptimos de todas las operaciones en planta analizando las diferentes muestras provenientes de geología y planta utilizando los diferentes métodos de análisis (ensayo al fuego, chiddy, newmond.)

En la descripción se contará que es lo que se realiza en las diferentes etapas desde de la recepción de los minerales hasta la obtención de los resultados. Los equipos que se utilizan son los siguientes: chancadora de mandíbula, pulverizador de anillos, estufas, horno de fusión/ copelación industrial, balanza de cuatro dígitos, balanza ultra micro y Equipo de seguridad (cascos, lámparas, botas, mamelucos, lentes, respiradores, etc).

**Figura N° 7. Instrucciones de Trabajo del Jefe de Turno**



## PREPARACION DE MUESTRAS

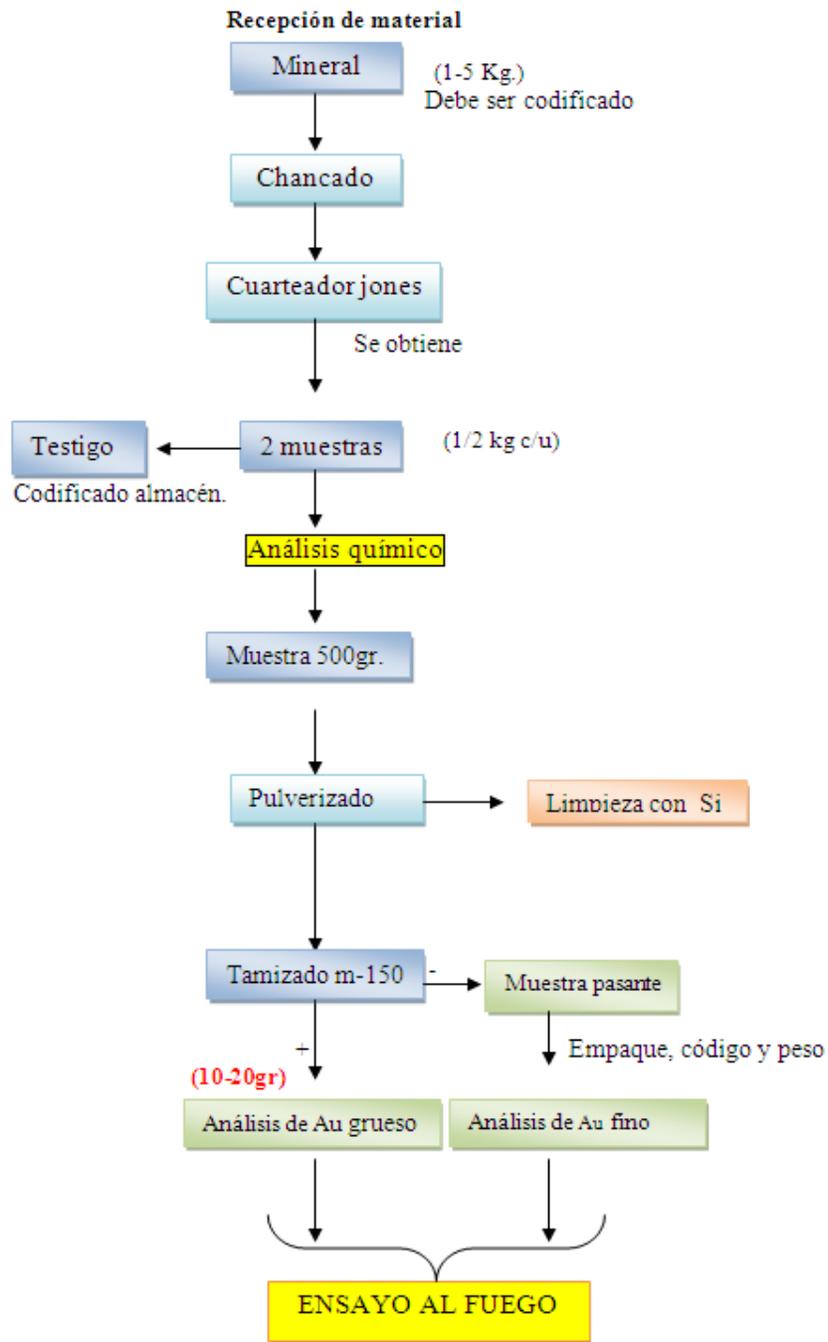


Figura 08. Preparación de muestras provenientes de mina y planta.

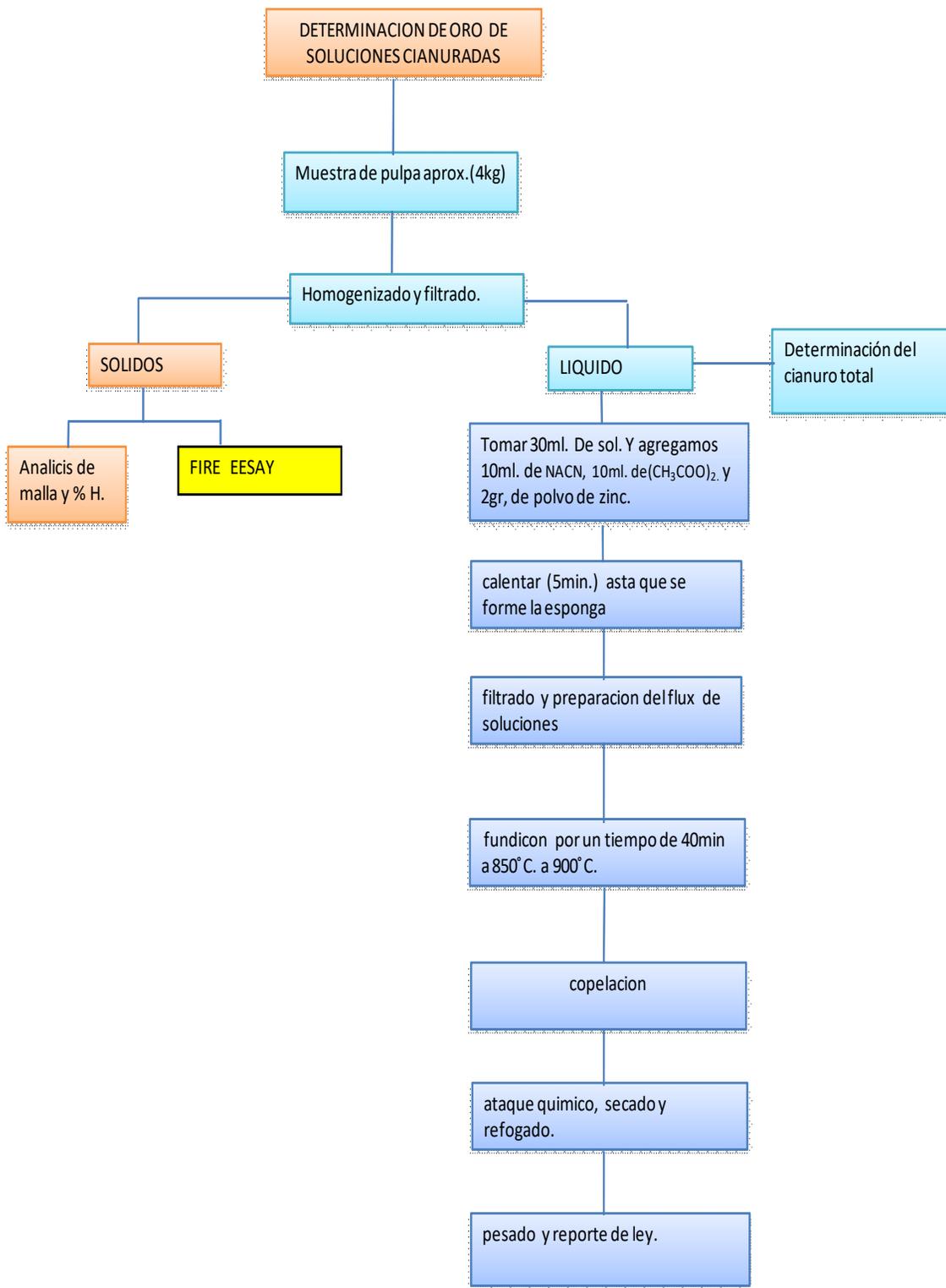


Figura N° 09. Análisis de soluciones, método chiddy.

## **2.2. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN**

A continuación, se citan algunos trabajos de investigación relacionados con el tema del problema planteado, es decir, investigaciones realizadas anteriormente y que guardan alguna vinculación con el objeto de estudio.

Explorando la documentación existente a nivel nacional e internacional, se puede constatar la existencia de tesis de grado con características afines, como se detalla a continuación:

### **2.2.1 Investigaciones Nacionales**

**TESIS 1:** “Tratamiento de relaves mineros contaminados con plantación de gramíneas (kíkuyo) para convertirlos en áreas verdes en las minas de la región central del Perú” Tesis para optar el grado de Maestro en Seguridad y Medio Ambiente en Minería. Huancayo-Perú 2015, por Romero Rey, Amanda Luz, Universidad Nacional del Centro.

- **Objetivo General:** Determinar la influencia del tratamiento de relaves mineros contaminados con plantación de gramíneas (Kikuyo), en las minas de la Región Central del Perú.

- **Tipo y diseño metodológico:** Considerando la tipología de estudios convencionalmente aceptados, en el mundo científico, la presente investigación es aplicada, diacrónica, prospectiva, focalizada, empírica, documental, descriptiva, cualitativa, correlacional y de nivel explicativo.

**Conclusiones:**

La Constitución Política del Perú (1993), norma que el Estado es soberano en el aprovechamiento de los recursos naturales, que son patrimonio de la Nación, define las condiciones de su utilización y otorgamiento a particulares, determina la política nacional del ambiente, promueve el uso sostenible de sus recursos naturales y la conservación de la

diversidad biológica y de las áreas naturales protegidas. En este contexto son vigentes normas referentes al Sistema Nacional Ambiental, Política Nacional del Ambiente, Plan Nacional de Acción Ambiental - 2011-2021, y AGENDA AMBIENTE 2013 - 2014, instituciones legales que en su conjunto constituyen e integran el sustento jurídico — ecológico que posibilita la verificación de la primera sub hipótesis que a la letra dice: El tratamiento de relaves mineros con plantación de Kikuyo en las minas de la Región Central del Perú, se fundamenta jurídica y ecológicamente. Los conocimientos científicos que se hallan en los Antecedentes y el Marco Teórico de la presente investigación, así como los saberes significativos de los trabajadores obreros acerca de: los relaves y sus componentes; el proceso de formación de canchas de relaves; el alto grado de contaminación del aire, agua, suelo, flora y fauna con lamentables consecuencias como degradación del hábitat de seres bióticos así como los saberes que tienen sobre desestabilización de ecosistemas, enfermedad, migración y/o extinción de animales, extinción de plantas, acidificación y envenenamiento del aire y agua, infertilidad de tierras de cultivo y la vivencia de malestares, enfermedades y muerte por parte de los obreros, constituyen bases científico — ecológicas que permiten la comprobación de la segunda sub hipótesis que es la siguiente: El tratamiento de relaves mineros con plantación de Kikuyo en las minas de la Región Central del Perú, se demuestra científica y tecnológicamente. Los datos científicos de los investigadores citados en los Antecedentes y Marco Teórico, del presente estudio, aunado a los conocimientos de los Ingenieros de Minas de la Región Junín sobre el Kikuyo, sus características, importancia y reproducción; plantaciones de Kikuyo y proceso de tratamiento de relave y sus consecuencias; Fito estabilización con Kikuyo y manejo de un programa piloto de tratamiento con sombrío de

Kikuyo, constituyen orientaciones tecnológicas que posibilitan demostrar la segunda sub hipótesis planteada en estos términos: El tratamiento de relaves mineros con plantación de Kikuyo en las minas de la Región Central del Perú, se demuestra científica y tecnológicamente. Las experiencias científico - tecnológicas internacionales de la siembra del Kikuyo, como planta forrajera en la crianza de ganado vacuno, equino y ovino, en Colombia, Panamá, Chile y México, así como las experiencias nacionales, en Cusco y Ancash, de uso de esta gramínea como Fito estabilizadora en canchas de relaves mineros, analizadas en el párrafo correspondiente a antecedentes, posibilitan probar la segunda sub hipótesis que dice: El tratamiento de relaves mineros con plantación de Kikuyo en las minas de la Región Central del Perú, se demuestra científica y tecnológicamente.

**Tesis 2:** “Construcción de dique con tratamiento del relave, en la mina Catalina Huanca — Región Ayacucho. Tesis para optar el grado de Maestro, por otro lado, el Ing. Almerco Palomino, Denis Omar Lima-Perú 2014, afirma:

- 1.- La Planta de Beneficio de la Unidad Minera Catalina Huanca produce por día 1000 TMD, de ello solo el 11% es el mineral en sí y el restante es el relave 850 TMD, el relave filtrado de Planta tiene un contenido de sólidos de 88%, una humedad de 17%.
- 2.- La mezcla producto del relave con el material de préstamo está en la proporción de 3R:1P, una vez dosificado los materiales se tiene que dar como mínimo 3 batidas con la finalidad de homogenizar la mezcla.
- 3.- Se llevaron muestras de mezcla al laboratorio, para realizar su respectivo análisis granulométrico por tamizado, ASTM D-422, como resultado del ensayo de la mezcla

según la clasificación SUCS, se obtuvo un SC-SM, arena arcillosa Limosa (mezcla de arena y arcilla mal graduada).

- 4.- Durante todo el proceso de operación del depósito de relaves se deberá monitorear la densidad y humedad de compactación, espesor de capa compactada y granulometría de los relaves depositados. Este control será como mínimo de cuatro controles semanales. Las capas riego de compactadas deberán tener una pendiente uniforme de 2%, en dirección hacia aguas abajo.
- 5.- En el área de depósitos de relaves, se construirá canales perimetrales de coronación que permitan captar y derivar las aguas de escorrentía, también se construirá un sistema de subdrenaje para evacuar y drenar las aguas de las precipitaciones pluviales que caen directamente en el área del depósito de relaves y las aguas subterráneas.
- 6.- Para un buen compactado de material, lo principal es la humedad del material, ya que si no se logra obtener la humedad ideal para compactar puede haber complicaciones futuras, como acolchonamientos en la capa compactada, lo cual afectaría al momento de realizar las pruebas de densidad, debe salir como mínimo 95% en la prueba mencionada. La humedad óptima para compactar la mezcla debe ser un promedio no mayor de 11.00%.
- 7.- En el Terraplén, la capa conformada y compactada se debe obtener como máximo 25% del porcentaje de vacíos, si no fuera el caso se tiene que volver a reconformar para cubrir los vacíos entre piedras.
- 8.- El uso de cal se debe tomar en cuenta para días de lluvia, donde es muy complicado el secado del relave, con el mezclado del relave con la cal, se estaría aprovechando el tiempo en que los equipos estarían sin actividad por el mal clima, ya que el mezclado

de estos dos materiales se puede realizar incluso cuando el clima este nublado, la cal genera el calor necesario para disminuir el porcentaje de humedad del relave, para luego poder mezclar en una humedad hasta de 12% el relave con un préstamo menos húmedo que el relave.

### **También recomienda**

- 1.- Para construir la base de cimentación del depósito de relaves se excavará y removerá todo el material orgánico; suelo húmedo o saturado, luego se compactará la capa de material arcilloso existente para impermeabilizar la cimentación; asimismo, se instalará un sistema y de drenaje y subdrenaje que permitirá manejar las aguas superficiales y la probable presencia de aguas subterráneas.
- 2.- El escarificado se realiza con el tractor, con el riper de este, las líneas entre sí deben ser de 60cm y se escarifica una profundidad no mayor de 10 cm, para la adherencia entre la capa compactada y la capa nueva a conformar.
- 3.- El compactado del material de mezcla siempre se realiza de estorbo a estorbo paralelo al hombro del dique, esto se debe hacer para una mayor estabilidad al dique, al momento de entrar los volquetes a la plataforma, trasladando mezcla para descargar se debe evitar pisar el escarificado, ya que si el volquete pisa el escarificado este se sella y no permite la adherencia entre capa compactada y capa conformada.
- 4.- Se recomienda que el material de top soil, se disponga en una zona cercano para su posterior uso en los recubrimientos de los desmontes y cumplir con el cierre según la normatividad ambiental.
- 5.- Debe realizarse el monitoreo topográfico del depósito de relaves mediante un sistema de mediciones de hitos topográficos documentado en puntos estratégicos del depósito

a partir de un punto geodésico, a los hitos de control topográfico en cada uno de los depósitos de relaves, durante la construcción del dique, deberá existir un control topográfico así mismo durante su recrecimiento.

- 6.- Durante la ocurrencia de un evento sísmico significativo (intensidad sísmica en la escala de Mercalli Modificado de VI o mayor) o precipitaciones importantes (lluvias de 57mm en 24 horas, de período de retorno de 100 años o mayor) se deberá hacer inspecciones especiales de daños.
- 7.- Para el uso de la cal se tiene que tener muy en cuenta que los trabajadores que estén en contacto directo con este material tiene que estar con los equipos necesarios para evitar posibles enfermedades.
- 8.- En el terraplén las piedras a conformar deben tener como máximo un diámetro de 12 pulgadas, para no crear muchos vacíos entre sí. También en la revista “Minería Chilena”, publicado 5 Diciembre 2012 “El fin de los relaves”, era que expertos plantean hoy es reutilizar los desechos para elaborar materiales de construcción. Sin embargo, ya la industria los utiliza para el desarrollo mismo de los procesos mineros.

La apuesta es ambiciosa, pero no imposible. Lo que se busca es transformar los pasivos y relaves mineros en verdaderos activos industriales. Interés abunda, ya que debido a la intensa actividad minera que se proyecta para los próximos años, todas las cifras indican que estos desechos irán in crescendo. A ello se deben sumar las bajas leyes de los minerales, lo cual implica una mayor generación de relaves; de hecho, se calcula que del total de material extraído en una mina sólo el 2% corresponde al metal deseado, y el resto es descartado en diferentes desechos como estériles (50%), relaves (44%) y escorias (4%).

De acuerdo con los antecedentes entregados por el Servicio Nacional de Geología y Minería (Senageomin), sólo en 2011 se produjeron 5.257.195 tmf. de cobre, lo cual generó cerca de 113.345.000 ton de material de relaves.

### **2.2.2. Investigaciones Internacionales**

**Tesis 1:** Tesis doctoral “Evaluación de los efectos agudos en la función pulmonar por exposición a material particulado fino (mp<sub>2.5</sub>) en niños que viven próximos a la playa masivamente contaminada con relaves mineros. Chañaral – Chile. Cerdanyola del Valle. Barcelona, 2015.

#### **Objetivo General:**

Evaluar la asociación entre la exposición a material particulado fino (mp<sub>2.5</sub>) y su efecto agudo sobre la función respiratoria de escolares de la ciudad de Chañaral y caracterizar simultáneamente la composición metálica y másica del fino mp<sub>2.5</sub> en microambientes interiores y exteriores de jardines infantiles y escuelas básicas de la ciudad en el periodo de invierno, primavera y verano.

En este estudio se determinó que la función respiratoria en términos de variación de la capacidad vital forzada (CVF) de los escolares residentes se ve afectada negativamente por aumentos en los niveles de MP, en especial el MP<sub>2.5</sub>., por lo que se no se rechazan las hipótesis planteadas “La exposición a MP fino (MP<sub>2.5</sub>) en la ciudad de Chañaral está asociado a la disminución de la función respiratoria en niños escolares” y “La composición metálica/metaloides y másica del material particulado fino (MP<sub>2.5</sub>) al interior de microambientes escolares en la ciudad de Chañaral está asociada a la encontrada en

microambientes exteriores. Estos niños/as actualmente expuestos estarían agudamente afectados y podrían llegar a presentar efectos crónicos por exposición de largo plazo. Esta situación estaría potenciada por la presencia de metales pesados presentes en las partículas que pueden generar efectos inflamatorios a nivel del parénquima pulmonar.

### **Investigación 2:**

Por otro lado, la Dra. Claudia Aguirre [www.csíro.cl](http://www.csíro.cl) Santiago, 2 Agosto 2017 afirma en su objetivo general, Convertir un pasivo ambiental minero (relaves) en un activo con beneficios para el ecosistema y la comunidad y en sus objetivos específicos: Generar una solución y servicio tecnológico para recuperar elementos de valor (Cu y Au), desde un relave abandonado.

Recuperación de suelos con valor turístico/urbano/industrial bajo remediación estándar y protección ambiental.

En sus conclusiones afirma: Dada la mineralogía presente en el relave, se puede concluir que la lixiviación para la extracción de cobre se podría realizar en tiempos cortos y con una alta recuperación.

- El relave S2 contiene mayor concentración de cobre y oro que relave S1, con una concentración de Cu total 0,48% y Au 0,49 g t<sup>-1</sup>. Mientras que el relave S1 tiene una concentración de Cu total de 0,30% y oro de 0,32 g t<sup>-1</sup>.
- Los metales no se encuentran distribuidos uniformemente en el relave. Existen zonas con baja concentración de elementos de valor.
- El modelo 3D geo-caracterización corresponde al primer paso de investigación que permite determinar el valor comercial de un relave basado en sondajes, muestreo y caracterización.

- El valor económico de los relaves SOTRAMIN en cuanto al contenido de cobre y oro podría servir para amortizar los costos que implican el traslado del material, el proceso de extracción, y remediación del sitio. El procesar estos relaves tendrá un beneficio social y medio ambiental; y dentro de sus futuros pasos:

Determinar el valor comercial de relaves SOTRAMIN según concentración de cobre y oro contenidos.

- ✓ Pruebas metalúrgicas para extracción de cobre usando agua de Mar.
- ✓ Estudio de obtención de sales de cobre a partir de PLS generado desde relaves.
- ✓ Evaluación económica de los procesos de obtención de sales de cobre desde relaves.
- ✓ Remediación de arsénico/mercurio y/o sellado del relave.

Producto de este escenario, algunos expertos plantean derechamente reutilizar este pasivo minero como materia prima para la fabricación de elementos de construcción, ya que de esta forma se reducirían los costos, los niveles de contaminación e incrementaría el tiempo de servicio de los depósitos de relaves.

La idea ya está siendo estudiada a nivel internacional. Por ejemplo, en Perú un grupo de investigadores de la Escuela de Ingeniería de Minas de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos produjo ladrillos y baldosas a partir de la reutilización de relaves. Para ello utilizaron la metodología de fijación y microencapsulación de los metales pesados, que permite su estabilización y evita la migración hacia el medio ambiente.

Asimismo, en el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (Cinvestav) de México proponen 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.

## **2.3. BASES TEÓRICAS**

### **2.3.1. Sociedad moderna y relaves mineros**

La minería es una industria que tiene como finalidad la búsqueda, exploración, explotación, beneficio de los minerales y su comercialización al servicio de la sociedad. Al producir materiales de importancia con valores económicos, también tiene como producto la parte estéril, materiales sin valor económico que muchos de los cuales están contaminado llamado relave minero.

Uno de los mayores problemas que enfrenta actualmente la sociedad moderna es el campo de los relaves pasivos mineros, cuya producción se acrecienta día a día, especialmente por la minería ilegal. El problema es crítico en las zonas de vías en desarrollo, debido a la falta de recursos económicos para desarrollar tecnologías limpias que conduzcan a soluciones eficaces. Por otro lado, los proyectistas encargados de diseñar, evaluar y posterior tratamiento recurren a modelos de otros países con realidades diferentes.

Por su parte los servicios de fiscalización por parte de la Dirección Regional de Minería (DREM) de Huacho, frecuentemente manejan un limitado financiamiento, usado muchas veces de manera inadecuada, sin control, ni conocimiento cabal de los recursos que manejan, lo que afectan negativamente la provisión de servicios de una evaluación y tratamiento de relave minero.

Cada año, millones de toneladas de desechos de lámina se generan en industria minera. El almacenamiento de relaves mineros ocupa gran área de tierra representando un alto costo económico, ambiental y ecológico. Por otro lado, cantidades considerables de materiales se utilizan en la industria de la construcción y hay una escasez de materiales de construcción en muchas partes de nuestro país. Si los relaves mineros se reciclan y se utilizan como material de construcción, cabría la posibilidad de prescindir de los terrenos que son necesarios para embalsarlos, además; se podría evitar el costo económico de conservar un pasivo minero y los riesgos ambientales. Todo esto contribuirá de manera significativa al desarrollo sostenible de la industria minera. Para utilizar relaves mineros como material de construcción, necesitan ser estabilizados.

El cemento Portland ordinario (OPC) se ha utilizado para estabilizarlos relaves de las minas; pero esta técnica tiene un número de limitaciones, incluyendo la resistencia de baja acidez, mala inmovilización de contaminantes.

Aún existen los problemas tales como la utilización de grandes extensiones de terreno, presencia de metales pesados, lixiviación por lluvias, la contaminación por polvo, y la potencial amenaza de derrumbes en las presas de relaves. Como sabemos, relaves mineros contienen algunos metales pesados como el cobre, molibdeno, arsénico y uranio, que contaminan las aguas subterráneas y los suelos, las plantas y la vida mortal.

Si queremos reciclar los desechos de la mina, pesado metales contenidos deben ser encapsulados y se inmovilizan. Por otro lado, para producir una tonelada de OPC, Se necesita alrededor de 1,5 toneladas de materias primas y 1 tonelada de CO<sub>2</sub> es liberada a la atmósfera generando emisiones de gases de efecto invernadero. Este proyecto de Tesis investiga la geo polimerización de relaves mineros de modo que puedan ser utilizados como

material de construcción en gran escala y de una manera respetuosa con el medio ambiente. La premisa de este proyecto es que los relaves de las minas pueden ser estabilizados mediante la tecnología de geo polimerización, que se basa en el hecho de que relaves mineros consisten principalmente en partículas de pequeño tamaño y contienen gran cantidad de componentes de sílice y alúmina.

Cantidades determinadas de relave serán mezcladas con material zeolítico que mediante reacción química con una solución activante alcalina darán origen a un proceso de geo polimerización. El reto está en optimizar una mezcla (relave + zeolita + activador alcalino) para la obtención de resistencias de compresión que puedan ser comparados con el cemento Portland, y para llevar a cabo este fin, se ejecutarán una serie de procesos experimentales, ayudándonos de una recopilación bibliográfica referente al estudio y análisis de la zeolita, acorde a las normas ASTM C109/C109M y ASTM C 305 en cada etapa experimental que hacen referencia al cemento Portland ya que no existen normas que rigen el proceso de la zeolita, además se desarrollará métodos para la elaboración de un mejor proporcionamiento y curado de las muestras. En la actualidad numerosos proyectos mineros se están desarrollando trayendo consigo mejoras en la productividad (la actividad minera participa con el 14.40% del PBI) y también el incremento en la generación de residuos mineros que se suman a los pasivos generados por la pequeña minería y minería artesanal que opera principalmente en la sierra.

En el Congreso de la República, existe una iniciativa legislativa para declarar de interés nacional y necesidad pública la transformación de relaves mineros en materiales de construcción, considerando la gravedad de riesgos potenciales y de daño a las poblaciones y al medio ambiente que se desprenden de las acumulaciones y depósitos de relaves, así

como la viabilidad probada de transformarlos en productos inocuos de uso para la industria de la construcción, tales como: agregados de construcción, ladrillos, tejas y otros afines. Con este trabajo de Tesis, se busca transformar los pasivos y relaves mineros en verdaderos activos industriales. Debido a la intensa actividad minera que se proyecta para los próximos años, todas las cifras indican que estos desechos irán en ascenso. A ello se deben sumar las bajas leyes de los minerales, lo cual implica una mayor generación de relaves; de hecho, se calcula que del total de material extraído en una mina sólo el 2% corresponde al metal deseado, y el resto es descartado en diferentes desechos como estériles (50%), relaves (44%) y escorias (4%). <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/2901.2015>

Con fecha 14 Setiembre 2018, el Ministro de Energía y Minas Francisco Ísmodes, durante su presentación en el Congreso de la Republica explicó que se ha identificado 8800 pasivos ambientales, de los cuales 2700 son de alto riesgo “Acá hay que hacer gestión de avanzar de manera más expeditiva, porque para nosotros está claro que la promoción de minería tiene que ir acompañada de la solución de los temas del pasado”, indicó tras estimar que se necesitarán 7 mil millones de soles para remediarlos.

### **2.3.2 Relave**

Se define como desechos de mineral solido fino con una granulometría conocida entre arena y limo provenientes del proceso de concentración que son producidos ,transportados o depositados en forma de lodo 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 mineral valioso, conformando una pulpa ,que se generan en las plantas Concentradora de minerales ,y que ha experimentado una o varias

etapas de circuitos de molienda fina, esta pulpa o lodo de relaves fluctúa en la práctica una dilución aproximada de agua/sólidos = 2.5 /l.

Las características y el comportamiento de esta pulpa dependerán de la razón agua/sólido y también de las características de la calidad de mineral a tratar en la planta concentradora.

Esto puede ilustrarse si se consideran los siguientes ejemplos:

- Una masa de relave con un gran contenido de agua (30% sólidos) escurrirá fácilmente, incluso con pendientes pequeñas.
- Una masa de relaves con un contenido de agua suficientemente bajo 75% sólidos (por ejemplo, un relave producto de un espesamiento) no escurrirá fácilmente.
- Si las partículas sólidas son de pequeño tamaño (arcillas) M-200=85% tardaran un gran tiempo en sedimentarse, manteniéndose un tiempo prolongado similar al espejo de agua.
- Si las partículas sólidas son de tamaño mayor M-200 = 55%. sedimentaran más fácilmente en poco tiempo y se acumularan a poca distancia del punto de descarga.

Las alternativas a utilizarse en la disposición de relaves, dependerá de sus características que producidos en la planta de tratamiento en una relación de 25 a 1 (por cada tonelada de concentrado valioso, producirán 24 TM de relave), el agua tiene un costo porque en la zona es escasa y se abastece a través del carro cisterna, ocasionando un costo económico, justifican la inversión por la calidad de concentrado que obtenemos.

Para conseguir una estabilidad segura de los relaves, se realizaron investigaciones de suelo como granulometría, humedad, contaminantes, densidades, es importante saber que los contaminantes de los relaves son insuficientes y no va perjudicar la geomembrana.

**Tabla 3. Porcentaje de sólidos, volumen y consistencia de relaves**

<b>PORCENTAJE % sólidos</b>	<b>Volumen de agua por tonelada de relaves (m<sup>3</sup>/Ton)</b>	<b>Consistencia del relave</b>
30	1.5	Pulpa
56	0.5	Espesado
75	0.3	Pasta
85	0.2	Filtrado

**Fuente:** Golder Associates

### **2.3.3 Descarga de los relaves**

#### **a) Descarga del Relave Completo**

Se requiere disponer de un volumen suficientemente grande para permitir almacenar todos los relaves que se producirán durante la vida útil de la planta. Pueden utilizarse cavidades "pre-existent" como: tajos mineros abandonados, depresiones naturales en superficie, cavernas naturales, antiguas minas subterráneas abandonadas.

Sin embargo, hoy debido a la legislación ambiental vigente resulta difícil de ser aceptados por su alta connotación ambiental y deberían realizarse estudios muy completos y detallados para demostrar que no se afectará el medio ambiente. Por esto, para la descarga de relaves completos, resulta técnica y ambientalmente más aceptable el encapsulamiento de los relaves colocando encima una capa de arcilla de 2 mts, luego tierra de cultivo y así cumplir con talud interno impermeabilizado hecho con material grueso de préstamo y generar así un vaso de depósito.

Este tipo de depósito de relaves se denomina "Depósito de Relaves" y han sido aceptados como alternativa para la disposición de relaves en nuestro país.

**b) Construcción del dique de contención con parte del relave**

No será necesario tener una altura considerable al culminar su ciclo de llenado. Esta opción corresponde a tratar los relaves provenientes de la planta concentradora, de manera de separar la fracción gruesa y que nos sirva de muro de contención alrededor de la cancha de relaves o llamado muro perimetral, la altura máxima será de un metro dado que su límite de llenado será hasta el borde del depósito por seguridad y evitar fugas. Al construir el muro se debe tener en cuenta que la zona es plana-horizontal.

**c) Material de relaves equivalente a un suelo húmedo**

Esta opción requiere tratar los relaves provenientes de la planta concentradora, a un 30% sólidos de manera de extraerle la mayor cantidad de agua posible mediante distintos métodos, por ejemplo mediante espesadores que son tanques de agitación lenta, en la cual la pulpa al ingresar al espesador, en su interior tienen unos rastrillos que van arrastrar los sólidos hacia el centro y por su parte superior la descarga de agua ,por la parte inferior de forma cónica del tanque se obtiene una pulpa espesa a un 75 % sólidos que con el uso de una bomba de pulpa es bombeada a través de una tubería al filtro de discos donde se eliminarán una mayor cantidad de agua y obtendremos una humedad de relave hasta un 8% donde le llamaremos “Pasta de relaves” sin necesidad de un muro perimetral para su contención.

**2.3.4. Manejo de Relaves**

Los objetivos del manejo de relaves pueden ser establecidos simplemente de la siguiente manera:

- La estabilidad física de los depósitos de relaves debe estar asegurada durante la operación, cierre y a lo largo del período de post-cierre. La seguridad de las poblaciones afectadas, contra los efectos físicos de una falla en el depósito, debe ser considerados siempre en primer lugar. Aunque ciertas medidas de mitigación ambiental pueden entrar a menudo en conflicto con requerimientos de estabilidad física, este objetivo no puede ser comprometido. No hay mitigación ambiental posible por mucho tiempo, a menos que los depósitos permanezcan estables.
- La migración de contaminantes a través del aire, agua superficial o subterránea debe ser minimizada. Durante el período de operación podrían requerirse medidas estructurales (por ejemplo recubrimientos para reducir la infiltración) a fin de cumplir con este objetivo, dependiendo de los Límites Máximos Permisibles de Emisión establecidos por el Ministerio de Energía y Minas. En otras circunstancias operacionales, pero especialmente durante el período post-cierre (debido al inevitable deterioro de materiales manufacturados), podría autorizarse la consideración de los procesos naturales de mitigación de contaminantes conjuntamente con la capacidad de asimilación del ambiente natural. En términos generales, las medidas pasivas que se basan en características intrínsecas de los materiales y procesos naturales deben ser preferidas sobre los sistemas activos e instalaciones que requieren operación y mantenimiento apropiados para que funcione según lo proyectado.
- No es recomendable considerar el monitoreo o mantenimiento a largo plazo para satisfacer los dos objetivos anteriores durante el período de post-cierre. Por último, alguna institución gubernamental debe ser responsable de conducir y controlar tales requerimientos y no es razonable o práctico por ahora, esperar que el Ministerio de

Energía y Minas u otro cuerpo gubernamental en el Perú acepte tal responsabilidad, aún si los fondos son proporcionados por la compañía minera. Esto significa que los depósitos de relaves deben alcanzar un status de «salida» («walk-away») a través del período de post-cierre, sin la necesidad anticipada o pronosticada de mantenimiento, reparación o intervención.

Los objetivos para el manejo de relaves son metas deseables que pueden ser imposibles de satisfacer íntegramente en cualquier circunstancia dada. Sin embargo, ellas forman un conjunto de criterios consistentes por medio del cual las alternativas, métodos y planes específicos pueden ser evaluados. Varias observaciones importantes surgen directamente de estos objetivos. Primero, la descarga directa de relaves a riachuelos y ríos no puede alcanzar los objetivos de estabilidad física o minimización de la migración de contaminantes. La deposición y transporte de relaves y los contaminantes correspondientes continuará ocurriendo indefinidamente, por la acción de procesos fluviales naturales que no pueden ser pronosticados o controlados confiablemente. Segundo, la recirculación del agua de proceso de la concentradora debe ser maximizada a fin de lograr el objetivo de minimizar la contaminación. Es casi siempre posible, y económicamente aceptable, capturar y recircular la mayor parte del agua de proceso de la concentradora, excepto en climas húmedos en donde la precipitación es tan alta que la descarga directa de las escorrentías acumuladas no pueda ser evitada. Finalmente, no habrá introducción completa al tópico del manejo de relaves en el Perú si no se indica que la dificultad en alcanzar los objetivos para el manejo de relaves, requiere un esfuerzo coordinado entre la gerencia de la mina y el personal de operaciones. El mensaje fundamental que esta Guía puede dar es que el manejo de relaves debe ser considerado tan importante como la recuperación del

metal. Del mismo modo que, ningún proyecto minero serio puede ser planificado u operado sin un esfuerzo enorme de parte de geólogos, ingenieros de minas, ingenieros metalúrgicos, analistas financieros altamente entrenados y experimentados, tampoco es posible un adecuado manejo de los relaves sin la contribución de técnicos especialistas en los campos del procesamiento de minerales, tratamiento de agua, geoquímica, construcción civil, sismología, hidrología, agronomía, y biología, así como ingenieros en geotécnica, hidráulica e ingeniería de minas. Es esencial que todas las fases del manejo de relaves sean conducidos bajo la directa supervisión de especialistas, no únicamente bien entrenados y competentes en estos campos, sino que también cuenten con experiencia práctica en el tema de relaves.

### **2.3.5. Métodos de presas de relave**

#### **2.3.5.1. Método aguas abajo:**

La construcción se inicia con un muro de partida de material de préstamo compactado desde el cual se vacía el relave grueso cicloneado hacia el lado del talud aguas debajo de este muro y las lamas se depositan hacia el talud aguas arriba.

Habitualmente se construye una berma impermeable en la cara del muro de la presa que está en contacto con el depósito y se provee de un drenaje interno para asegurar que el nivel freático dentro del muro se mantenga lejos del talud de aguas arriba. El espesor de la presa en su base aumenta con la altura, debido a esto requiere aportes crecientes de material, el área ocupada es mucha mayor al método de aguas arriba, debido al progreso de la estructura para el método de aguas abajo en función del aumento de la altura.

### **2.3.5.2. Métodos de eje central o línea central:**

Se inicia con un muro de partida de material de préstamo compactado, sobre el cual se depositan las arenas cicloneadas hacia el lado de aguas abajo y las lamas hacia el lado de aguas arriba.

## **2.4. DEFINICION DE TERMINOS BASICOS**

**Estabilidad de taludes.-** Es cualquier superficie inclinada que limita un macizo de suelo, de roca o de suelo y roca, estos pueden ser naturales, como las laderas artificiales, como los taludes de corte y terraplenes.

**Factor de seguridad. “FS”.-** Para un talud se define generalmente como la relación al corte disponible con respecto del esfuerzo cortante sobre la falla crítica. En el diseño de un talud o depósito, el factor de seguridad debe ser mayor a la unidad. (Guía ambiental para la estabilidad de taludes de depósitos de desechos sólidos de mina, MEM. DGAA, Lima, Perú, Agosto de 1997)

**Relave Minero.-** Se trata de gigantescos depósitos de desechos tóxicos que contienen arsénico, plomo, mercurio, sales de cianuro y químicos propios del procesamiento minero que se acumulan en millones de toneladas. Las consecuencias sobre la vida humana y el medioambiente que estos confinamientos de material contaminante producen son incalculables.

**Minería Formal.-** Cumple con todos los requisitos y permisos mineros, ambientales, sociales, laborales, tributarios establecidos en nuestra normatividad legal vigente, comprende a la mediana y gran minería, la pequeña minería y la minería artesanal.

**Minería Informal.-** No cumple con permisos para realizar actividad minera, opera en zonas no prohibidas, cuenta con declaración de compromiso y está en proceso de formalización, operan a pequeña escala.

**Minería ilegal.-** No cumple con los permisos para realizar actividad minera, opera en zonas prohibidas y/o utiliza maquinaria de gran capacidad, está sujeto a interdicción y erradicación.

**Afluente.-** Agua u otro líquido que ingresa a un reservorio, planta de tratamiento o proceso de tratamiento.

**Agua residual.-** Agua que ha sido usada por una comunidad o industria y que contiene material orgánico disuelto o en suspensión.

**Alcantarillado o red de saneamiento.-** Usado para la recogida y transporte de las aguas residuales y pluviales de una población desde el lugar en que se generan hasta el sitio en que se vienen al medio natural o se tratan.

**Alcantarillado pluvial.-** Sistema compuesto por tuberías y por todas las instalaciones necesarias para la recolección y transporte de aguas pluviales.

**Anaerobio.-** Condición en la cual no hay presencia de aire u oxígeno libre.

**Clasificación.-** Proceso de sedimentación para eliminar los sólidos sedimentables del agua residual.

**Disposición final.-** Disposición del efluente o del lodo tratado de una planta de tratamiento.

**Eficiencia del tratamiento.-** Relación entre la masa o concentración removida y la masa o concentración aplicada, en un proceso o planta de tratamiento para un parámetro específico.

**Sólidos suspendidos totales.-** SST, es la cantidad de sólidos que el agua conserva en suspensión después de 10 minutos de asentamiento, se mide en ppm, en algunos países rigen que para que la calidad de agua sea potable deberá ser inferiores a 500 ppm.

**Sólidos sedimentables.-** Son aquellos sólidos que sedimentan cuando el agua se deja en reposo durante 1 hora, se determinan volumétricamente mediante el uso del cono Imhoff.

## **2.5. FORMULACIÓN DE HIPOTESIS**

### **2.5.1. Hipótesis General**

Existe relación entre evaluación del relave minero y su tratamiento en la Planta de Beneficio MACDESA – Arequipa 2020

### **2.5.2. Hipótesis Específicas**

- Existe relación directa entre los factores de seguridad estáticos y pseudoestáticos de relave minero y su tratamiento en la Planta de Beneficio MACDESA – Arequipa 2020
- Existe relación directa entre las propiedades resistentes de los materiales que conforman el dique del relave minero y su tratamiento en la Planta de Beneficio MACDESA – Arequipa 2020.
- Existe relación directa entre las propiedades geotécnicas del relave minero y su tratamiento en la Planta de Beneficio MACDESA – Arequipa 2020.

## **2.6. OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES**

- a) **Variable Independiente:** Evaluación del relave minero.
- b) **Variable Dependiente:** Tratamiento en la planta de beneficio de MACDESA.
- c) **Variable Interviniente:** Método experimental, materiales.

**Tabla N° 4. Operacionalización de variables**

<b>Nombre de la variable</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Tipo de variable</b>	<b>Unidad de medida</b>
Evaluación del relave minero	Y	Independiente	%, ppm, mgrs/m <sup>3</sup> , densidad, pH, promedio.
Tratamiento en la planta de beneficio MACDESA	X	Dependiente	TM, M <sup>3</sup>

**Fuente:** Propia

## **2.7. DISPOSICIÓN DE LOS RELAVES**

### **2.7.1. Disposición de residuos sólidos**

Se realizará la disposición de residuos sólidos en trincheras de residuos, cumpliendo en general con la Ley de Residuos Sólidos y su reglamentación.

### **2.7.2. Disposición de relaves**

Minera MACDESA cuenta con una relavera en la que se viene disponiendo los relaves producto de las operaciones metalúrgicas. Para el incremento de la producción de 60 TPD a 120 TPD, se tiene un requerimiento de almacenamiento por día de 148.26 m<sup>3</sup>/día con lo que se tiene un requerimiento de almacenamiento de relaves para un periodo anual de 54,114 m<sup>3</sup>. La construcción de la presa de relaves se basa en un recrecimiento por el método línea central en lo correspondiente al dique de arranque y presa final, las características de la presa de relaves son principalmente las siguientes: La excavación para la cimentación, incluye toda excavación para obtener una cimentación sólida para el terraplén de la presa. Se adoptarán las precauciones necesarias para preservar el material por debajo y más allá de las líneas establecidas de la cimentación del terraplén. En la supervisión se decide las necesidades de excavación para garantizar la cimentación de la presa. El área entera que haya de estar ocupada por el terraplén de la presa deberá limpiarse

hasta una profundidad suficiente para llegar a la roca, según determine la supervisión con la finalidad de remover todo el material que sea inadecuado. Debido al alto grado de sismicidad la presencia de materiales sueltos no es aceptable. El material colocado en el terraplén de la presa de arranque deberá ser equivalente a una mezcla de los materiales obtenidos a un corte aproximadamente uniforme desde la altura total del frente designado de la excavación de la cantera de material de préstamo. En líneas generales las características de la presa final del depósito de relaves son las siguientes:

**Tabla N° 5. Características de la presa final**

Planteamiento		Planteamiento	
Inicial		Final	
☐	Método constructivo	Línea Central	Línea Central
☐	Ancho de corona	4 metros	5 metros
☐	Talud aguas arriba	1.0: 1.0 (V: H)	1 : 1.6 (V:H)
☐	Talud aguas abajo	1.0: 2.0 (V: H)	1 : 1.8 (V:H)
☐	Longitud de corona	110.00 m	120.00 m
☐	Elevación de corona	1,10 m.s.n.m.	1075 msnm
☐	Altura de presa	3 m	10 m
☐	Borde libre	1 m	2 m
☐	Capacidad del depósito : 11710.5 m <sup>3</sup>		63500 m <sup>3</sup>

Fuente: Elaboración propia

La vida útil del depósito para la nueva capacidad de tratamiento de la planta de beneficio MACDESA será la siguiente:

	Planteamiento Inicial	Planteamiento Final
• Capacidad total del depósito =	11710.5 m <sup>3</sup>	63500 m <sup>3</sup>
• Disposición diaria de relave =	150.00 m <sup>3</sup>	150.00 m <sup>3</sup>

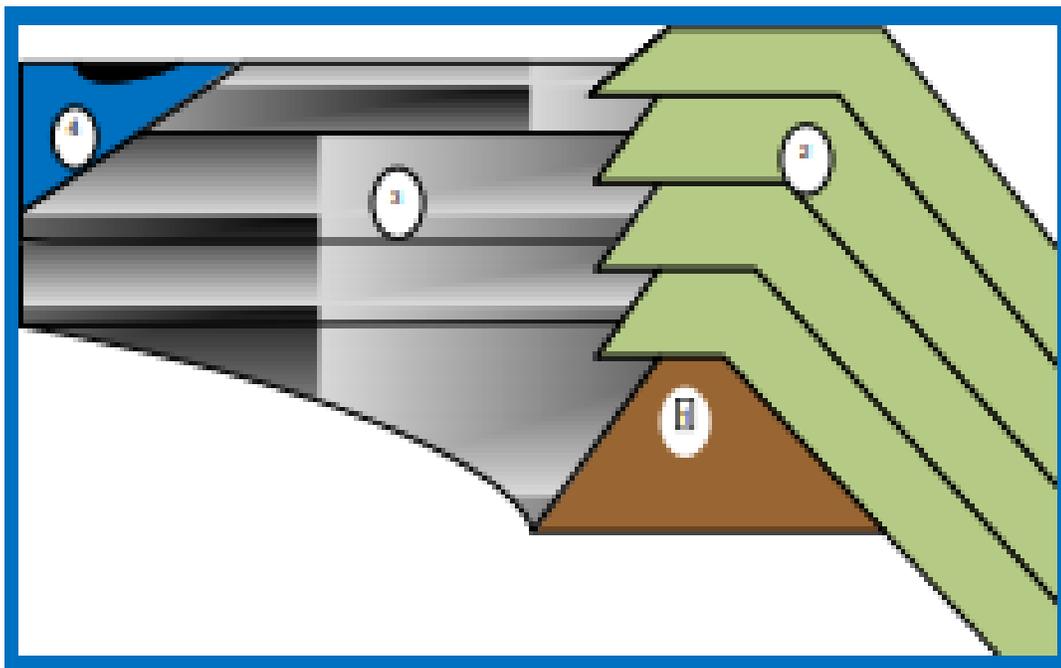
Considerando una densidad de 1.624, con lo que se tiene un requerimiento de almacenamiento de relaves para una descarga diaria de 150,00 m<sup>3</sup> y una recuperación de solución barren de 50%. El volumen que descarga diariamente sería de 75m<sup>3</sup>/día. Bajo estas condiciones existirá el requerimiento de almacenamiento de relaves en el nuevo depósito de relaves, el mismo que de acuerdo a las características geométricas de su construcción corresponde a una vida útil de 0.5 años (Planteamiento Inicial) y una vida útil de 2 años y 8 meses (planteamiento Final). Se opta por el planteamiento final.

$$\text{Vida útil} = 75210.5 \text{ m}^3 / 75.00 \text{ m}^3 / \text{día}$$

$$\text{Vida útil} = 1\,000,87 \text{ días} = 2,9 \text{ años}$$

La capacidad del depósito es de 2 años y 8 meses aproximadamente, teniendo en cuenta el incremento de la capacidad de tratamiento de la planta de beneficio de 60 a 120 TMD. Bajo estas condiciones existirá el requerimiento de almacenamiento de relaves en el nuevo depósito de relaves como el indicado.

Figura N° 10. Diseño del Depósito de Relave, método línea central



Fuente: Elaboración Propia

- Muro de partida (1)
- Arenas (relleno) (2)
- Lamas (3)
- Laguna (sol. Barren) (4)

## **CAPITULO III**

### **METODOLOGIA**

#### **3.1. DISEÑO METODOLÓGICO**

##### **3.1.1. Tipo de Investigación**

###### **Explicativo-prospectivo.**

Según los problemas propuestos y los objetivos planteados, el tipo de investigación que se realiza determina un estudio explicativo, del tipo prospectivo, de acuerdo al tipo de información y ocurrencia de los hechos.

###### **Explicativo.**

Se considera explicativo por que se pretende determinar cuáles son los efectos del relave minero en cuanto a su seguridad

###### **Correlacional**

Puesto que la presente tesis estudia las relaciones entre variables dependientes e independientes.

###### **Prospectivo.**

Se considera prospectivo por que los datos que se desea obtener no se han basado en información pasada, sino que se considera el periodo de tiempo que se indica en la presente investigación.

##### **3.1.2. Diseño de Investigación**

El presente trabajo de investigación se compone de varias etapas secuencialmente dependiente para su óptima culminación:

Primera etapa: Caracterización físicas de los relaves a ser evaluados mediante los análisis en laboratorio de muestras.

Segunda etapa: Utilizando tamices para su análisis granulométrico, Malla 200, donde se separan los finos y los gruesos del relave minero.

Tercera etapa: Evaluación de caudales y tonelaje del relave minero.

Cuarta etapa: Estudio de suelo donde será ubicada la poza de relave minero N° 3.

La parte de análisis química del relave de la planta de beneficio MVC2011-II, se menciona que no tiene materiales ácidos como la presencia de pirita, pirrotita, matcasita, es un material oxidado blanquecino.

## **3.2. POBLACIÓN Y MUESTRA DE ESTUDIO**

### **3.2.1. Población**

La población en la presente investigación está dada por los depósitos de relave N°1 y N°2, de características similares, sin material de préstamo de canteras, ni con decrecimiento del dique en cuanto al diseño de ingeniería.

### **3.2.2. Muestra**

Y su respectivo decrecimiento del dique, aún inoperativa, en proceso de construcción hasta ser aprobado por la DREM.

La muestra será no probalística-Intencional Finita. Por lo tanto, el depósito de relave N°3 es la muestra en estudio. Se tomaron muestras de calicatas para el estudio de suelo donde se ubicará el nuevo depósito.

$$n = \frac{N \cdot Z^2 \cdot (P * q)}{N \cdot E^2 + Z^2 (p * q)}$$

Donde:

n = Muestra inicial

Z = Nivel de confianza

P = Probabilidad de éxito y

q = Probabilidad de fracaso

E = Margen de error o nivel de precisión

### **3.3. TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS**

Se realizaron calicatas y puntos de muestreo en distintas partes del terreno, con el fin de tomar muestras, informe técnico realizado por SINGERS, ESTUDIO DE SUELOS PARA HABILITACIÓN DE RELAVES MINERO.

Para efectos de toma de muestras se realizó trabajos de campo, laboratorio y gabinete, para determinar las características del terreno con el fin de establecer las profundidades de cimentación, la capacidad portante admisible del suelo y a partir de ello, los parámetros necesarios para el diseño y construcción del proyecto.

Dichos parámetros son: profundidad, tipo de cimentación, capacidad portante admisible del terreno adoptado como suelo de cimentación, pautas generales del diseño y construcción en relación con los suelos.

### **3.4. TÉCNICAS PARA EL PROCEDIMIENTO DE INFORMACIÓN**

Los trabajos de campo fueron realizados por personal especialista y se programaron de tal manera que toda el área de investigación fue de 3000 m<sup>2</sup>, así se excavaron 06 calicatas a cielo abierto ubicadas estratégicamente lo cual cubre razonablemente el área a investigar.

Las a partir del terreno natural, de ensayo de laboratorio a ejecutar a muestras disturbadas representativas. El tipo de suelo encontrados, de las Se tomaron muestras disturbadas a lo largo de las excavaciones, en cantidad suficiente. Previamente se identificaron los suelos, mediante procedimientos manuales de campo tales como la dilatancia (reacción de agitación), la resistencia en estado seco (características de rompimiento).

También se extrajeron muestras representativas para los ensayos especiales de corte directo. Las características físicas y mecánicas del material extraído se pueden ver en los registros correspondientes de los perfiles estratégicos No se encontró presencia de Napa Freática en la excavación de las calicatas a cielo abierto.

#### **Ensayos de laboratorio:**

- **Ensayos estándar:** Análisis granulométrico por tamizado, límite líquido, índice de plasticidad, contenido de humedad, clasificación SUCS. Según norma ASTM.
- **Ensayos especiales:** Contenido de solubles totales, sulfatos, cloruros, ensayos de corte directo según norma ASTM.

#### **Perfiles estratigráficos.**

Características geotécnicas del área.

- Agresión al suelo de cimentación.
- Análisis de cimentación.

#### **Análisis de estabilidad física del depósito de relave**

##### **Caracterización geotécnica**

Con la finalidad de caracterizar el material relleno común compactado del dique de contención, se efectuaron ensayos geotécnicos que consistieron en las calicatas

mencionadas arriba, con ensayos de densidad insitu, análisis granulométrico de las arenas en reemplazo del agua.

Adicionalmente se analizaron la información existente de construcción y de diseño.

Las investigaciones se presentan en el anexo.

**a) Calicatas y puntos de muestreo,**

Se efectuaron calicatas que variaron en un promedio de 3m. profundidad, se ubicaron puntos de muestreo estratégicamente, de la cual se localizaron en el talud aguas abajo del futuro dique.

En general se ha encontrado que el relleno común compactado en el dique del depósito relave N°3 consiste principalmente en material granulado con pocos finos, un 75% de arena gruesa y algo de arcilla, con una humedad menor al 4%, sin presencia de napa freática.

**b) Ensayos de laboratorio**

Para las muestras representativas obtenidas durante la investigación geotécnica, se efectuaron ensayos de laboratorio con la finalidad de determinar las propiedades, clasificación granulométrica y ensayos especiales del material de relleno del dique. Los ensayos de suelo se ejecutaron en laboratorio en Lima por SINGERS SAC (Estudio de suelo para habilitación de relave minero).

A partir de las muestras de suelo extraídas de los materiales almacenados en el depósito de relave N° 2 se efectuaron los siguientes ensayos de laboratorio: Contenido de humedad, análisis granulométrico clasificación SUCS.

## **Propiedades de resistencia de los materiales**

Se muestran los diferentes parámetros geotécnicos de los diferentes tipos de materiales considerados en el análisis de estabilidad del depósito relave N° 2, según la condición analizada.

Las propiedades resistentes fueron estimadas sobre la base de la información obtenida del estudio previo, y de los ensayos de campo y de laboratorio realizados como parte de la campaña geotécnica realizada, de acuerdo a la práctica ingenieril, y de la experiencia en proyectos similares.

La información incluye pesos unitarios húmedo/saturado y parámetros de resistencia al corte en términos de esfuerzos efectivos para todas las unidades, a excepción del relave.

## **Criterios de análisis utilizados**

El análisis de estabilidad física del depósito de relave N°3, ha sido desarrollado a modo de cumplir los requerimientos mínimos aceptables de acuerdo a las regulaciones mineras vigentes. Se realizó el análisis de estabilidad para condición estática y en condiciones de sismo (análisis pseudoestáticos) mediante métodos de equilibrio límite, a fin de estimar los factores de seguridad más bajos.

En caso de análisis pseudo estáticos, la guía ambiental para la Estabilidad de Taludes de Depósitos de Desechos Sólidos de Mina (Ministerio de Energía y Minas Dirección General de Asuntos Ambientales; Lima Agosto de 1997) ha propuesto utilizar un valor de coeficiente sísmico (CS) que varía entre  $\frac{1}{2}$  y  $\frac{2}{3}$  de la aceleración máxima a nivel de terreno (Peak Ground Acceleration, por sus siglas en ingles).

**Tabla 6. Factores de seguridad Mínimos para Análisis de Estabilidad Física en Presas de tierra**

<b>Condición</b>	<b>Talud Aguas</b>	
	<b>Arriba</b>	<b>Abajo</b>
1) Al final de la construcción para presas de más de 15 m.	1.3	1.3
2) Estado de infiltración constante	1.4	1.4
3) Desembalse rápido.	1.5	1.5
4) Sismo solo condiciones 1 y 2	1.0	1.0

De estos antecedentes, el depósito de relave es una estructura con una profundidad promedio de 6m., que no representa un riesgo significativo alto debido a que el depósito de relaves yace en una zona de pendiente suave y no existe estructuras ni vivienda aguas abajo del dique.

Los valores a considerarse en el análisis de estabilidad física son:

- Factor de seguridad mínimo de 1.4 para condiciones estáticas
- Factor de seguridad mínimo de 1.0 en condiciones sísmicas. (pseudoestáticas)

Cabe señalar que el depósito de relave en sus condiciones actuales, se encuentra en Una etapa de diseño y algunos avances en su estructura.

Los análisis de estabilidad en condiciones pseudoestático considera una aceleración pico de terreno para un periodo de retorno de más de 50 años” Estudio de peligros sísmico para la ampliación de capacidad instalada a 150 TMPD de la planta de beneficio de MACDESA – Arequipa 2020”, con un coeficiente sísmico a 0.16 g el cual representa ½ de la aceleración máxima 32 g, a nivel de terreno, el cual. es recomendado para condiciones de operación de nuestra planta.

Cabe señalar que el depósito de relave en su condición actual, se encuentra en etapa de espera, hasta que la DREM-Arequipa, apruebe el estudio.

El pueblo más cercano a la planta de beneficio de MACDESA, se encuentra a casi 4 KM de distancia.

## **CAPITULO IV**

### **RESULTADOS**

#### **4.1 RELAVE**

##### **4.1.1. Objetivos**

Como sabemos el mineral concentrado debe ser previamente reducido en su contenido de agua. En la planta minera **EMPRESA MINERA AURIFERA CUATRO DE ENERO S.A.** la eliminación de agua (solución barren) se realiza únicamente por sedimentación natural en la poza del relave.

A estos depósitos se alimenta la pulpa concentrada (ganga con valores de oro) por medio de tuberías colocando en la compuerta del tanque de adsorción número cuarto y a medida que la cancha se va llenando, son protegidas con muros del mismo relave que permite la filtración y la remoción del agua clarificada, que son depósitos de menor volumen; Las partículas valiosas se sedimentan por acción de la gravedad y el agua es separada casi limpia para su recirculación.

##### **4.1.2. Deposición de Relave del circuito de oro**

El relave del circuito de oro es llevado por una tubería y por acción de la gravedad, a un depósito ubicado en la parte inferior de la pendiente en que está situada la planta; ese depósito tiene una extensión amplia que ha sido adecuada para permitir una sedimentación natural de las partículas sólidas y lograr que el agua clarificada sea expulsada.

#### 4.1.3. Sistema de Bombeo de Agua (recirculación de la solución barren)

La estación de bombeo, tiene la función de disminuir la capacidad de agua necesaria para el consumo de la planta concentradora. El agua (solución barren) proviene del relave que es bombeado a la poza de la planta de una capacidad de 34 m<sup>3</sup>



Figura 11. Cancha de Relaves

## 4.2. DISPOSICIÓN DE RELAVES

Los relaves del proceso de cianuración, ya sean de la lixiviación en pilas (heap leaching) o mediante agitación, deberán ser almacenados en relaveras especialmente diseñadas y construidas, las cuales deberán contar con un permiso de construcción y funcionamiento. Los relaves deben ser almacenados de acuerdo a lo descrito en el Estudio de Impacto Ambiental aprobado.

### 4.2.1. Disposición de Relaves de Cianuración

Las soluciones con cianuro que van a la cancha de relave, normalmente tienen concentraciones menores a 0.05 gramos por litro. En la Cancha de Relaves se tiene una

poza de decantación donde se junta la solución que sobrenada en la relavera.

Dicha solución es bombeada a la poza o tanque de solución barren donde es acondicionada y de allí regresa al circuito de la planta. Los depósitos de relaves cianurados deben tener un recubrimientos de geomembrana en la base para no permitir las filtraciones de soluciones al subsuelo.

En el caso que se quiera destruir el cianuro remanente en las soluciones existentes en las canchas de relave, se puede oxidar agregando Peróxido de Hidrogeno ( $H_2O_2$ ), para convertir el Cianuro en Cianato, el Cianato en presencia del agua termina por descomponerse de acuerdo a las siguientes reacciones:



## **4.2.2 Instalación**

### **4.2.2.1. Preparación de la Sub Rasante**

El supervisor de la **EMPRESA MINERA AURIFERA CUATRO DE ENERO S.A.** inspecciono la plataforma y taludes de la cancha de relaves preparada para garantizar que ésta constituya una base firme y estable para la construcción del sistema de revestimiento.

### **4.2.2.2. Excavación y relleno de la trinchera de anclaje**

Las trincheras de anclaje se excavaron de acuerdo a las líneas y niveles que figuran en los planos.

### **4.2.2.3. Transporte y almacenamiento**

Los Geosintéticos fueron trasladados desde Lima hacia la mina mediante camiones. La descarga de los rollos o bultos fue mediante una grúa.

El equipo que llevo los paneles hacia la cancha de relaves No 7 fue un equipo liviano capaz de cargar un peso aprox. de 01 Tonelada Métrica. El equipo liviano fue utilizado generalmente para los paneles de geomembrana de PVC.

#### **4.2.2.4. Despliegue**

El despliegue de la Geosintéticos se realizó conforme a lo establecido en los planos de distribución de paneles realizado por Cidelsa y documentado en su respectivo formulario.

Se tomó en consideración el sentido del viento y se insistió en llevar un control de los rollos de geotextil y de los paneles de geomembrana de PVC desplegada por día. La aprobación de los paneles desplegados lo realizaba la supervisión, SMEB y el ingeniero residente de Cidelsa.

#### **4.2.2.5. Colocación**

La colocación de las Geosintéticos fue realizada mediante maniobras adecuadas orientadas por Cidelsa y cuadrillas de obreros suficientes para mover paneles de 1,000 Kg. aprox.

La colocación de la geomembrana fue realizada por Cidelsa de forma que todas las soldaduras sean orientadas en el sentido del talud (perpendicularmente al borde superior de todos los taludes).

### **4.2.3. Método**

Existen diferentes métodos para estimar el espesor requerido de geomembranas sujetas a asentamientos diferenciales, los cuales han sido desarrollados, en general, considerando la geometría de la deformada, las características de los geosintéticos

que forman la interfaz y los esfuerzos normales que solicitan la geomembrana.

Para el análisis de este fenómeno se considera el uso del modelo de Torrealba – Kalinsky – Paredes. Este modelo utiliza la teoría de la elasticidad asumiendo una deformación circular del asentamiento, como se muestra en la figura N° 2.

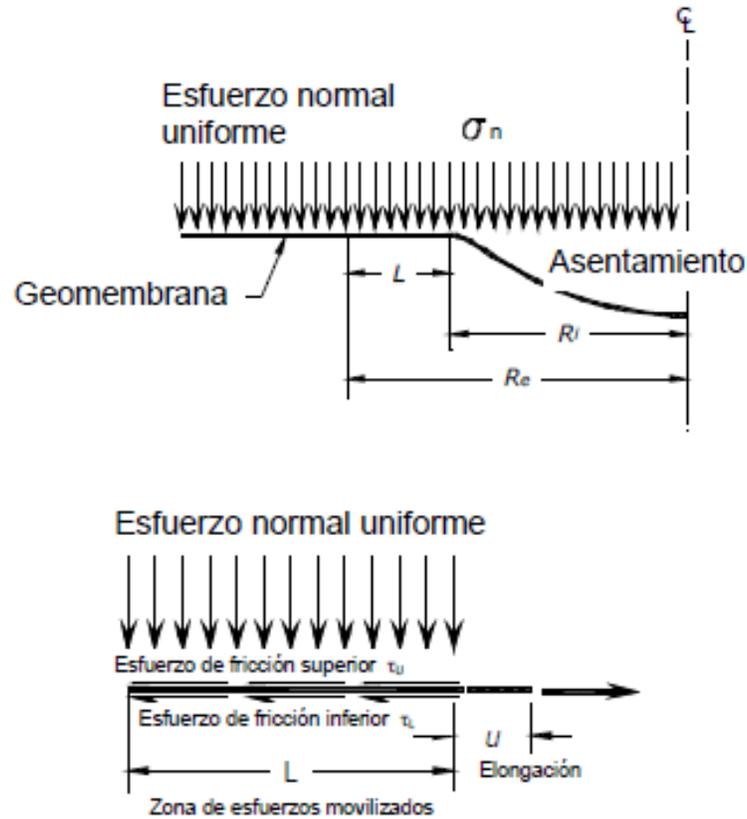


Figura N° 12: Modelo de Torrealba – Kalinsky – Paredes

Para determinar el espesor requerido de la geomembrana, se utiliza la siguiente expresión:

$$t_{req} = \frac{R_i \cdot \tau}{2 \cdot \sigma_{adm}} \left\{ \left[ \frac{U \cdot E + \sigma_{adm} \cdot R_i \cdot (1 - \mu)}{\sigma_{adm} \cdot R_i \cdot (1 + \mu) - U \cdot E} \right]^2 - 1 \right\} (FS)$$

Donde:

$t_{req}$  : Espesor requerido de la geomembrana, en m;

$R_i$  : Radio interior o radio de la subsidencia, en m;

$\tau$  : Esfuerzo de corte dado por la carga normal sobre la geomembrana

y por la fricción con las superficies de contacto, en  $\text{kN/m}^2$ ;

$\sigma_{adm}$  : Tensión admisible de la geomembrana;

U : Elongación total de la geomembrana, en m; (se obtiene de la integración de u entre  $R_i$  y  $R_e$ ).

E : Módulo de Young de la geomembrana, en  $\text{kN/m}^2$ ;

$\mu$  : Coeficiente de Poisson de la geomembrana;

FS : Factor de seguridad.

La estimación del esfuerzo de corte en la geomembrana, se realiza bajo la siguiente ecuación:

$$\tau = \gamma \cdot H \cdot (\tan(\delta_U) + \tan(\delta_L))$$

Donde:

$\gamma$  : Densidad de relaves almacenados, en  $\text{kg/m}^3$ ;

$\delta_U$  : Ángulo de fricción interfaz superior;

$\delta_L$  : Ángulo de fricción interfaz inferior;

H : Carga de relave en profundidad máxima de área de depositación, en m.

La elongación total de la geomembrana, se realiza bajo la siguiente ecuación:

$$U = \frac{\sigma_{adm} \cdot R_i}{(2R_i + L) \cdot E} [L + (2R_i + L)\mu]$$

Donde:

L : Zona de esfuerzos movilizados, en m.

### 4.3 RESULTADOS

Para poder cuantificar “la cantidad de fugas evitadas” mediante el uso de una geomembrana, se llevó a cabo un análisis comparativo simplificado cuyo objetivo fue

realizar una comparación entre las instalaciones de contención de relaves revestidas con geomembrana y las instalaciones no revestidas, ubicadas en lugares con presencia de arcillas de formación natural o arcillas compactadas de 1 de espesor, ( $k = 1 \times 10^{-7}$  cm/sec.) con diversas cargas hidráulicas. El tamaño y la frecuencia de los defectos fueron estimados en base a datos de desempeño publicados, considerándose tres categorías de instalación de revestimientos: De alta calidad, de calidad promedio, y de baja calidad, las cuales representaban respectivamente, (i) una excelente instalación de revestimiento y programa CQA, (ii) una buena instalación con programa CQA, y (iii) una mala instalación sin un programa CQA efectivo. La siguiente tabla resume los resultados de dicha comparación.

**Tabla N° 7. Valores Utilizados Para Cálculo de Tasas y Reducción de Fugas en Geomembrana.**

TASAS DE FUGA (Litros por Ha por Día)			Reducción de Fugas (%)		
Carga (m)	geomembrana de alta calidad	geomembrana de calidad promedio	geomembrana de baja calidad	solamente arcilla (1 m)	(fuga por arcilla - fuga por geomembrana) / fuga por arcilla
1	6	37	79	864	de 91 a 99%
5	35	208	446	4,320	de 90 a 99%
10	86	503	1,077	8,640	de 88 a 99%
20	230	1,350	2,894	17,280	de 83 a 99%

### Parámetros de Diseño

Los valores a utilizar para el cálculo del espesor de la geomembrana se presentan en la Tabla N° 8.

**Tabla N° 8. Valores Utilizados Para Cálculo de Espesor de Geomembrana.**

Variable	Valor	Unidad	Comentario
$\delta U$	9,0	°	Interfaz superior: Relave espesado con humedad de depositación y Geomembrana HDPE lisa; valor estimado de acuerdo a base de SNC LAVALIN.
$\delta L(\text{máx})$	11,0	°	Interfaz Inferior máx (ángulo de fricción mayor): Geomembrana HDPE lisa y Geotextil del tipo no tejido agujado; valor estimado de acuerdo a base de SNC LAVALIN.
H	8,0	m	Máxima carga de relaves en zona de depositación.
Y	18,70	kN/m <sup>3</sup>	Peso específico de la pulpa de relaves espesados durante depositación.
R <sub>i</sub>	1,50	m	Valor estimado por SNC LAVALIN.
$\sigma_{adm}$	14.667	kN/m <sup>2</sup>	Tensión admisible (fluencia) de la geomembrana. <sup>1</sup>
E	900.000	kN/m <sup>2</sup>	Valor correspondiente a HDPE.
$\mu$	0,5	-	Valor correspondiente a HDPE.
L	0,10	m	Valor estimado según criterio SNC LAVALIN.

En base a la ecuación del esfuerzo de corte generado en la geomembrana, se estima un valor igual a 51,72 kN/m<sup>2</sup>.

Utilizando la ecuación para la determinación del espesor requerido y considerando un espesor de diseño de la geomembrana de 1,5 mm, se obtienen los resultados presentados en la Tabla N° 9 a continuación.

<sup>1</sup> Valor obtenido de Tabla 1-b de "Standard Specification for Test Methods, Test Properties and Testing Frequency for High Density Polyethylene (HDPE) Smooth and Textured Geomembranes", GRI Test Method GM13.

Tabla N° 9. Resultados Cálculo Espesor Geomembrana.

Espesor Requerido mm	Esfuerzo Corte kN/m <sup>2</sup>	FS
0,36	51,72	4,12

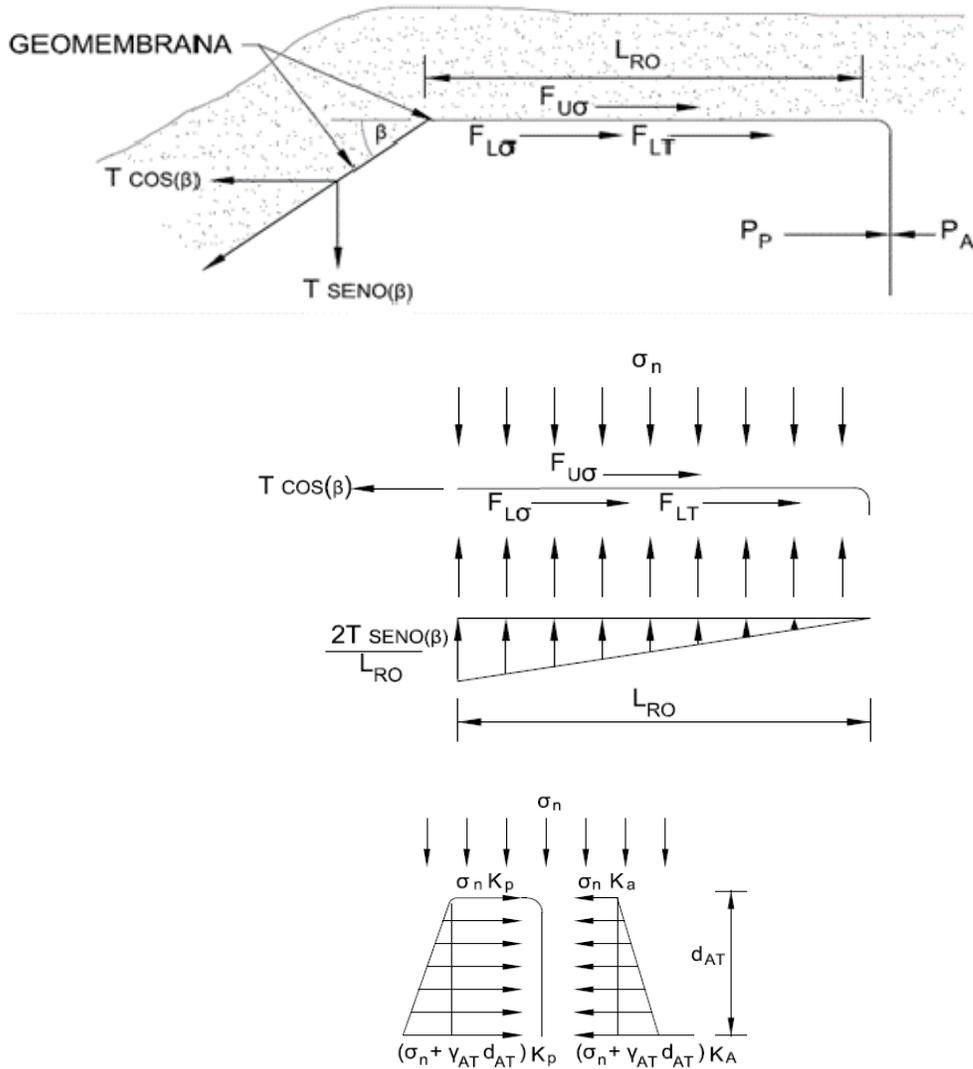


Figura N° 13. Modelo para Diseño de Anclajes Geomembrana.

Según este modelo, se deberán calcular fuerzas cortantes producto de las cargas sobre los geosintéticos, las presiones de suelo y las tensiones a las cuales se someterán las geomembranas para evaluar el funcionamiento del anclaje mediante la razón de anclaje (AR).

La razón de anclaje se define bajo la siguiente expresión:

$$AR = \frac{T_{adm\ GM}}{T_{adm\ zanja}}$$

Donde:

$T_{adm\ GM}$  : Tensión admisible de la geomembrana.

$T_{adm\ zanja}$  : Tensión admisible máxima capaz de soportar el anclaje.

El diseño se considera satisfactorio cuando AR es mayor que 1, por ende el diseño es controlado por el arranque de la geomembrana del anclaje, lo que evita el rompimiento de ésta por tensión.

**Tabla N° 10. Bases de Diseño Anclaje.**

Variable	Valor	Unidad	Comentario
Talud	33,69	°	Correspondiente al talud de rellenos H:V = 1,5:1 de pretilas.
ZA	17,50	KN/m <sup>3</sup>	Peso específico para relleno de zanja de anclaje.
S	28	°	Ángulo fricción interna del suelo y del relleno de la zanja (SM) <sup>3</sup> .
dAT	0,8	m	Profundidad de zanja de anclaje.
LRO	1,0	m	Largo del hombro entre el coronamiento y la zanja.
$\sigma_{adm}$	14.667	KN/m <sup>2</sup>	Tensión admisible de la geomembrana.
t	1,5	mm	Espesor geomembrana.
S-G	0	°	Ángulo de fricción entre el suelo y la geomembrana. Se desprecia de forma conservadora, según criterio SNC LAVALIN.

De los cálculos realizados se obtienen los siguientes resultados: Tensión admisible de la geomembrana  $\sigma_{adm} \cdot t = 16.9 \text{ kN/m}$

Tensión admisible del anclaje = 7,38 kN/m

Por tanto, la Razón de anclaje  $AR = (16,9 \text{ kN/m}) / (7,38 \text{ kN/m}) = 2,29 > 1$

De lo anterior se concluye que el arrancamiento de la geomembrana (falla del anclaje) controla el diseño, antes que el desgarre.

## CAPITULO V

### DISCUSIÓN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1. DISCUSIÓN

El análisis de fugas demuestra que la instalación de una geomembrana reduce la pérdida de líquidos entre un 83% y un 99%, valores que superan los de la arcilla sola. Este enfoque proporciona una idea a grandes rasgos del ahorro de agua potencial resultante del uso de geomembranas en el diseño de embalse de relaves. Una referencia importante, que cabe destacar, sobre los revestimientos de geomembrana cuya instalación es de “baja calidad,” es que los datos y los estudios internos sugieren que más del 30% de dicho tipo de instalaciones experimentan una falla que requiere, ya sea de una reconstrucción de considerable envergadura, o de ser reemplazados en su totalidad, (ó abandonados), lo cual no se ve reflejado en las tasas de fuga reportadas en la tabla precedente, (la tasa de ocurrencia de fallas en las instalaciones clasificadas como “de calidad promedio” ó “de alta calidad” es insignificante).

Un sistema de contención cuya instalación es clasificada de alta calidad, también reduce el riesgo de ocurrencia de fallas estructurales debido a diversos factores favorables. La reducción de la posibilidad de filtración en el dique y en los cimientos, mejora la estabilidad de los taludes y reduce el riesgo de erosión interna (ó “socavamiento”), que es la causa de la fallas en muchas presas, incluyendo los ampliamente conocidos casos de las fallas de la presas de “Los Frailes” (España) y “Omai” (Guyana). Un estudio reciente sobre fallas en presas de relaves llevado a cabo por la empresa del autor de este artículo, tomó en cuenta 122 fallas documentadas, hallando los siguientes eventos causantes: Solo la filtración fue

la causa principal del 14% de las fallas; la inestabilidad de taludes del 30%; los cimientos del 11%; y los movimientos sísmicos del 20%. La inestabilidad de taludes, las fallas en los cimientos y las repuestas a movimientos sísmicos, son todos aspectos considerable y negativamente afectados por las superficies freáticas más altas en los diques y en los cimientos. Por consiguiente, un total del 75% de estas fallas estuvo directamente relacionado a eventos de filtración, y la probabilidad de ocurrencia de dichas fallas podría haber sido significativamente menor y estas podrían haber sido muy probablemente evitadas, mediante un sistema de revestimiento de buena calidad. Un sistema de revestimiento también permite que una presa sea diseñada más agresivamente; es decir, con taludes más empinados, con rellenos de dique menos costosos y complicados y con métodos de construcción más simples, que pueden compensar el costo del revestimiento. En resumen, el desecho convencional de relaves representa uno de los riesgos más altos en la minería y considerar estos aspectos en el diseño es bastante aconsejable.

Si entre los aspectos concernientes al diseño se incluyen la degradación ambiental, la conservación de agua o la reducción de riesgos, entonces el empleo de geomembranas en el diseño de instalaciones para el almacenaje de relaves o residuos, podría mejorar considerablemente su desempeño. Según se ilustra con un análisis cuantitativo comparativo de tasas de fuga, la construcción de embalses para relaves con geomembranas puede reducir las fugas hasta en un 99%. Adicionalmente, el riesgo de falla es mitigado, eliminándose substancialmente un 75% de la causas por las cuales ocurren la mayoría de las fallas en presas de relaves. Al emplearse técnicas de instalación de calidad promedio o de calidad alta, se reduce aún más el riesgo de ocurrencia de fallas en los revestimientos de geomembrana, por lo menos en un 30%.

## 5.2. CONCLUSIONES

- De acuerdo a los cálculos realizados en la **EMPRESA MINERA AURIFERA CUATRO DE ENERO S.A.**, el espesor de la geomembrana de 1.5 mm cumple con los asentamientos esperados y se obtiene un factor de seguridad de 4,12 veces el espesor requerido. Para ver detalles de cálculos ver Anexo A, adjunto al presente documento.
- Los cálculos realizados para determinar el factor de seguridad en la **EMPRESA MINERA AURIFERA CUATRO DE ENERO S.A.**, se obtiene un factor de seguridad de 3,67 ( $FS > 1$ ), lo que asegura seguridad del sistema ante el punzonamiento. Para ver detalle de los cálculos, revisar Anexo A adjunto.
- De acuerdo con los cálculos realizados (Anexo A), se verifica que la tensión admisible de la geomembrana es mayor que la tensión admisible del anclaje, por ende el diseño se considera satisfactorio.

## 5.3. RECOMENDACIONES

- Se recomienda supervisar a todos los trabajadores de la planta en el uso diario de sus implementos de seguridad
- Para mejorar el chancado se debe mejorar el set de descarga de la chancadora o bien soldar fierros corrugados con la finalidad de sustituir los dientes desgastados del grizzly. Para así poder aumentar la capacidad de la planta.
- Tener equipos de primeros auxilios
- Implementar el laboratorio para llevar una mejor cianuración y un buen análisis del mineral

- Cambiar la ubicación de los molinos de muestreo.
- Cumplir con la lista de víveres para tener una alimentación adecuada para un buen rendimiento del trabajador.
- Tener más comunicación con el personal de planta, cada jefe de guardia y los ingenieros.
- Hacer pozas sépticas para la basura.
- Hacer una poza para recuperación de agua del lavado de carbón y laboratorio.

## CAPITULO V

### FUENTES DE INFORMACIÓN

#### 6.1 Fuentes bibliográficas

- Alva Hurtado J.E. Meneses J.Y Guzmán V. (1984) “Distribución de Máximas Intensidades Sísmicas Observadas en el Perú”, V Congreso Nacional de Ingeniería Civil. Tacna. Perú.
- Cáceres D. & Cerdanyola del Valle (2015) Tesis Doctoral, “Evaluación de los efectos agudos en la función pulmonar por exposición a material particulado fino (mp2.5) en niños que viven próximos a una playa masivamente contaminada con relaves mineros”. Chañaral - Chile. Departamento de Pediatría Obstetricia, Ginecología y Medicina Preventiva. Facultad de Medicina.
- Caroca. & Vallejo (2015) “informe sobre la situación de los relaves mineros en Chile para ser presentado en el cuarto informe periódico de Chile para el comité de derechos económicos, sociales y culturales, perteneciente al Consejo Económico Social de las Naciones Unidas Fundación relaves Chile y Fundación Terram Medvinsky”
- Claudia A. (2017) [www.csíro.cl](http://www.csíro.cl) Santiago, 2 Agosto.
- Juárez Badillo —Rico Rodríguez: “Mecánica de Suelos,” tomos I y II Quinta Edición 1987.
- Karl Terzag / Ralph B. Peck: “Mecánica de suelos en la Ingeniería”, práctica, segunda edición.1973.
- Palomino A. & Omar D. (2014), Lima-Perú, en su tesis de grado “Construcción de dique con tratamiento del relave, en la mina Catalina Huanca”— Región Ayacucho.

- Romero R. & Amanda L. (2015) Tesis: “Tratamiento de relaves mineros contaminados con y plantación de gramíneas {kikuyo) para convertirlos en áreas verdes en las minas de la región central del Peru” Tesis para optar el grado de Maestro en Seguridad y Medio Ambiente en Minería. Huancayo-Perú 2015, Universidad Nacional del Centro.

**Anexo 1: Matriz de Consistencia:**

**“EVALUACIÓN Y TRATAMIENTO DEL RELAVE EN LA PLANTA CONCENTRADORA DE LA MINERA AURIFERA 04 DE ENERO S.A. (MACDESA) – AREQUIPA 2020”**

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPOTESIS	VARIABLES E INDICADORES	MÉTODOS/ TÉCNICAS	INSTRUMENTOS
<p><b>Problema General</b></p> <p>¿Qué relación existe entre evaluación del relave minero y su tratamiento en la planta de beneficio MACDESA – Arequipa 2020?</p> <p><b>Problemas Específicos</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ ¿Qué relación existe entre los factores de seguridad estáticos y pseudoestáticos del relave minero y su tratamiento en la planta de beneficio MACDESA – Arequipa 2020?</li> <li>▪ ¿Qué relación existe entre las propiedades resistentes de los materiales que conforman el dique del relave minero y su tratamiento en la planta de beneficio MACDESA – Arequipa 2020?</li> <li>▪ ¿Qué relación existe entre las propiedades geotécnicas del relave minero y su tratamiento en la planta de beneficio MACDESA – Arequipa 2020?</li> </ul>	<p><b>Objetivo General</b></p> <p>Determinar la relación entre evaluación del relave minero y su tratamiento en la planta de beneficio MACDESA – Arequipa 2020.</p> <p><b>Objetivos Específicos</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Determinar si los factores de seguridad estáticos y pseudoestáticos del relave minero afectan el tratamiento en la planta de beneficio MACDESA – Arequipa 2020.</li> <li>▪ Determinar si las propiedades resistentes de los materiales que conforman el dique del relave minero afectan el tratamiento en la planta de beneficio MACDESA – Arequipa 2020.</li> <li>▪ Determinar si las propiedades geotécnicas del relave minero afectan en el tratamiento en la planta de beneficio MACDESA – Arequipa 2020.</li> </ul>	<p><b>Hipótesis General</b></p> <p>Existe relación entre evaluación del relave minero y su tratamiento en la Planta de Beneficio MACDESA – Arequipa 2020</p> <p><b>Hipótesis Específicas</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Existe relación directa entre los factores de seguridad estáticos y pseudoestáticos de relave minero y su tratamiento en la Planta de Beneficio MACDESA – Arequipa 2020</li> <li>▪ Existe relación directa entre las propiedades resistentes de los materiales que conforman el dique del relave minero y su tratamiento en la Planta de Beneficio MACDESA – Arequipa 2020.</li> <li>▪ Existe relación directa entre las propiedades geotécnicas del relave minero y su tratamiento en la Planta de Beneficio MACDESA – Arequipa 2020.</li> </ul>	<p><b>Variables</b></p> <p><b>Variable Independiente (X):</b></p> <p>X: Evaluación del relave minero.</p> <p><b>Variable dependiente (Y):</b></p> <p>Y: Tratamiento en la planta de beneficio MACDESA</p> <p><b>Indicadores:</b></p> <p><b>Evaluación del relave minero:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Porcentaje de sólidos</li> <li>▪ Volumen</li> <li>▪ Factor de seguridad</li> <li>▪ Estabilidad del talud</li> </ul> <p><b>Tratamiento en la planta de beneficio MACDESA:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Producción de relave</li> <li>▪ Volumen de relave</li> </ul>	<p><b>Tipo de investigación</b></p> <p>Tesis Explicativa, correlacional y Prospectiva.</p> <p><b>Diseño de investigación</b></p> <p>El presente trabajo se compone de varias etapas secuencialmente dependiente para su óptima culminación. Primera etapa: caracterización física de los relaves a ser evaluados mediante los análisis en laboratorio de muestras. Segunda etapa: Utilizando tamices para su análisis granulométrico, malla 200, donde se separan los finos y los gruesos del relave minero. Tercera etapa: Evaluación de caudales y tonelaje del relave minero. Cuarta etapa: Estudio del suelo donde será ubicada la poza del relave minero.</p>	<p>Se realizará calicatas para poder visualizar la estratigrafía y determinar el tipo de ensayo de laboratorio a ejecutar.</p>

## **ANEXO N° 2. GEOMEMBRANAS**

### **ESPECIFICACIONES TÉCNICAS GENERALES DE LOS GEOSINTÉTICOS**

#### **1. Características de los geosintéticos**

##### **1.1 Geomembranas.**

Todas las geomembranas, tanto de HDPE como las de LLDPE serán producidas con resinas vírgenes de alta calidad, especialmente producidas para aplicaciones de contención de líquidos. Se suministrarán en rollos de ancho mínimo 6,8 m y su largo mayor a 150 m en el caso de las geomembranas de 1,5 mm. Las características técnicas de la geomembrana secundaria se indican en capítulos posteriores.

La geomembrana proyectada ha sido diseñada por función y especificada en el Proyecto, correspondiendo a una geomembrana de HDPE de 1,5 mm e incorpora en su especificación, características físicas, mecánicas y ambientales, basadas en el estado del arte del conocimiento de geosintéticos internacional, lo que permite esperar una vida útil que excede la duración del proyecto y su período de monitoreo.

##### **1.2 Geotextiles**

Los geotextiles suministrados serán del tipo no tejidos punzonados, fabricados con fibras de polipropileno, y controles de calidad tales que permitan completar los protocolos de aseguramiento de calidad y/o bajo normas ISO 9000. Su ancho mínimo será 3,8 m.

#### **2. Estándares**

Para fines de esta Especificación, tanto para el suministro como para la instalación de los geosintéticos se aplicarán los siguientes estándares:

- U.S. EPA/600/R93/182, September 1993: Quality Control Assurance and Quality Control for Contaminants Containment.
- Section 7-8 U.S. EPA Technical Guidance Document: “Inspection Techniques for the Fabrication of Geomembrane Field Seams”.
- National Sanitation Foundation (NSF) indicados en la norma NSF 54 –1991.
- “Flexible membrane liners. NSF International Standards”.

### A.3: Normas Técnicas

**Tabla N° 10. Especificaciones Técnicas Geomembrana de HDPE lisa**

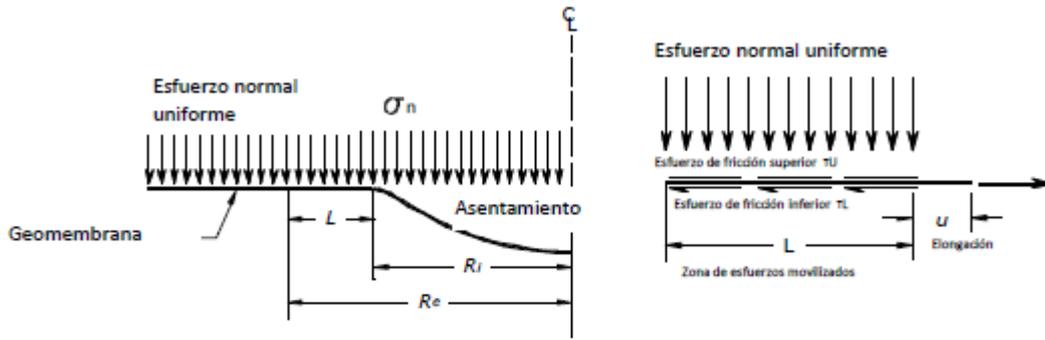
Propiedades	Método Ensayo	Ensayo Valor	Frecuencia de Ensayo (Mínimo)
		1.50 mm	
Espesor (mínimo promedio)	D5199	Nominal	Por Rollo
El más bajo de 10 valores		-10% (mil)	
Densidad g/cc (mínima)	D 1505/D 792	0.940	90,000 kg
Propiedades Tracción (1) (promedios mínimos)	D 6693 Tipo IV	22 kN/m 40 kN/m 12% 700%	9,000 kg
Resistencia a la tracción en el límite de fluencia			
Resistencia a la tracción en el límite de ruptura			
Elongación en la fluencia			
Elongación en la ruptura			
Resistencia al rompimiento (promedio mínimo)	D 1004	187 N	20,000 kg
Resistencia al punzonamiento (promedio mínimo)	D 4833	480 N	20,000 kg
Resistencia al Stress Crack (2)	D5397 (Aprox)	300 hr.	Por GRI-GM10
Contenido de Negro de Humo (rango)	D 1603 (3)	2.0-3.0%	9,000 kg
Dispersión de Negro de Humo	D 5596	nota (4)	20,000 kg
Tiempo de Inducción del Oxidante (OIT) (promedio mínimo) (5)			
(a) OIT estándar	D 3895	100	90,000 kg
— ó —			
(b) OIT a Presión Alta	D 5885	400	
Envejecimiento en Horno a 85°C (5), (6)	D 5721		Por cada formulación
(a) OIT estándar (prom. mín.) - % retenido después de 90 días	D 3895	55%	
— ó —			
(b) OIT a Presión Alta (prom. mín.) - % retenido después de 90 días	D 5885	80%	
Resistencia a los rayos UV (7)			Por cada formulación
(a) estándar (prom. mín.)	D 3895	N.R. (8)	
— ó —			
(b) OIT a Alta Presión (prom. mín.) - % retenido después de 1600 hrs (9)	D 5885	50%	

- 1) Los valores de los ensayos en el sentido de fabricación (MD), y en sentido transversal de fabricación (XMD) deben estar basados en las 5 muestras en cada dirección.  
La elongación en la fluencia es calculada utilizando una longitud de muestra de 33 mm.  
La elongación en la ruptura es calculada utilizando una longitud de muestra de 50 mm.
- (2) La tensión en la fluencia utilizada para calcular la carga aplicada en el ensayo SP-NCTL debe ser el valor medio del fabricante por medio de los ensayos de MQC.
- (3) Otros métodos tales como el D 4218 (“muffle furnace” u horno de porcelana) o de microonda son aceptables si se puede establecer una correlación apropiada para el D 1603 (“tube furnace” u horno tipo tubo).
- (4) Dispersión de negro de humo (sólo para aglomerados casi esféricos) para 10 vistas distintas:  
9 en las Categorías 1 ó 2, y 1 en la Categoría 3
- (5) El fabricante tiene la opción de seleccionar cualquiera de los métodos de OIT listados para evaluar el contenido de antioxidante en la geomembrana.
- (6) También es recomendable evaluar las muestras a los 30 y 60 días para compararlas con la respuesta a los 90 días.
- (7) La condición del ensayo debe ser en un ciclo de 20 horas expuesto a los rayos UV, a 75°C seguido por 4 horas de condensación a 60°C.
- (8) No recomendado, ya que la alta temperatura del ensayo con OIT estándar produce un resultado no realista para algunos de los anti-oxidantes en muestras expuestas a los rayos UV.

(9) La resistencia a los rayos UV se basa en un valor de porcentaje retenido, independiente del valor original HP-OIT

### Cálculo del espesor de la geomembrana

#### Modelo Torrealba - Kalinsky - Paredes



$$t_{req} = \frac{R_i \cdot \tau}{2 \cdot \sigma_{adm}} \left\{ \left[ \frac{U \cdot E + \sigma_{adm} \cdot R_i \cdot (1 - \mu)}{\sigma_{adm} \cdot R_i \cdot (1 + \mu) - U \cdot E} \right]^2 - 1 \right\} (FS)$$

$$\tau = \gamma \cdot H \cdot (\tan(\delta_U) + \tan(\delta_L))$$

$$U = \frac{\sigma_{adm} \cdot R_i}{(2R_i + L) \cdot E} [L + (2R_i + L)\mu]$$

#### DATOS

$\delta_U$	9	°	Ángulo de fricción interfaz inferior
$\delta_L$	11	°	Ángulo de fricción interfaz superior
H	8	m	Altura máxima de carga de relave depositado sobre geomembrana
$\gamma$	18.33	kN/m <sup>3</sup>	Peso específico del relave depositado
$R_i$	1.5	m	Radio de la subsidencia
$\sigma_{adm}$	14.667	kN/m <sup>2</sup>	Tensión admisible de la geomembrana (fluencia)
E	900.000	kN/m <sup>2</sup>	Módulo de elasticidad de la geomembrana
$\mu$	0.5		Coefficiente de Poisson de la geomembrana
L	0.1	m	Zona de esfuerzos movilizados

#### CÁLCULOS

U	0.013	m	Elongación total de la geomembrana
$\tau$	51.72	kN/m <sup>2</sup>	Esfuerzo de corte en la geomembrana
$t_{crit}$	0.36	mm	Espesor de geomembrana con que se alcanza la tensión admisible
$t_{req}$	1.5	mm	Espesor de geomembrana a utilizar
FS	4.12		Factor de Seguridad del diseño