

UNIVERSIDAD NACIONAL DE HUANCAVELICA

(Creada por Ley N° 25265)

FACULTAD DE CIENCIAS DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL - HUANCAVELICA



TESIS

**ANÁLISIS SÍSMICO PSEUDO ESTÁTICO Y PSEUDO
DINÁMICO DE LA ESTABILIDAD DE LA PRESA N° 9
ACCHILLA-CCOCHACCASA-ANGARAES-
HUANCAVELICA**

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN

GEOTECNIA

PRESENTADO POR:

Bach. QUISPE TUNQUE, Daniel Gustavo.

Bach. ZÚÑIGA ESPINOZA, Ángel

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

Ingeniero Civil

HUANCAVELICA, PERÚ

2019



UNIVERSIDAD NACIONAL DE HUANCATELICA

FACULTAD DE CIENCIAS DE INGENIERÍA



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

En el Auditorium de la Facultad de Ciencias de Ingeniería, a los 12 días del mes de diciembre del año 2019, a horas 7:00 p.m., se reunieron los miembros del Jurado Calificador conformado por los siguientes: **M.Sc. Hugo Rubén LUJAN JERI (PRESIDENTE)**, **Arq. Abdón Dante OLIVERA QUINTANILLA (SECRETARIO)**, **M.Sc. Marco Antonio LÓPEZ BARRANTES (VOCAL)**, designados con Resolución de Consejo de Facultad N° 273-2016-FCI-UNH, de fecha 01 de julio del 2016, así mismo se amplía el cronograma del proyecto de tesis con Resolución de Decano N° 129-2019-FCI-UNH de fecha 26 de julio del 2019, con Resolución de Decano N° 164-2019-FCI-UNH de fecha 09 de diciembre del 2019 se reestructura los miembros de Jurados Evaluadores y con Resolución de Decano N° 292-2019-FCI-UNH de fecha 11 de diciembre del 2019 se ratifica al Asesor y Jurados evaluadores, a fin de proceder con la calificación de la sustentación del informe final de tesis titulado: "ANÁLISIS SÍSMICO PSEUDO ESTÁTICO Y PSEUDO DINÁMICO DE LA ESTABILIDAD DE LA PRESA N° 9 ACCHILLA-COCHACCASA-ANGARAES-HUANCATELICA", presentado por los Bachilleres **Ángel ZUÑIGA ESPINOZA** y **Daniel Gustavo QUISPE TUNQUE**, para optar el **Título Profesional de Ingeniero Civil**; en presencia del **Ing. Carlos GASPAR PACO** como Asesor del presente trabajo de tesis. Finalizado la evaluación a horas 8:30 p.m.; se invitó al público presente y a los sustentantes abandonar el recinto. Luego de una amplia deliberación por parte de los Jurados, se llegó al siguiente resultado:

Ángel ZUÑIGA ESPINOZA

APROBADO



POR UNANIMIDAD

DESAPROBADO



Daniel Gustavo QUISPE TUNQUE

APROBADO

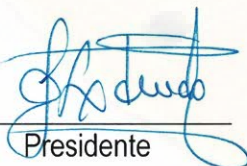


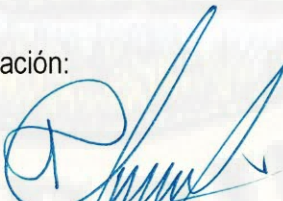
POR UNANIMIDAD

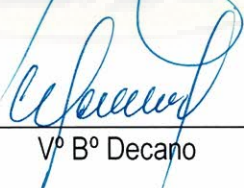
DESAPROBADO

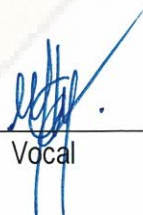


En señal de conformidad, firmamos a continuación:

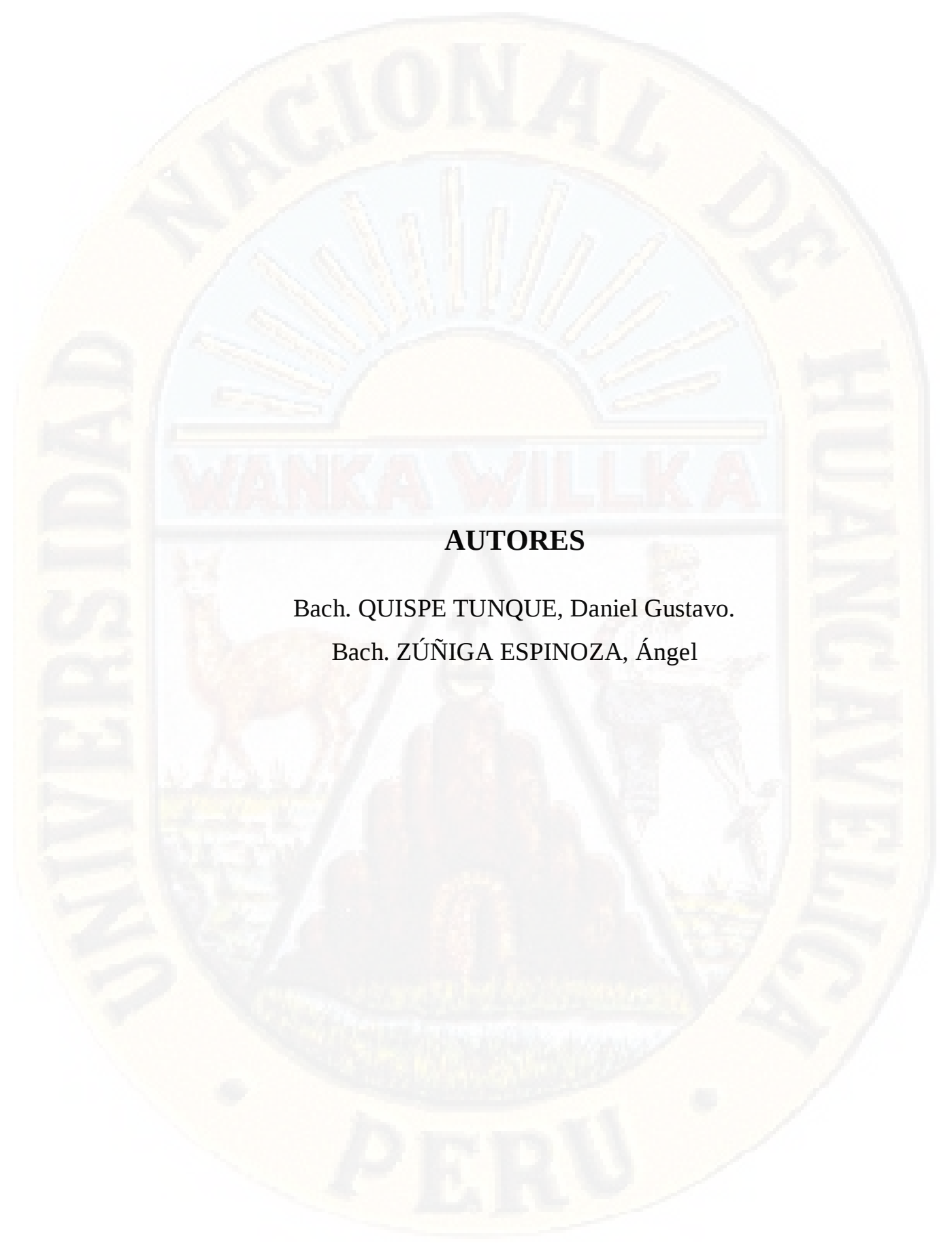

Presidente


Secretario


Vº Bº Decano


Vocal

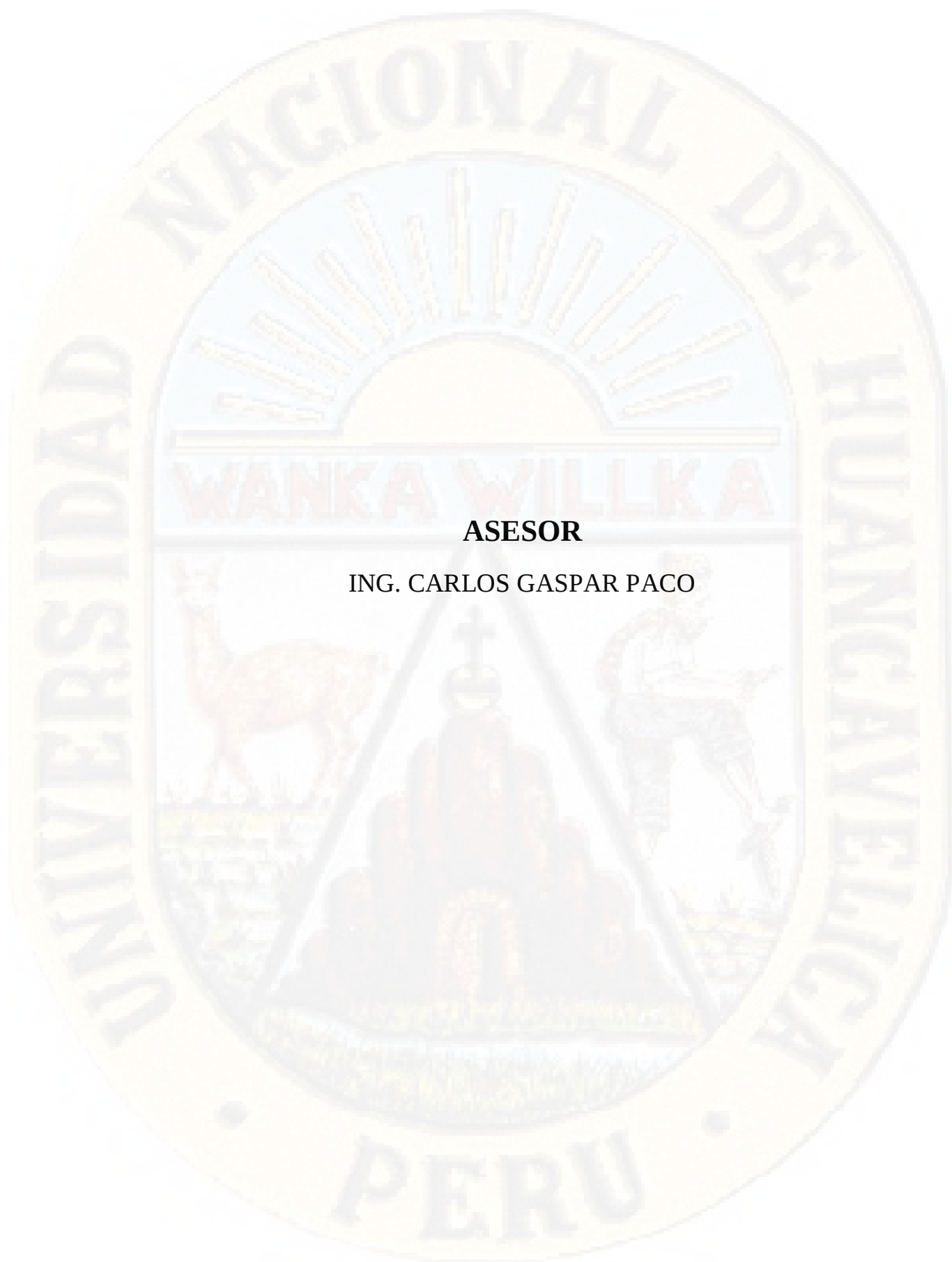
**“ANÁLISIS SÍSMICO PSEUDO ESTÁTICO Y
PSEUDO DINÁMICO DE LA ESTABILIDAD DE
LA PRESA N° 9 ACCHILLA-CCOCHACCASA-
ANGARAES - HUANCAMELICA”**



AUTORES

Bach. QUISPE TUNQUE, Daniel Gustavo.

Bach. ZÚÑIGA ESPINOZA, Ángel



ASESOR

ING. CARLOS GASPAR PACO

DEDICATORIA

A mis padre, Carlos Zúñiga Martínez, hermanos y familia, por brindarme su apoyo incondicional en mi formación académica a pesar de las dificultades, a mis hermanos por el amor fraterno que nos une en las buenas y en las malas.

Ángel Zúñiga Espinoza

A mis padres demás familiares; por acompañarme y guiarme en forma personal y espiritual de manera incondicional durante mi formación como hijo, nieto, hermano, estudiante y profesional.

Daniel Gustavo Quispe Tunque

AGRADECIMIENTO

A la Universidad Nacional de Huancavelica, alma máter, Facultad de Ciencias de Ingeniería, Escuela Académica Profesional de Ingeniería Civil.

A los docentes de la Universidad Nacional de Huancavelica – Escuela Académica profesional de Civil (Huancavelica), por su contribución durante nuestro desarrollo académico y profesional.

Al Ingeniero Carlos Gaspar Paco por su apoyo en todo el desarrollo del proyecto de Investigación, que sin su apoyo no hubiera sido posible esta investigación.

A nuestros compañeros de la Universidad Nacional de Huancavelica, por compartir muchos momentos agradables durante nuestra permanencia en la Universidad.

Los tesisistas

ÍNDICE

DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vi
RESUMEN	xi
ABSTRACT	xii
INTRODUCCIÓN	xiii
CAPÍTULO I	15
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	15
1.1. Descripción del problema	15
1.2. Formulación del problema	23
1.3. Objetivos	24
1.3.1. Objetivo general	24
1.3.2. Objetivos específicos	24
1.4. Justificación	25
1.5. Limitaciones	25
CAPÍTULO II	26
MARCO TEÓRICO	26
2.1. Antecedentes	26
2.2. Bases teóricas:	42
2.3. Definición de términos	69
2.4. Hipótesis	69
2.5. Variables	70
2.6. Operacionalización de variables	70
CAPÍTULO III	72
METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	72
3.1. Ámbito temporal y espacial	72
3.1.1. Superficie del área de estudio	74
3.2. Tipo de investigación	75
3.3. Nivel de investigación	75
3.4. Método de Investigación	75
3.5. Diseño de Investigación	75
3.6. Población, muestra y muestreo	76

3.7.	Técnicas e instrumentos de recolección de datos	76
3.8.	Procedimiento de Recolección de Datos.	77
3.9.	Técnicas y procesamiento de análisis de datos	77
CAPÍTULO IV.....		79
PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....		79
4.1.	Tipo de presas de relave Acchilla N°09	79
4.1.1.	presa de relave Acchilla N°09 construido con el método aguas arriba.....	79
4.1.2.	Topografía.....	81
4.1.3.	Levantamiento topográfico de la presa de relave N° 9 Acchilla	82
4.1.6.	Estudios Hidrológicos de la presa acchilla	86
4.1.7.	Estudios Climatológicos.....	86
4.1.8.	Estudios Geotécnicos Para La Fundación De La Presa	87
4.1.9.	Estudios De Sismicidad.....	88
4.2.	FACTOR DE SEGURIDAD.....	89
4.3.	SISTEMA DE ESTABILIDAD PROPUESTO: ANÁLISIS DE LA PRESA DE RELAVE CON REFUERZO DE GEOMALLA.....	96
4.4.	Análisis de información	96
4.3.	Discusión de resultados.....	106
CONCLUSIONES		108
RECOMENDACIONES.....		109

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Fallas de presas de relave solo por evento sísmico.....	21
Tabla 2. Fallas de presas de relave en el Perú.....	22
Tabla 3. Muestra La Comparación De Las Características De Los Tipos De Presas De Relaves (Vick, 1983).....	55
Tabla 4. Muestra La Comparación De Las Características De Los Tipos De Presas De Relaves (Vick, 1983).....	56
Tabla 5. Operacionalización de variables dependientes e independientes	71
Tabla 6. Ubicación y Área de los Sub Sectores de Estudio	75
Tabla 7. parámetros operativos del depósito de relave.....	81
Tabla 8. Precipitación máxima esperada para diferentes periodos de retorno	86
Tabla 9. Factor de Seguridad de los análisis estáticos.....	90
Tabla 10. Factor de Seguridad de los análisis pseudo estáticos	90
Tabla 11. Factor de Seguridad de los análisis pseudo dinamico.	91
Tabla 12. Factor de Seguridad de los análisis dinamico.....	91
Tabla 13. Datos de los eventos sísmicos para los análisis dinámicos	92
Tabla 14. Factor de Seguridad de los análisis con refuerzo de geomalla	96

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Causas de falla en presas de relave (Rico et al., 2007)	19
Gráfico 2. Cantidad de fallas en presas de relave para cada país (Rico et al., 2007)	19
Gráfico 3. Clasificación de fallas de presas de relave según continente (Azam & Li, 2010)	20
Gráfico 4. Impacto socio-económico de fallas de presas de relave (Azam & Li, 2010)	20
Gráfico 5. Muestra la curva volumen del depósito versus elevación superficial del depósito (Vick, 1983).....	49
Gráfico 6. Muestra la curva volumen del depósito versus tiempo en años (Vick, 1983)	50
Gráfico 7. Muestra la curva volumen del depósito versus elevación de corona (Vick, 1983)	50
Gráfico 8. Muestra la curva volumen de relleno versus tiempo en años (Vick, 1983).....	51

RESUMEN

La presente tesis da a conocer el estudio de Inestabilidad de Taludes de la presa de relave minera accchilla N°:09, cuyo objetivo es identificar la susceptibilidad y factor de seguridad de los taludes en estudio, para lo cual se emplearon los diferentes métodos y técnicas del análisis, donde el análisis pseudo estatico y pseudo dinamico como muestra resultado la susceptibilidad a deslizamientos, cuyo método específico a emplear para este análisis es el método Mora Vahrson, dando como resultado una susceptibilidad **MEDIA** en condiciones normales, es decir análisis de los factores internos (topografía, geología y humedad del suelo) y una susceptibilidad **MEDIANA** en la intervención con factores externos (lluvia y sismo). De la misma forma por la naturaleza del estudio siendo necesario la contratación de los resultados obtenidos por los métodos determinísticos para el cálculo del factor de seguridad de los taludes en los sub sectores de estudio, basándose específicamente en el análisis estático y análisis dinámico por lo que este primero emplea los métodos de estático y dinámico y el método de elementos finitos(pseudo estático y pseudo dinámico),. Dentro del análisis dinámico se aplicó el método elementos finitos los cuales guardan relación con los resultados obtenidos en el análisis estático ya que el factor de seguridad dinámico de la presa de relave. Teniendo en cuenta estos resultados mediante los análisis son proponen los resultados obtenidos en campo: Condición Estático es 1.66, Condición Pseudo Estático es 1.49, Condición pseudo Dinámico 1.32, Condición Dinámicos es 1.16. estos resultados son muy deficientes a la norma lo cual se querisre relizar mejoras dentro de esta presa de relave y las medidas de mitigación de riesgo como la construcción con geomenbrana, los cueles los resultados son las siguientes: Condición Estático es 1.85, Condición Pseudo Estático es 1.75, Condición pseudo Dinámico 1.57, Condición Dinámicos es 1.39. por la naturaleza y condiciones que presentan las áreas de estudio.

PALABRA CLAVE

- ESTABILIDAD DE TALUDES
- FACTOR DE SEGURIDAD

Los Autores

ABSTRACT

This test reveals the study of Slope Instability of the accchilla mining tailings dam N °: 09, whose objective is to identify the susceptibility and safety factor of the studies under study, for which the different methods and techniques were used of the analysis, where the pseudo static and dynamic pseudo analysis as a result shows the susceptibility to landslides, whose specific method for this analysis is the Mora Vahrson method, resulting in a MEDIUM susceptibility under normal conditions, that is, analysis of internal factors (topography , soil geology and humidity) and a MEDIUM susceptibility in the intervention with external factors (rain and earthquake). In the same way, due to the nature of the study, it is necessary to contract the results controlled by the deterministic methods for the calculation of the safety factor of the studies in the sub-sectors of study, specifically specific in the static analysis and dynamic analysis. This first uses the static and dynamic methods and the finite element method (static pseudo and dynamic pseudo). Within the dynamic analysis, the finite element method was applied, which is related to the results detected in the static analysis and the dynamic safety factor of the tailings dam. Taking into account these results through the analysis, the results detected in the field are proposed: Static Condition is 1.66, Pseudo Static Condition is 1.49, Pseudo Dynamic Condition 1.32, Dynamic Condition is 1.16. These results are very deficient to the norm which is intended to make improvements within this tailings dam and risk mitigation measures such as geomenbrane construction, which results are as follows: Static Condition is 1.85, Static Pseudo Condition is 1.75, Dynamic Pseudo Condition 1.57, Dynamic Condition is 1.39. Due to the nature and conditions of the study areas.

WORD KEY

- STABILITY OF TALUDES
- SECURITY FACTOR

The authors

INTRODUCCIÓN

La inestabilidad de taludes es uno de los procesos geológicos con más ocurrencia en la serranía de nuestro país de los cuales en un 98% de ocurrencias no fueron identificadas con anticipación terminando así en deslizamientos de masas causando cuantiosas pérdidas económicas y en muchos de los casos pérdidas humanas, así como el silencio sísmico, este fenómeno también fueron registradas en nuestra región de Huancavelica la ocurrencia de estos eventos tienen como causales la intervención de factores internos tales como la topografía, geología, humedad del suelo, etc, así como de factores externos como clima y eventos sísmicos, que en su interacción generan desastres naturales repercutiendo negativamente en el ámbito social, natural y económico. En consecuencia, recae la necesidad de identificar y determinar el estado y el análisis mediante métodos pseudo estatito y pseudo dinámico de la presa de relave, en la cual se verá el factor de seguridad actual que posee dicha presa de relabe y las condiciones con al cual debería estar

Por consiguiente, el estudio de investigación se ejecutó bajo los procedimientos del método de investigación científica que se inicia en la identificación y diagnóstico geográfico, en el que se diferencian las variables de estudio (variable dependiente e independiente) que son sometidos a métodos de análisis. Por lo que en la fase preliminar del estudio se empleó fuentes bibliográficas: informes emitidos por Defensa Civil. La siguiente fase se caracterizó por ser un estudio técnico, bajo los procedimientos y métodos propios para la toma de muestras y su posterior análisis en laboratorios especializados como: Laboratorio en Control de Calidad de Mecánica de Suelos, Concreto y Asfalto (LCCMSC y Asfalto E.I.R.L) para la caracterización física. Con la finalidad de garantizar y dar credibilidad a los resultados para su análisis e

interpretación de resultados En efecto el estudio semi-detallado tiene como propósito ser línea base para estudios posteriores y especializados en el presente tema. A lo descrito el proceso de investigación presenta cuatro capítulos que a continuación se menciona:

El capítulo I: Se esboza el área problemática comprendido por los sub temas: contextualización del problema, formulación del problema, justificación e importancia de la investigación, limitaciones y objetivos de la investigación.

El capítulo II: Comprende el marco teórico, donde se considera los antecedentes de la investigación, las principales teorías que explican las bases del análisis pseudo estático y pseudo dinámico de la inestabilidad de taludes.

El capítulo III: Se desarrolla la metodología de la investigación, donde se consideró el tipo, nivel y diseño de investigación, así como la determinación de la población, la muestra y los instrumentos de recolección de datos.

El capítulo IV: Se realiza el proceso y contraste al sistema de hipótesis a partir de evidencias obtenidas, de la misma forma se realiza el análisis e interpretación de resultados.

Finalmente se incluyen las referencias bibliográficas y los anexos pertinentes. Para culminar, expresamos nuestro profundo agradecimiento a los señores jurados y al asesor Ing. Carlos, GASPAR PACO por las observaciones y orientaciones de índole teórico – práctico (nivel técnico).

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción del problema

El desarrollo del sector minero ha obligado la construcción de grandes depósitos para embalsar materiales provenientes de la extracción de los minerales, denominados relaves (cuyo vocablo en inglés es tailing), el método convencional de almacenamiento, estos materiales son embalsados y confinados mediante una presa construida con la fracción gruesa del material, la cual clasifica como arena fina. La construcción de estas presas de relaves es común en el sector por su bajo costo si se compara con otras construidas con otro tipo de material.

Un problema de trascendencia dentro del campo de la ingeniería civil ha sido el relativo a los proyectos de depósitos de relaves (análisis sísmico), los cuales son construidos buscando acumular el mayor volumen de material de desecho en la menor área posible, por lo que se construyen tan altos como su estabilidad y las regulaciones ambientales lo permitan. Debido a sus magnitudes y características estos depósitos almacenan gran cantidad de energía potencial, que, de ser liberados, podrían traer consecuencias catastróficas en sus alrededores.

Para construir estos depósitos comúnmente se utiliza tres tipos de métodos constructivos: aguas arriba, aguas abajo y eje central, datos históricos muestran que muchos depósitos de relaves han experimentado el fenómeno denominado licuefacción, debido fundamentalmente a sollicitaciones sísmicas (Peña, 2008).

Durante la ocurrencia de un sismo, todo punto de una presa de relaves se ve afectada en mayor o menor medida por las aceleraciones inducidas por el terremoto, Los desplazamientos de algunas partes de la presa, inducidos por un evento sísmico, pueden ubicarse dentro de alguna de las siguientes clasificaciones dependiendo de su magnitud y efectos colaterales(Barrios, 2012):

Pequeños, y por lo tanto despreciable en cuanto a que la presa no sufrirá otras consecuencias más que algunas fisuras.

Medianos, es decir, aparecen grietas de algunos centímetros de espesor que requerían ser rellenadas para no inducir superficies preferenciales de falla para futuros eventos sísmicos.

Mayores, los que pueden alcanzar desplazamientos de bloques de material del orden de metros, cuya consecuencia dependerá del lugar en que ocurra.

Graves, no aceptables para el diseño, generan una brecha en el muro de contención la que permitiría el vaciamiento de los relaves embalsados o el colapso general de la presa.

Una presa de relaves plantea una serie de desafíos y de potenciales problemas desde el punto de vista geotécnico, dentro de los cuales se destacan los siguientes tres:

Resistencia y estabilidad. Las condiciones básicas para asegurar la estabilidad de una presa de relaves tienen relación con la elección de los sitios para dichos depósitos. Dentro de los criterios más relevantes, se deben considerar las propiedades geotécnicas del suelo de fundación, así como su pendiente, la no existencia de fallas y evitar que se construyan sobre suelos compresibles o en proceso de consolidación.

Filtraciones. Las posibles filtraciones se pueden evitar eligiendo un sustrato de baja permeabilidad como terrenos de fundación del tranque de relaves (dentro de las posibilidades reales existentes en la zona). De esta forma se evita el efecto negativo del agua infiltrada sobre las fuentes subterráneas. Posteriormente, al producirse la sedimentación de las lamas en la zona de la

cubeta, el porcentaje de huecos entre partículas de suelo disminuye considerablemente, aumentando la impermeabilidad del terreno.

Estabilidad de taludes. La necesidad de contar con estructuras que no representen un riesgo potencial de fallas por posibles deslizamientos o desplazamientos, ha llevado a los investigadores del tema a desarrollar diversos métodos de análisis de estabilidad.

Según Kossoff(Kossoff et al., 2014) las causas de las fallas de las presas de relave pueden ser diversas, así mismo las causas de las fallas en las presas de relave activas son más diversos que los de los embalses inactivos, pero algunas conclusiones generales pueden extraerse, las fallas son categorizadas en once grandes grupos: falla de fundación, inestabilidad de laderas, desbordamiento, hundimiento de minas, exceso de lluvia inusual, derretimiento de la nieve, tuberías o filtraciones, licuefacción sísmica, falla estructural, falta de mantenimiento. Para Mayoral(Mayoral & Romo, 2008) entre los diferentes aspectos a considerar en el diseño de la presa de relaves, el análisis sísmico de estabilidad de la presa es el más relevante para proyectos ubicados en áreas propensas a terremotos y así asegurar que no se producirán fallos catastróficos. En la práctica, estas evaluaciones muy a menudo se convierten en un reto, debido a la presencia de suelos granulares uniformes no plásticos muy finos, tanto en el cuerpo y la fundación de la presa de relaves. Con el fin de reducir el riesgo ambiental asociado con la liberación de contaminantes, los análisis de estabilidad sísmica para la presa de relave son necesarios, para evitar la inestabilidad de pendiente, o una falla catastrófica más grande. El daño observado es más importante cuando se produce la licuefacción en el cuerpo de la presa y la fundación, que a menudo conduce a agrietamientos, asentamientos, la inclinación y la distorsión general de la geometría de la presa. Los análisis basados en el equilibrio límite son generalmente suficientes para establecer las zonas de riesgo. Sin embargo, los modelos numéricos con los esquemas de solución formulados en el dominio del tiempo, que son capaces de tener en cuenta la cinemática del movimiento del suelo más realista, son necesarios para cuantificar el riesgo geotécnico.

Rudolph & Coldewey(Rudolph & Coldewey, 1971) plantean un esquema adecuado para evaluar los escenarios de falla de una presa de relave ante un evento sísmico:

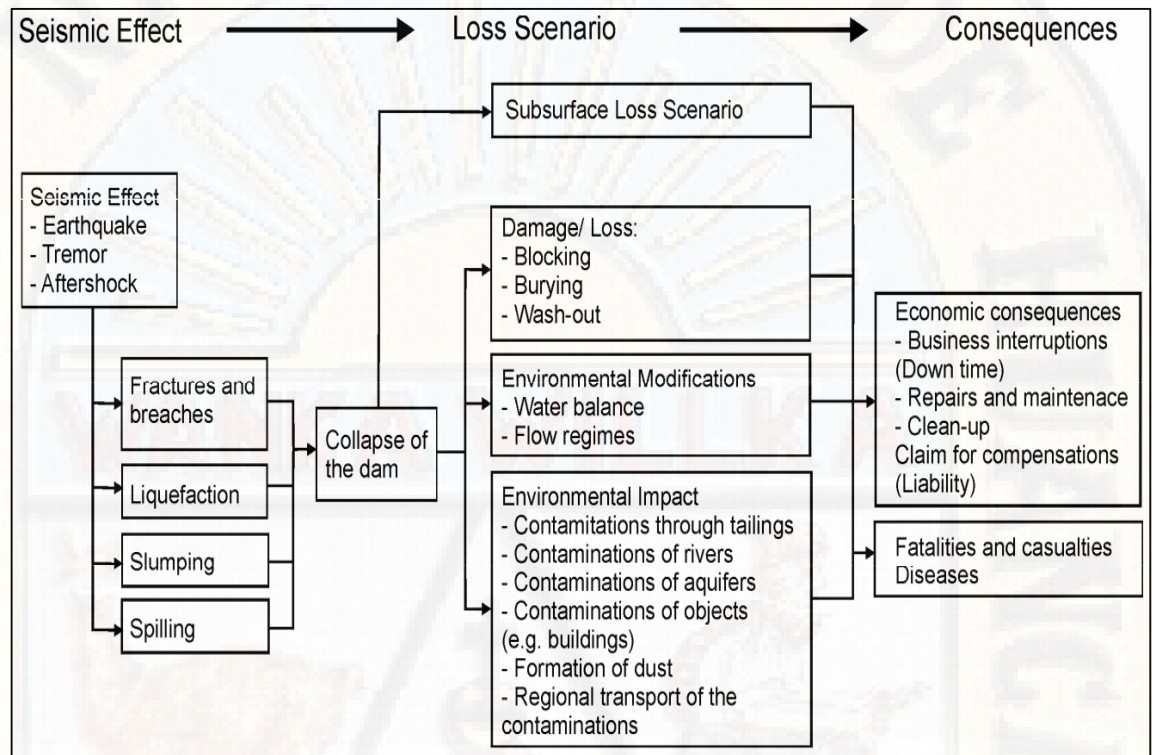


Figura 1. Árbol de escenarios para la falla de presa de relave (Rudolph & Coldewey, 1971)

Las diversas fallas de estructuras de presas de relave en las últimas décadas a causa de eventos sísmicos han traído consigo diversos desastres, en el estudio de Rico et al(Rico, Benito, Salgueiro, Diez-Herrero, & Pereira, 2007) sobre las fallas de presas de relave en Europa, en una comparación con el resto de casos en el mundo concluye que el 14% de fallas es causa de licuefacción sísmica, mientras que el incidente de fallas de presas de relave en el Perú en comparación con el resto de países del mundo es del 3.4%.

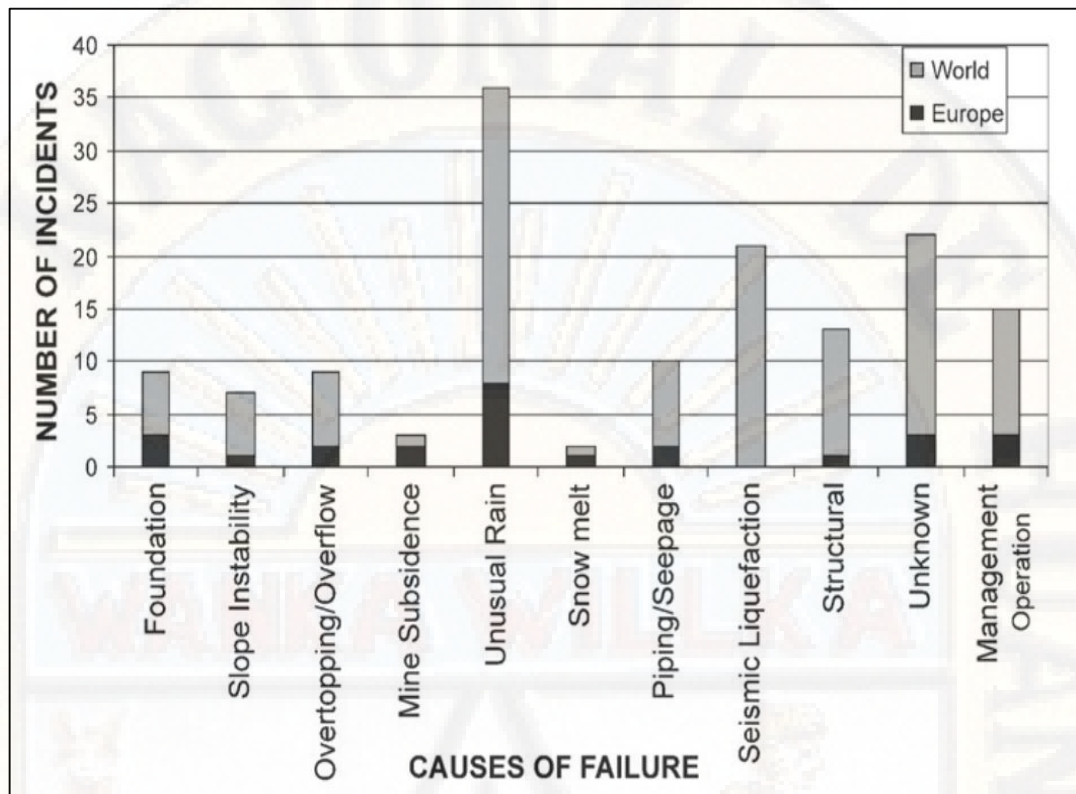


Gráfico 1. Causas de falla en presas de relave (Rico et al., 2007)

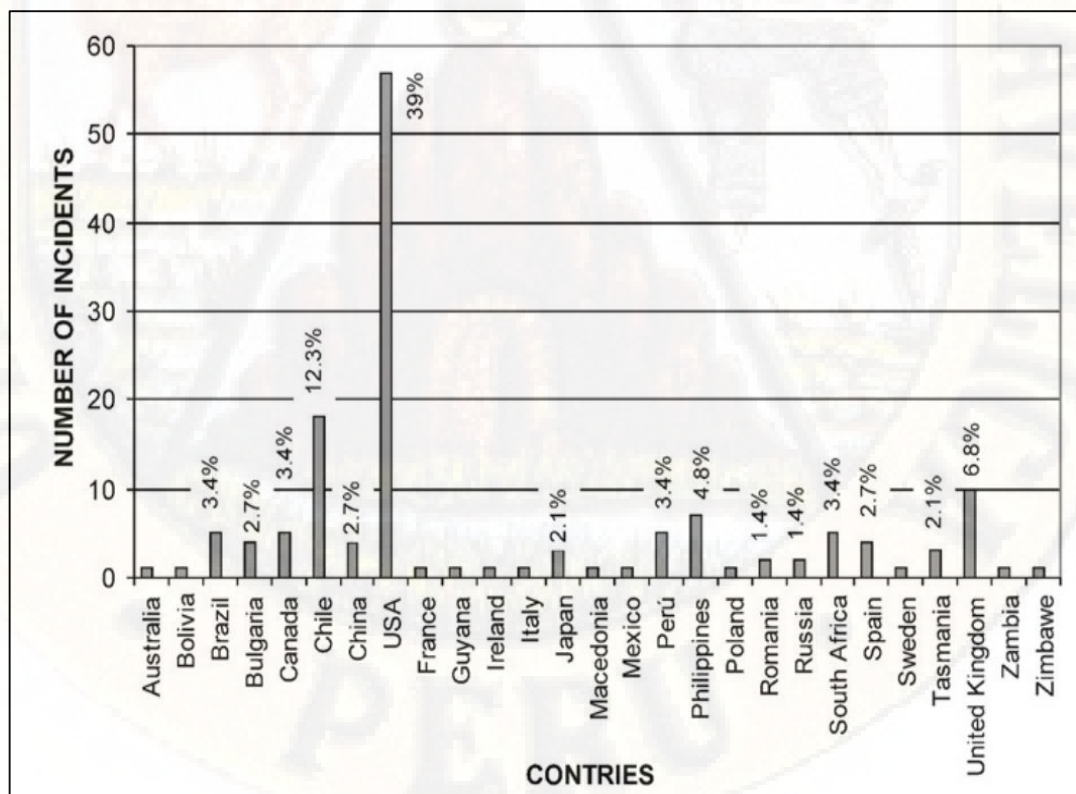


Gráfico 2. Cantidad de fallas en presas de relave para cada país(Rico et al., 2007)

Mientras que Azam & Li(Azam & Li, 2010) en su estudio sobre fallas de presas de relave durante los últimos 100 años realizan una clasificación mucho más detallada según las figuras:

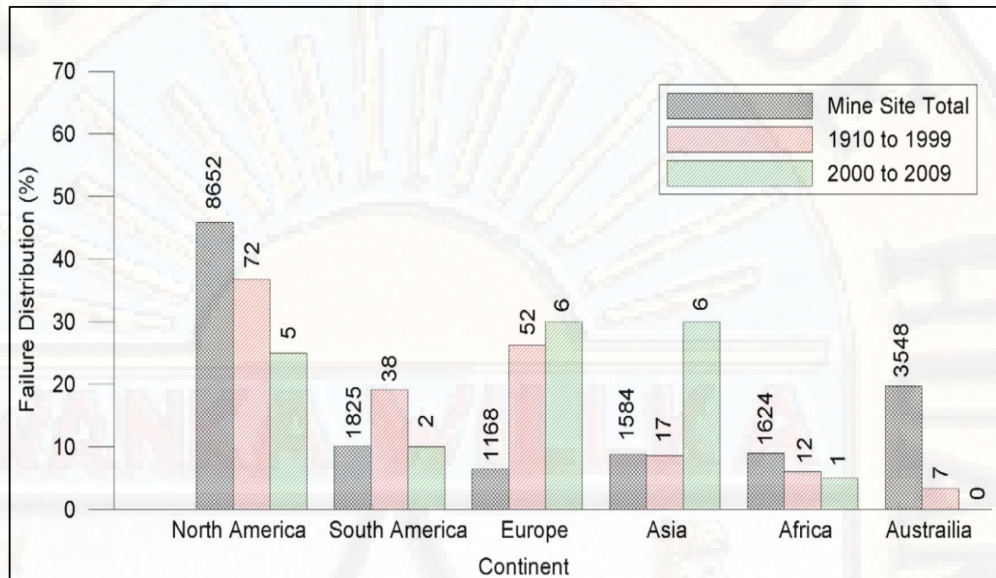


Gráfico 3. Clasificación de fallas de presas de relave según continente(Azam & Li, 2010)

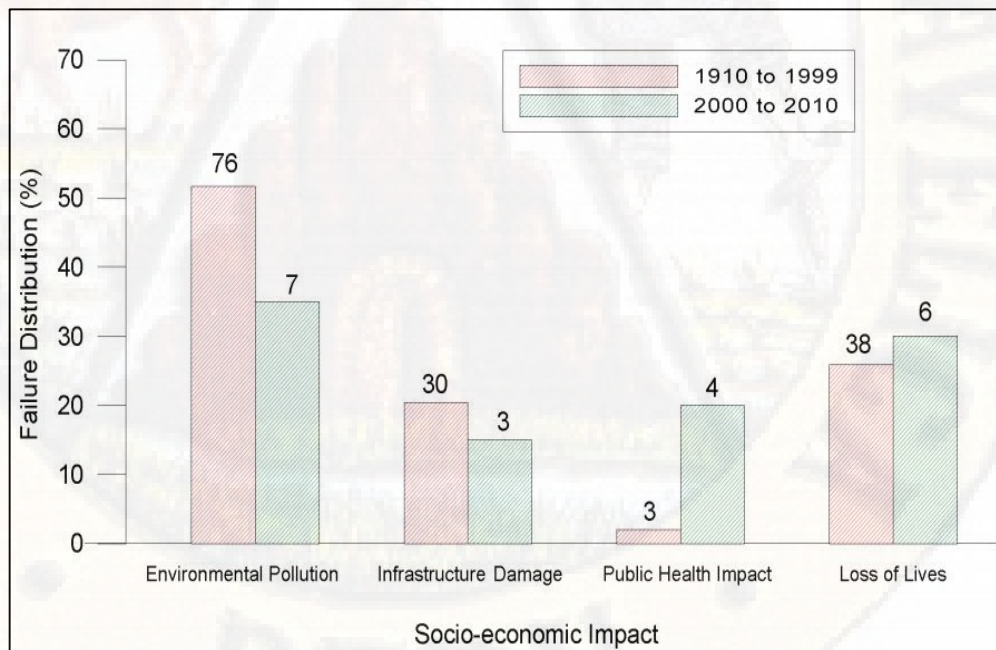


Gráfico 4. Impacto socio-económico de fallas de presas de relave(Azam & Li, 2010)

La clasificación de fallas solo debido a causas sísmicas puede ser observada en el estudio de Rudolph & Coldewey(1971) en la que cita las fallas más relevantes a nivel mundial.

Tabla 1. Fallas de presas de relave solo por evento sísmico

Date	Location	Magnitude	Description	Reference
10. Jan. 1928	Chile	8.3 (?)	- Flood wave of 2,800,000 m³ tailing material - 500 m wide gap in the 61 m high dam - 54 fatalities - Cause: Liquefaction	ICOLD 2001
28. Mar. 1965	El Cobre, Chile	$m_L = 7.1$	- Collapse of two dams of El Cobre copper mine - Two flood waves of 350,000 m³ (new dam) and of 1,900,000 m³ (old dam) - Downstream flow of 12 km - The town of El Cobre was destroyed - More than 200 fatalities	IDRISS 2003 NEIC 2008
19. Mar. 1971	Chungar, Peru	$m_L = 4.8$	- Landslide causes the break of a tailing dam - Tailing mud destroyed the surface facilities of the mine and flew into the shafts - Only 25 miners survived	SZ 22. Mar. 1971 NEIC 2007
17. Jan. 1994	North-ridge, USA	$m_L = 6.7$	- Collapse of the 24 m high dam of the Tapo Canyon Tailing - 60 m wide breach - Downstream flow of extended hundred meters in a canyon - Considerable losses for the owner and a downstream water treatment facility	Harder & Stewart 1996 NEIC 2008
Apr. 1995	Philippines	$m_b = 6.2$	- Collapse of a dam of the Surigao del Norte gold mine - Several earthquakes damaged the internal dam structure - Crest of the dam was a road - Soaking of internal structure of the dam with infiltrating liquids (water) - Collapse of the dam with a time lag	BRGM 2000 NEIC 2008

Fuente. (Rudolph & Coldewey, 1971)

Según Gil(s. f.) uno de los problemas más importantes que deben tomarse en cuenta en el Perú es la influencia que tienen los terremotos en determinadas regiones donde es posible se produzcan fallas por efecto de la onda sísmica o el desarrollo del fenómeno de licuefacción, que han originado en el pasado graves daños.

Tabla 2. Fallas de presas de relave en el Perú.

NOMBRE DE LA PRESA	ALTURA DEL DEPOSITO	AÑO DE OCURRENCIA	CAUSA PROBABLE	ESTADO ACTUAL DEL DEPOSITO	DAÑOS HUMANOS, MATERIALES Y AMBIENTALES
CASAPALCA	60 m	1952	SISMO	ABANDONADO	NUMEROSOS MUERTOS Y CONTAMINACIÓN DEL RIO RIMAC
MILLPO	60 m	1956	SISMO	EN EJECUCION	MUCHOS MUERTOS, INTERRUPCION DE LA CARRETERA CERRO DE PASCO – HUANUCO
ALMIVIRCA (1*) QUIRUVILCA	40 m	1962	SISMO DE MAGNITUD 6.7 LLUVIAS ABUNDANTES	ABANDONADO	DAÑOS A LA AGRICULTURA Y OBRAS DE INFRAESTRUCTURA DE LA ZONA
YAULI - YACU	80 m	1968	SISMO	ABANDONADO	INTERRUPCION DE LA CARRETERA CENTRAL Y CONTAMINACIÓN DEL RIO RIMAC
RECUPERADA BUENAVENTURA	--	1969	SE DESCONOCE	SE DESCONOCE	DAÑOS EN LA AGRICULTURA DE HUACHOCOLPA, CONTAMINACION
ALMIVIRCA (2*) QUIRUVILCA	40 m	1970	SISMO DE 1970	ABANDONADO	CONTAMINACIÓN DEL RIO SAN FELIPE
ATACUCHA	--	1971	FALLA EN DRENAJE	ABANDONADO	CONTAMINACIÓN DEL RIO HUALLAGA Y DAÑOS A INFRAESTRUCTURA VIAL (100,000 TON DE RELAVES)
TICAPAMPA ALIANZA	20 m	1971	FALLA DE CONSTRUCCION Y DRENAJE	ABANDONADO	TRES MUERTOS, DESTRUCCIÓN DE VIVIENDAS E INTERRUPCION DE LA CARRETERA DE HUARAZ – LIMA (9,000 TON DE RELAVES)
SAN NICOLAS CAJAMARCA	--	1980	FALLA DE CONSTRUCCION	SE DESCONOCE	CONTAMINACIÓN DEL RIO TINGO Y DAÑOS EN LA AGRICULTURA

Fuente. (s. f.)

Como se ha mencionado anteriormente, las formas de falla más usuales de las presas de relave minero son hidrológico, estático y sísmico. desde un punto de vista hidrológico existen algunos modelos disponibles para flujos no newtonianos(2011) tales como el modelo SMPDBK (Simplified Dam Break), DAMBRK (A Dam-Break Flood Forecasting Model), FLDWAV desarrollado por la National Weather Service, BOSS DAMBRK, DAN-W, FLO-2D, DAN-3D.

Como se ha mencionado anteriormente, las formas de falla más usuales de las presas de relave minero son hidrológico, estático y sísmico. El análisis bajo condiciones de carga estática(2008) se debe a la estabilidad de taludes en materiales de tierra no consolidadas pues este es un componente importante en el diseño pues las presas de relaves a menudo se construyen en etapas, para frenar el creciente volumen de residuos y para disipar el presiones intersticiales en exceso durante la construcción; por lo tanto es necesario analizar el comportamiento y la estabilidad los terraplenes durante las diversas etapas del proceso de construcción. Actualmente, el análisis de equilibrio límite y el análisis de deformación por esfuerzo son las dos categorías principales de métodos para el análisis estático de estabilidad de pendiente. El análisis de equilibrio límite es el método más comúnmente utilizados para el análisis de la estabilidad de pendiente, principalmente debido a su relativa sencillez este es usualmente expresado en términos de un factor de seguridad, mientras que el análisis de deformación por esfuerzo permite considerar el comportamiento tensión-deformación del material y es más comúnmente realizado mediante el método de elementos finitos. El análisis bajo condiciones de carga dinámica (evento sísmico) se realiza generalmente bajo tres métodos que difieren principalmente en la exactitud con la que se toman el movimiento del terremoto y la respuesta dinámica de la estructura, estas tres categorías consisten en métodos de deformación por esfuerzos, métodos basados en el concepto de equilibrio límite, y los enfoques basados en el desplazamiento.

Mientras que Chakraborty y Choudhury(2011) mencionan que en la actualidad algunos software con la capacidad de análisis de presas de relave bajo condiciones sísmicas son FLAC (Fast Lagrangian Analysis Continua), PLAXIS (Geotechnical Finite Element Software), TELDYN (Slope Stability Software), TALREN (Stability Of Geotechnical Structures), QUAD4M (Embankment Seismic Design Software).

1.2. Formulación del problema

Dada la exposición sobre la necesidad del análisis pseudo estático y pseudo dinámico de una presa e relave ante un evento sísmico, nos planteamos la incógnita:

Problema general:

¿Cuál es la estabilidad de la presa N° 9 Acchilla - Ccochaccasa - Angaraes - Huancavelica mediante el análisis sísmico Pseudo Estático y Pseudo Dinámico?

Problemas específicos:

1. ¿Cuál es la estabilidad de la presa N° 9 Acchilla - Ccochaccasa - Angaraes - Huancavelica mediante el análisis sísmico Pseudo Estático?
2. ¿Cuál es la estabilidad de la presa N° 9 Acchilla - Ccochaccasa - Angaraes - Huancavelica mediante el análisis sísmico Pseudo Dinámico?
3. ¿Cómo influye las acciones sísmicas en la estabilidad de la presa N° 9 Acchilla - Ccochaccasa - Angaraes - Huancavelica?

1.3. Objetivos

La presente investigación intenta modelar y pronosticar la estabilidad de la presa de relave minero haciendo un análisis pseudo estático y pseudo dinámico, por lo que se plantea los siguientes objetivos:

1.3.1. Objetivo general

Determinar la estabilidad de la presa N° 9 Acchilla - Ccochaccasa - Angaraes - Huancavelica mediante el análisis sísmico Pseudo Estático y Pseudo Dinámico.

1.3.2. Objetivos específicos

1. Determinar la estabilidad de la presa N° 9 Acchilla - Ccochaccasa - Angaraes - Huancavelica mediante el análisis sísmico Pseudo Estático.
2. Determinar la estabilidad de la presa N° 9 Acchilla - Ccochaccasa - Angaraes - Huancavelica mediante el análisis sísmico Pseudo Dinámico.

3. Determinar la influencia de las acciones sísmicas en la estabilidad de la presa N° 9 Acchilla - Ccochaccasa - Angaraes - Huancavelica.

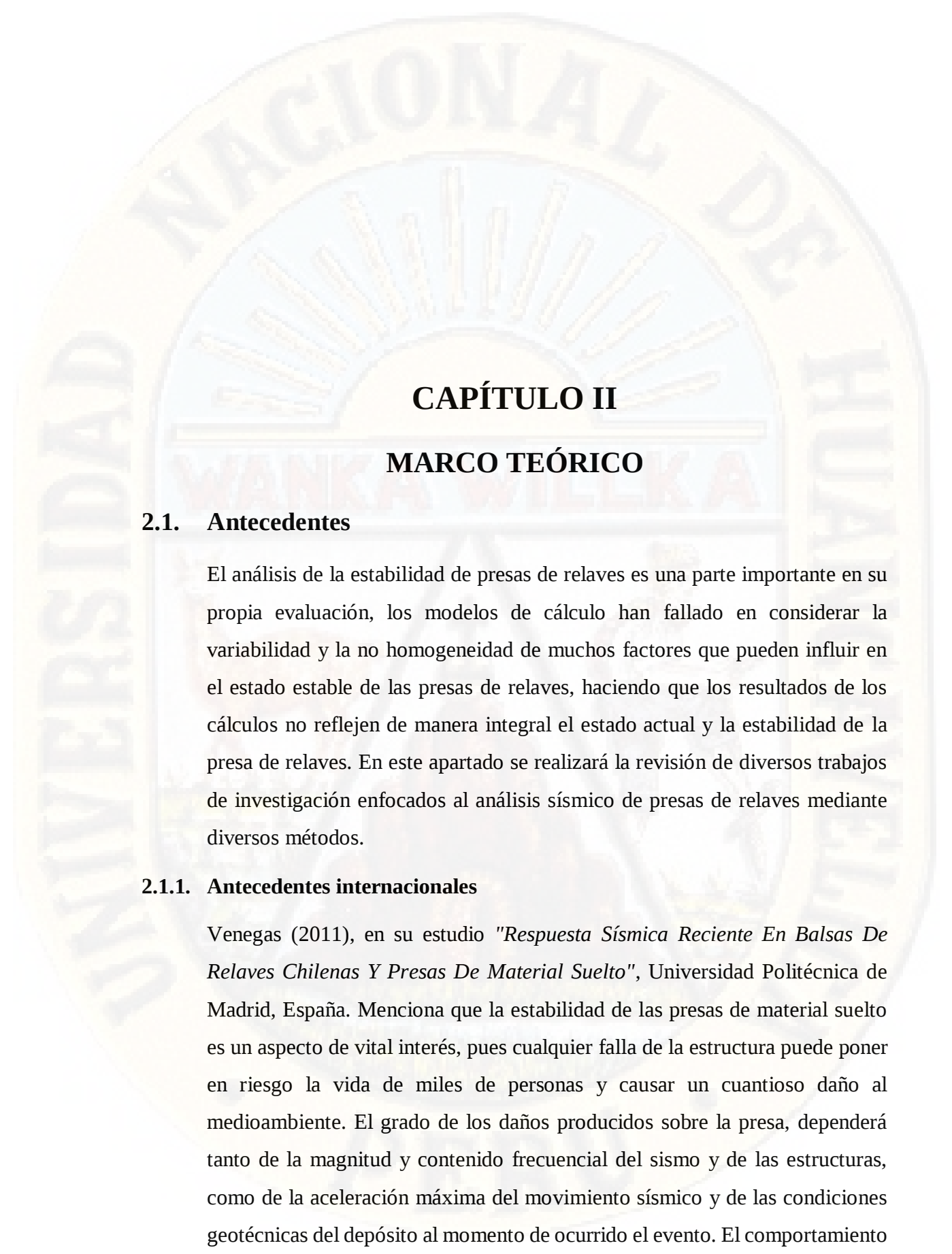
1.4. Justificación

En relación a estos hechos y/o fenómenos naturales que se precisa en la referencia se tienen antecedentes de estudio técnico que define a este sector como zona de riesgo por las características geológicas y topográficas que intervienen en la estabilidad de taludes presentes. Motivo por el cual teniendo como punto de partida las conclusiones de la referencia se realizó el estudio de investigación bajo los criterios de: tipo de suelo, topografía, geología y geomorfología para identificar el factor de seguridad para lo cual se utilizarán los Métodos de Equilibrio Límite que es lo más apropiado para estos contextos con el propósito de determinar los sistemas de estabilización para la corrección de fallas que propician la inestabilidad en los taludes.

1.5. Limitaciones

En efecto la determinación y aplicación de estos sistemas y/o mecanismos que intervienen para la estabilización de taludes reducen los niveles de amenaza y riesgo por lo que generalmente, los beneficios más significativos desde el punto de vista de reducción de amenazas y riesgos, se obtienen con las medidas de prevención.

Sin embargo, no es posible la eliminación total de los problemas mediante métodos preventivos en todos los casos se requiere establecer medidas de control o de remediación de los taludes susceptibles a deslizamiento o en los deslizamientos activos por lo que ello viene a ser un trabajo relativamente complejo que requiere de metodologías especializadas de diseño y construcción.



CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

El análisis de la estabilidad de presas de relaves es una parte importante en su propia evaluación, los modelos de cálculo han fallado en considerar la variabilidad y la no homogeneidad de muchos factores que pueden influir en el estado estable de las presas de relaves, haciendo que los resultados de los cálculos no reflejen de manera integral el estado actual y la estabilidad de la presa de relaves. En este apartado se realizará la revisión de diversos trabajos de investigación enfocados al análisis sísmico de presas de relaves mediante diversos métodos.

2.1.1. Antecedentes internacionales

Venegas (2011), en su estudio *"Respuesta Sísmica Reciente En Balsas De Relaves Chilenas Y Presas De Material Suelto"*, Universidad Politécnica de Madrid, España. Menciona que la estabilidad de las presas de material suelto es un aspecto de vital interés, pues cualquier falla de la estructura puede poner en riesgo la vida de miles de personas y causar un cuantioso daño al medioambiente. El grado de los daños producidos sobre la presa, dependerá tanto de la magnitud y contenido frecuencial del sismo y de las estructuras, como de la aceleración máxima del movimiento sísmico y de las condiciones geotécnicas del depósito al momento de ocurrido el evento. El comportamiento

de presas de material suelto frente a la acción de un movimiento sísmico, se evalúa intrínsecamente, de acuerdo a:

- Deformaciones permanentes y estabilidad de taludes durante y después de la ocurrencia de un sismo.
- Presiones intersticiales excesivas en materiales constituyentes y en su cimentación (potencial de licuefacción en materiales no cohesivos).
- Vulnerabilidad a la erosión interna de la presa debido a la aparición de fisuras.
- Fisuración transversal en rotura de presas que no disponen de filtros, drenes, zonas de transición, etc.

Para un talud estable bajo condiciones estáticas, se considera que su resistencia al deslizamiento es superior a las fuerzas movilizadoras que existen debido a su propia geometría. Sin embargo, una carga sísmica induce una fuerza movilizadora mayor, la cual puede provocar que la misma configuración sea ahora, inestable. De ocurrir, esta falla se presenta en general de manera repentina y, debido a la naturaleza inesperada de los sismos, las pérdidas pueden ser potencialmente importantes. El cálculo de estabilidad sísmica de taludes de una presa, se realiza generalmente mediante un análisis pseudo estático, el cual introduce un coeficiente horizontal al modelo de cálculo. Este método es sin embargo, sólo válido para presas pequeñas ubicadas en áreas de baja o moderada actividad sísmica. Las presas de mayor altura afectas a sismos de mayor intensidad se comportan más bien como cuerpos deformables, en los cuales su respuesta a la excitación sísmica dependerá de sus materiales constitutivos, de su geometría, de la naturaleza del movimiento, etc. Cuando la estructura es más vulnerable y el sismo es mayor, es recomendable combinar este método con estimaciones más representativas que tengan en cuenta el comportamiento dinámico del suelo.

Los cuerpos de tierra o terraplenes hechos de materiales granulares gruesos son en general, más estables ya que presentan mayor resistencia a la fricción y por ser más permeables permiten la rápida disipación de las presiones intersticiales,

las cuales afectan directamente la resistencia al corte de las partículas de suelo. Por esta razón, presas homogéneas conformadas por materiales más impermeables, presentan taludes más tendidos que las presas mixtas o las de enrocado. Cuando un suelo en estado suelto es sometido a una serie de ciclos de carga-descarga, como los generados bajo acción de un sismo, el suelo se tiende a compactar. El proceso de carga sísmica tiene lugar, en general, en condiciones sin drenaje. Esto quiere decir que la tendencia del suelo a compactar se traduce en un aumento de la presión intersticial, la cual tarda en disiparse un tiempo considerablemente mayor que la duración del sismo. Las condiciones de falla del suelo bajo carga monótona y sísmica son, esencialmente, las mismas. Si se llega a la rotura con una serie de ciclos de amplitud más baja que la correspondiente a una carga estática, es debido a la generación de presión intersticial antes mencionada, que ha disminuido la tensión efectiva de confinamiento. Las formas en que un sismo puede afectar a una presa de tierra incluyen la rotura o pérdida de resguardo debido a movimientos tectónicos diferenciales, el sobrepaso por olas o deslizamientos en el vaso, el deslizamiento de taludes o de toda la presa sobre su fundación, la tubificación a través de grietas, la pérdida de resguardo por deformaciones y la falla del vertedero u obras de descarga. El estudio de presas de material suelto deberá considerar el estudio de su estado tenso - deformacional y el análisis de estabilidad de tipo estático, interno y dinámico, en los casos en que sea necesario.

Conrads concluyo que durante la etapa de diseño se establece en primer lugar, que es necesario considerar resguardos generosos que permitan la ocurrencia de asientos o hundimientos en la zona de coronación, con el fin de evitar fallas por sobrepaso. El diseño de la zona de coronación del muro debe evitar la erosión por rebosamiento. Se debe considerar el ensanche del contacto con los estribos y la estabilización de laderas adyacentes al vaso con el fin de evitar deslizamientos de taludes naturales hacia el interior de la presa. Si existe presencia de falla geológica, debe considerarse un diseño especial de la cimentación o una relocalización del cuerpo de presa. En cuanto al diseño

interno de la presa, es recomendable el uso de drenes tipo chimenea cerca de la zona central. Los filtros deben ser compuestos por arenas y gravas redondeadas o subredondeadas y deben ser dispuestos de tal forma que puedan frenar el avance de eventuales grietas. Las zonas de drenaje, deben ser amplias para permitir flujos de agua procedentes de fisuras internas. Los materiales del núcleo deben ser de naturaleza plástica y presentar poca tendencia al agrietamiento. Se deben diseñar y construir obras de captación y desvío de escorrentías superficiales en zonas aguas arriba del depósito.

Respecto al método de construcción del depósito, se recomienda no utilizar el sistema de “aguas arriba”, ya que es muy vulnerable a la licuación de las partículas finas del vaso, presenta riesgos de falla bajo sismos moderados y las probabilidades de fisuración bajo carga sísmica son muy elevadas. La impermeabilización del fondo de vaso y del muro de arenas, debe hacerse a través de un tratamiento previo del terreno, mediante recubrimientos compactados compuestos con materiales de arcilla u otros con propiedades impermeabilizantes y no se debe considerar el uso de geomembranas para el caso de depósitos contruidos mediante el sistema de relleno hidráulico. Sobre esta impermeabilización artificial, se deberá disponer el sistema de drenaje basal del depósito, el cual debe ser considerado en los análisis de estabilidad frente al deslizamiento, en los casos que se vieran afectados por su presencia.

En áreas sísmicas, se debe considerar un ancho aún más extendido para el núcleo en la zona de cimentación buscando además disminuir el espesor de los espaldones expuestos a la saturación. La zona de coronamiento debe ser capaz de soportar el aumento de sollicitaciones provocadas a causa del sismo. Se deben disponer soluciones de cimentación adecuadas que anulen o minimicen el efecto de fallos, evitando la utilización de materiales blandos o sueltos. Los materiales de la presa deben presentar un comportamiento tenso-deformacional lo más homogéneo posible.

Se deben preferir pantallas impermeables constituidas por materiales dúctiles y en lo posible considerar un diseño curvo en planta de la presa. Es necesario realizar un análisis de estabilidad post-terremoto considerando resistencias del

material licuado. La posibilidad de licuación-movilidad cíclica de materiales de la presa o de su fundación es el factor más importante en la evaluación de la estabilidad sísmica. En zonas susceptibles, se debe tener en cuenta la eliminación de los riesgos de licuefacción. Los análisis previos de estabilidad, deben incluir modelos de simulación de los procesos de licuación, los cuales basan su desarrollo, en la definición de las tendencias de crecimiento y disipación de las presiones de poros. Si bien existen importantes variedades de modelos, las formulaciones sencillas resultan de interés por su probada capacidad de aplicación. En algunos casos la distancia del depósito a esteros, quebradas o incluso asentamientos de población es muy pequeña, situación que, en caso de colapso parcial o total del tranque, puede provocar un grave daño humano y ambiental. Actualmente, se utiliza el concepto de “distancia peligrosa” el cual busca evitar este tipo de situaciones, intentando predecir la distancia del flujo en caso de colapso parcial o total de la estructura y recomendando la construcción de un muro de protección si fuese posible tal eventualidad. Es necesario realizar estudios de riesgo sísmico locales, con el fin de determinar un valor de aceleración máxima adecuado al lugar de emplazamiento del depósito. En países como Chile se aconseja no considerar en ningún caso, un coeficiente sísmico menor a 0,20 al evaluar la acción del sismo máximo probable. Además en este caso, se debe considerar un análisis numérico que incluya las máximas deformaciones verticales y horizontales del depósito y un cálculo de distancia y trayectoria de flujo en caso de colapso. Acerca del sismo de diseño, es imprescindible que el análisis de aceleración máxima, se ajuste a las características sísmicas del área en estudio, al cual se podrán aplicar fórmulas de atenuación. La aplicación de la zonificación propuesta en normas se recomienda sólo a nivel de cálculos preliminares o de anteproyecto.

Para Ferrer (2011), en su tesis *"Estudio Del Comportamiento Sísmico De Relaves Espesados Mediante El Análisis De Columna Unidimensional, Considerando Grietas De Contracción"*, Pontificia Universidad Católica De Chile, Chile. Oriento su estudio a tener una primera aproximación al problema

del comportamiento sísmico de los depósitos de relave espesado, añadiendo a los modelos numéricos la presencia de grietas en el material debido a su proceso de disposición, y evaluando la susceptibilidad del material a licuar. El comportamiento de un depósito de relaves convencional frente a un sismo severo depende fundamentalmente de la resistencia del muro perimetral, ya que el único mecanismo de resistencia del material almacenado en la cubeta es la consolidación por peso propio del material. En el caso de los relaves espesados, dado que los muros perimetrales son bastante más bajos, la resistencia al corte de la masa de relave almacenada es muy relevante. Esta resistencia viene dada, en primer lugar, por una consolidación primaria y pequeños asentamientos iniciales, cuya duración depende de la permeabilidad del material, aumentando la concentración de partículas sólidas aproximadamente entre un 8 y un 20% al dejar salir un poco de agua. Después, ocurre la desecación del relave, incluso en lugares en que las precipitaciones superan las tasas de evaporación, debido a que el agua escurre por la pendiente de depositación. Finalmente, hay un proceso de consolidación secundaria por peso propio. Estos tres mecanismos podrían ocurrir de manera simultánea en el depósito; se deben estimar los tiempos que tarda cada etapa y tener la precaución de respetarlos durante la operación de éste. Dependiendo de la información disponible para calibrar el modelo constitutivo de un suelo, es posible realizar análisis dinámicos de distinta complejidad, representando al material granular a través de modelos lineales-elásticos, lineales-equivalentes, elasto - plásticos, visco-plásticos, etc. Mientras más sofisticados sean los modelos, más información es necesaria en términos de curvas de comportamiento de los materiales, y así poder aprovechar las ventajas de un modelo más robusto para extraer resultados más cercanos a la realidad. En el caso particular del problema sísmico de los relaves espesados, se debe emplear un modelo bi - fásico, en que el efecto acoplado de la fase fluida con la fase sólida bajo cargas cíclicas aumenta la dificultad del problema.

Para obtener una primera aproximación del efecto de las grietas de contracción en el comportamiento del relave espesado, analizo dos programas

computacionales que permiten incorporar una geometría bidimensional: QUAD4M (a Computer Program to Evaluate the Seismic Response of Soil Structures Using Finite Element Procedures and Incorporating a Compliant Base) y QUAKE/W (Dynamic Earthquake Analysis). Estos programas son utilizados en la ingeniería práctica y permiten el cálculo bajo las hipótesis de comportamiento lineal-elástico y/o lineal equivalente. Para modelar el comportamiento sísmico de los relaves espesados en una segunda fase de su investigación, decidió construir un modelo acoplado de elementos finitos utilizando el programa GEFDyn (Géomecanique Eléments Finis DYNamique), el que está disponible en el Laboratorio de Geomecánica Computacional de la Pontificia Universidad Católica De Chile, y cumplía con todos los requisitos necesarios para efectuar una correcta modelación numérica del problema. Finalmente su estudio permitió calibrar los parámetros de un modelo elasto-plástico para representar el comportamiento monótono y cíclico de relaves espesados, a partir de resultados de ensayos triaxiales en muestras “inalteradas” que simulan el proceso constructivo real. Basándose en este resultado, se confeccionaron modelos de una columna representativa de relave espesado, en primer lugar sin considerar el efecto de las grietas de contracción, y luego incluyéndolas en el modelo como una variación de la permeabilidad, comparando la respuesta dinámica de la columna en términos de asentamientos sísmicos, perfiles de aceleración, generación de presiones de poros y espectros de respuesta.

Si bien los valores de los asentamientos dinámicos son bajos, el efecto de incorporar el material almacenado en las grietas de contracción hace variar la cantidad de zonas potencialmente licuables en la profundidad. Se observó que esta variabilidad de los resultados depende en mayor medida de la magnitud del sismo, más que de la distribución espacial de las grietas. Se obtuvo en ciertas realizaciones que, en las zonas con una mayor alineación de las grietas el valor de la razón de presiones de poros resultó ser menor que en las zonas en que las grietas cambian sucesivamente de posición en cada capa. Sin embargo, se revisaron los resultados de una serie de realizaciones, y no es

posible generalizar esta tendencia. Por otro lado, se pudo apreciar que dependiendo del registro sísmico utilizado en la modelación, una misma geometría de bloques y grietas puede ser más o menos favorable en términos de potencial de licuefacción, respecto a los resultados del caso homogéneo (sin grietas). Para los sismos analizados y el tamaño de grietas considerado en este trabajo, el valor del asentamiento del modelo homogéneo coincidió con el valor del asentamiento promedio de las realizaciones, por lo que el efecto de agregar las grietas a este modelo no tendría una mayor influencia en términos promedios para el sismo considerado. Fue posible anticipar la ocurrencia de licuefacción en ciertos sectores de las columnas modeladas utilizando el enfoque tradicional de evaluación de potencial de licuefacción. En efecto, se transformaron las historias de tensiones de corte, en zonas que experimentaron licuefacción y en zonas que no licuaron, a ciclos equivalentes de tensiones y se utilizaron las curvas de comportamiento cíclico obtenidas de los ensayos de laboratorio para verificar los resultados del modelo computacional.

El efecto de la licuefacción se pudo apreciar también en la de-amplificación del movimiento sísmico en la mayoría de los registros utilizados y en el corrimiento del espectro de respuesta hacia periodos más altos. En este estudio se utilizó el asentamiento sísmico como una propiedad índice para caracterizar la licuefacción en la columna unidimensional. Los valores finales de los asentamientos obtenidos para distintos registros sísmicos se correlacionaron de mejor manera con la Intensidad de Arias que con las aceleraciones máximas de éstos. A través del cálculo de perfiles de aceleraciones en profundidad y el cálculo de aceleraciones promedio en el tiempo para un registro particular, se estimó un valor para el coeficiente sísmico horizontal que es utilizado en los análisis pseudo-estáticos de estabilidad, y se obtuvo una buena comparación con el valor calculado mediante fórmulas empíricas. Uno de los mayores inconvenientes al trabajar con modelos más complejos, es el tiempo computacional que requieren los cálculos. Dado que el tipo de sismo utilizado resultó ser el parámetro más influyente en la respuesta de la columna unidimensional, incluso por sobre la variación de la distribución de las grietas

de contracción, se recalca la importancia de utilizar sismos representativos en el diseño de depósitos de relaves.

Barrios (2012), en su estudio *"Análisis Sísmico 2D De Una Presa De Relaves Espesados Considerando La Existencia De Grietas Por Deseccación"*, Pontificia Universidad Católica De Chile, Chile. Realizo el análisis sísmico 2D de una presa de relaves espesados, donde La respuesta dinámica de este depósito heterogéneo, conformado por bloques "sólidos" con material fresco entre ellos, fue analizada en términos de tensiones, desplazamientos y aceleraciones utilizando un modelo dinámico, inelástico, hidro - mecánico completamente acoplado por medio del enfoque de los elementos finitos. Los resultados de este modelo fueron comparados con los resultados de un modelo homogéneo donde las propiedades del material se consideraron iguales a las de los bloques sólidos. El comportamiento del depósito se modeló utilizando una modelo constitutiva elasto plástico multi - mecanismos. Los parámetros fueron calibrados con datos experimentales. Teoría de campo aleatorio se utilizó para generar patrones de grietas de desecación compatibles con observaciones de terreno. El resultado de 15 diferentes patrones aleatorios de agrietamiento, indicó que la respuesta de un modelo homogéneo puede ser considerada una aproximación conservadora de un modelo que considera la existencia de grietas entre los bloques sólidos. Durante la ocurrencia de un sismo, todo punto de una presa de relaves se ve afectada en mayor o menor medida por las aceleraciones inducidas por el terremoto. Si, por ejemplo, en ciertos intervalos de tiempo durante sismo, las tensiones de corte inducidas exceden la resistencia al corte del suelo se producirán desplazamientos "permanentes" de ciertos volúmenes de suelo, los que pueden irse acumulando a lo largo del sismo. Como criterio de diseño, es posible tolerar ciertos niveles de deformación, siempre y cuando no provoquen un vaciamiento catastrófico de los relaves acumulados. Por lo tanto, el diseño sísmico tradicional, basado solo en factores de seguridad, no es siempre el más adecuado ya que podría conducir a diseños sobre conservadores o no factibles en términos económicos. Los primeros métodos de análisis de estabilidad consideraban Métodos de Equilibrio Límite del talud de la presa.

Para la realización de este tipo de análisis se debe definir de antemano una potencial superficie de falla (usualmente de forma circular) la cual se subdivide en una serie de rebanadas (dovelas) en cada una de las cuales se comparan las fuerzas solicitantes con las fuerzas resistentes de los materiales de construcción y fundación. Estos métodos comprendían la herramienta fundamental para el análisis de este tipo de estructuras debido principalmente a la simplicidad que presentan. Para el Análisis sísmico, El método más simple para incluir los efectos de un sismo es considerarlo como una serie de fuerzas estáticas horizontales equivalentes en el análisis. La magnitud de la fuerza horizontal se asume igual al peso de la masa potencial de falla multiplicada por un coeficiente adimensional (K_h) que busca representar los efectos del sismo, transformando el problema en uno de tipo pseudo estático. Aun cuando en la realidad el sismo induce fuerzas tanto horizontales como verticales, varios autores recomiendan despreciar esta última componente en el análisis. El análisis dinámico de presas de relave se ha abordado tradicionalmente utilizando dos enfoques: el método lineal-equivalente por medio de programas como QUAD4 (Seismic Response of Soil Structures) y el método no-lineal directo por medio de programas como FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua). En su estudio Parga logro generar un modelo numérico en deformaciones planas capaz de representar el comportamiento sísmico de una sección representativa de un depósito de relaves espesados, la cual considera el muro de contención, el relave depositado y la roca basal. A su vez, se generó la posibilidad de incluir grietas de desecación al interior del material, lo que corresponde a una modelación más realista del problema. El procedimiento desarrollado para la generación de grietas permite considerar la tendencia de las grietas preexistentes de continuar hacia capa superior. Para el depósito conformado por un material homogéneo se estudió el tamaño de los elementos de la malla requerido para obtener resultados adecuados, concluyendo que no resulta necesario disminuir excesivamente el tamaño de la malla para obtener resultados confiables. Esto permite un ahorro considerable de tiempo y capacidades computacionales para cálculos futuros.

Al comparar el comportamiento de un modelo homogéneo con un modelo que considera las grietas se demostró que los resultados no difieren mayormente. Inclusive, en gran parte de los resultados presentados, el modelo homogéneo presenta resultados conservadores respecto al promedio de las realizaciones agrietadas. Por lo tanto, si se conoce adecuadamente el material a depositar y las características geométricas del depósito, es posible obtener resultados adecuados por medio de un modelo que únicamente considere material homogéneo. Independiente de si se consideran o no las grietas, es necesario utilizar un modelo constitutivo que permita representar adecuadamente tanto los ciclos de carga y descarga, como la generación de sobre presión de poros.

Bernal (2012), en su estudio *"Estabilidad Sísmica En Presa De Relave Construida Por El Método De Eje Central"*, Universidad De Chile, Chile. Estudio el relave integral del Tranque Ovejería, sobre el cual se realizaron ensayos Próctor Estándar y triaxiales CIU, a diferentes densidades para un confinamiento de 5 kg/cm². Se consideraron tres formas de preparación de probetas: apisonamiento húmedo, depositación en seco y "slurry". Finalmente el programa de ensayos permitió obtener la resistencia no drenada normalizada en función del grado de compactación. Los análisis pseudo estáticos desarrollados consideran un coeficiente sísmico horizontal de 0,2 y un coeficiente sísmico vertical de 0,1; de tal manera de obtener un factor de seguridad mayor o igual a 1,2. El estudio fue enfocado a evaluar tanto el diseño de una presa de relave construida por el método de eje central como la factibilidad del mismo, para utilizar datos reales, se ha optado por determinar las propiedades geo-mecánicas del relave integral del tranque Ovejería de la división Andina. Se evalúa la resistencia al corte, el nivel de densificación y la disposición de las lamas que se requiere para dos diseños, los cuales deben cumplir con que el factor de seguridad asociado a la estabilidad pseudo-estática sea mayor a 1,2. Los ensayos de resistencia se realizan utilizando tres técnicas de depositación y se considera una condición de resistencia no-drenada. Para el caso de evaluar la densificación del material, se considera el ensayo Próctor

Estándar y Modificado. Mientras que para determinar el factor de seguridad asociado a cada una de las alternativas constructivas, se ocupa el software Geoslope. Para diseñar un muro de relaves se usó los Métodos de equilibrio límite y Métodos numéricos (método de elementos finitos), el análisis generalmente está enfocado en mantener la estabilidad de la presa más que en minimizar las deformaciones. Se debe tener en consideración que si las tensiones producidas en el suelo son mayores a la resistencia “peak” (pico), entonces la resistencia disminuirá hasta su valor residual, por ende es conveniente utilizar este parámetro como propiedad resistente del suelo. En cuanto al análisis sísmico se recurre al Método pseudo-estático en la que se debe establecer el coeficiente sísmico a utilizar. Borlone concluyo que Los análisis de estabilidad pseudo-estáticos indican que el factor de seguridad es mayor o igual a 1.2, si se compacta la zona de la cubeta al 95% del Próctor Estándar en una extensión mínima de 23m. De acuerdo a los resultados de los análisis de estabilidad pseudo-estáticos, resulta recomendable el crecimiento en etapas de 5 m, pues la extensión de cubeta a compactar es menor (23m).

Peña (2008), en su estudio *"Análisis Sísmico De Una Presa De Arena De Relave"*, Pontificia Universidad Católica De Chile. Chile. Analizo el comportamiento sísmico de una presa de arenas de relave utilizando un modelo constitutivo elastoplástico y el software FLAC2D. Se ha considerado geometrías y propiedades típicas de presas de relave y un método de construcción aguas abajo, por ser el tipo de construcción que más se utiliza en el sector minero, en áreas de alta sismicidad como Perú y Chile. En este estudio se han analizado dos alturas de la presa de arenas de relave, una de 50 m y otra de 100 m. El análisis estático se ha realizado considerando las etapas de construcción de la presa. El análisis dinámico para la presa de 50 m se ha realizado con 16 registros de aceleración, mientras que para la presa de 100 m se ha realizado con 8 registros de aceleración. Para ser conservadores, estos registros se han escalado tal que en campo libre sobre la fundación se obtenga una aceleración máxima igual a 0.8 g. Considerando que el comportamiento sísmico de una estructura de este tipo depende del sismo se ha estimado

necesario identificar y clasificar los sismos en tres grupos: sismos del tipo vibratorio, sismos del tipo intermedio y sismos del tipo impulsivo. También se han considerado los sismos chilenos del 3 de marzo de 1985 que tienen amplio contenido de frecuencias y larga duración. Esto ha permitido cubrir un amplio rango de vibraciones. En el análisis estático y dinámico los módulos de corte y volumétrico de los materiales se han considerado variables con el nivel de confinamiento, asumiendo que la presión de confinamiento es igual a la tensión efectiva horizontal del suelo. Este estudio muestra una metodología de diseño sísmico para las presas de arenas de relave considerando la degradación de la rigidez de los materiales en la ley constitutiva elastoplástica y el empuje que ejerce el material embalsado (lama), licuado ante la sollicitación sísmica. Los objetivos de este estudio siguiendo la metodología desarrollada son: identificar numéricamente las zonas con mayor potencial de licuefacción, evaluar la estabilidad de la presa y determinar qué tipo de sismo afecta en mayor grado a la estabilidad dinámica de estas estructuras. La metodología desarrollada consiste en multiplicar por una constante al módulo de corte tangente inicial de cada material que conforma el depósito de relaves. Esta metodología sólo se aplica en el análisis dinámico de la presa. El valor de la constante es elegido según el nivel de deformación angular inducido por la sollicitación sísmica, que se esperaría en cada material. Este método es iterativo y de rápida convergencia, según la elección de los valores de la constante.

Para evaluar las zonas con mayor potencial de licuefacción al interior de la presa se ha estudiado el fenómeno de licuefacción, diferenciado entre licuefacción verdadera o falla de flujo y movilidad cíclica. La movilidad cíclica, para la presa de 50 y 100 m, se ha evaluado mediante la razón entre las tensiones cíclicas inducidas por el sismo y la resistencia cíclica del suelo. De existir movilidad cíclica se ha considerado que el sismo induce licuefacción y por tanto la resistencia del suelo se ha degradado a la resistencia post-licuefacción o resistencia última no-drenada.

Para determinar la estabilidad dinámica de la presa, se han evaluado los factores de seguridad mínimos al interior de la presa y para determinar el tipo

de sismo que más afecta a estas estructuras, se han monitoreado los factores de seguridad en cuatro puntos considerados de alta deformación. Para la modelación numérica se ha utilizado el programa computacional FLAC2D (Fast Lagrangian Analysis of Continua), desarrollado y distribuido por Itasca. El cual está basado en el método explícito de cálculo por diferencias finitas. En este programa se pueden escribir códigos o rutinas, mediante el uso del lenguaje FISH, los cuales permiten determinar parámetros de interés en cada elemento de suelo durante el análisis dinámico.

En un análisis dinámico en FLAC una sollicitación puede ser aplicada como una historia de aceleración, velocidad, tensión o fuerza. Estas sollicitaciones son comúnmente aplicadas en los bordes del modelo, incluso la aceleración, velocidad y fuerza también se pueden aplicar al interior del modelo. En este estudio, la sollicitación sísmica es aplicada como una historia de aceleración, sólo en la dirección horizontal (onda de corte), en la base de la fundación, en el contacto con la roca. Como uno de los objetivos de esta tesis es determinar las zonas con mayor potencial de licuefacción dentro de la presa, lo cual es un índice de qué partes de la presa podrían llegar a tener deformaciones grandes, entonces se ha escalado los registros tal que en campo libre tengan una aceleración máxima de 0.8g. Estos registros serán ingresados en la base inferior de la fundación en el contacto fundación - roca. Banda concluyo que La metodología aplicada, donde se ha considerado la licuación de las lamas al inicio del sismo, hace que se genere en los resultados numéricos un pulso en las respuestas de la presa, que a veces llega a ser mayor que la respuesta del sismo sobre todo en la parte media del talud aguas arriba de la presa. Sin embargo esta condición es el caso más desfavorable para un análisis dinámico.

No se ha determinado una relación directa entre el tipo de sismo y la respuesta dinámica de la presa. Debido a que el comportamiento sísmico de una presa de arenas de relaves depende de sus características geométricas, el tipo de sismo y de la respuesta que se esté estudiando. La metodología aplicada ha permitido identificar las zonas potencialmente licuables, las cuales han resultado ubicadas en la parte central y aguas abajo de la base de la presa.

La metodología aplicada ha permitido identificar que la estabilidad dinámica de la presa de relaves, ante el nivel de sollicitación sísmica considerada, es más sensible a los sismos del tipo impulsivo, mientras que para los sismos chilenos la estabilidad dinámica es menos sensible, según los resultados de los factores de seguridad locales.

2.1.2. Antecedentes nacionales

Renteros (2014), En su tesis "*Diseño De La Presa N°6 De Almacenamiento De Relaves En La Refinería De Cajamarquilla*", Universidad Ricardo Palma, Perú. Describe el desarrollo del estudio a nivel de detalle del Diseño de la Presa N° 6 para Almacenamiento de Relaves en la Refinería de Cajamarquilla. El diseño desarrollado es a nivel de ingeniería de detalle pues consideró su desarrollo entre las cotas 485 m (cota fondo de embalse) y la cota 522 m (cota corona de dique), considerando taludes interiores y exteriores 2H:1V para un ancho de corona de 7 m y una capacidad estimada en 3.4 millones de metros cúbicos para una vida útil de quince años. Se desarrolló información geotécnica en la zona de Quebrada La Parra como parte de estudios geotécnicos anteriores para Votorantim Metais desde el año 2001, Con el propósito de determinar el nivel del fondo de roca en la Quebrada la Parra, y verificar las características geotécnicas y parámetros dinámicos del terreno, se desarrollaron ensayos de prospección geofísica de Refracción Sísmica, ensayos MASW (Método de Análisis de Ondas Superficiales) y ensayos MAM (Método de Medición de Microtrepidaciones en Arreglos Multicanales) entre los días 01 de febrero al 03 de febrero del 2012. Se desarrolló un estudio de peligro sísmico el cual resulta válido para las proyecciones sísmicas de la Poza N° 6 de acuerdo a su ubicación geográfica dentro de la Refinería de Cajamarquilla. Los parámetros elegidos para caracterizar el movimiento sísmico son:

- La aceleración máxima de terreno.
- Las aceleraciones espectrales con 5% de amortiguamiento.

Todos los resultados están calculados para roca o suelo tipo S1 según la Norma Sísmica Peruana E- 030 (2003). El área del proyecto se encuentra en una zona

de sismicidad alta. La actividad sísmica en la zona se debe al proceso de subducción de la placa de Nazca debajo de la placa Sudamericana, a una razón de 64 mm/año. Esta zona de subducción ha generado varios de los sismos más grandes registrados en el mundo. Sismos con magnitudes entre M 6.0 y M 9.5.

El peligro sísmico se evaluó combinando técnicas del estado actual de la práctica y técnicas del estado del arte en métodos probabilísticos y determinísticos. El enfoque determinístico estuvo en función del sismo más grande del cual se pueda esperar afecte el sitio del proyecto. El enfoque probabilístico estuvo en función de la distribución de sismos en tamaño, ubicación y tiempo que puedan afectar las instalaciones del proyecto. El peligro sísmico en el sitio del proyecto ha sido evaluado para tres niveles de sismos:

- El Sismo Máximo Creíble (SMC), usado en el análisis determinístico.
- El Sismo Base de Diseño (SBD), definido del análisis probabilístico con un periodo de retorno de 475 años en base a la reglamentación para depósitos de relaves mineros actual (MEM, 1995).
- El Sismo Extremo de Control (SEC) definido del análisis probabilístico con un periodo de retorno de 1000 años.

Los resultados del análisis determinístico muestran que las aceleraciones más altas que se pueden esperar en la zona son debido a sismos que se producen debajo del sitio del proyecto, en la parte descendente de la placa de Nazca. En el análisis se estimó que la aceleración producida por el SMC tiene un valor de aceleración media de 0.23g y un valor de aceleración media más una desviación estándar de 0.42g. El SMC tiene una magnitud M 8.0 y una distancia desde la placa de Nazca al sitio del proyecto de 100 km. Los resultados del análisis probabilístico muestran que las aceleraciones máximas esperadas son de 0.38g y 0.50g para el SBD y SEC, respectivamente. Las aceleraciones espectrales para el SBD con periodos de vibración estructural de 0.2s. y 1.0s. son de 0.90g y 0.37g, respectivamente. Los valores del SBD tienen 10% de probabilidad de ser excedidos en 50 años. Los valores del SEC tienen

5% de probabilidad de ser excedidos en 50 años. Los resultados del análisis muestran que el peligro sísmico en el sitio de la Poza N° 5, y por consiguiente, de la Poza N° 6, está gobernado por la zona de subducción de la placa de Nazca. El Análisis de Filtraciones del comportamiento del flujo al interior del dique de la Poza N° 6 se realizó utilizando el programa SEEP/W (Geostudio 2012 versión 8.0). El análisis de estabilidad se realizó siguiendo el método de equilibrio límite bi- dimensional, en condiciones Estáticas y Pseudo-estáticas, utilizando el programa SLOPE/W (Geostudio 2012 versión 8.0, Geostudio).

2.2.Bases teóricas:

2.2.1. Presas De Relave

El desarrollo del sector minero ha obligado la construcción de grandes depósitos para embalsar materiales provenientes de la extracción de los minerales, denominados relaves (tailing). En el método convencional de almacenamiento, estos materiales son embalsados y confinados mediante una presa construida con la fracción gruesa del material, la cual clasifica como arena fina. La construcción de estas presas de relaves es común en el sector por su bajo costo si se compara con otras construidas con otro tipo de material. Un problema de trascendencia e interés dentro del campo de la ingeniería sísmica ha sido el relativo a los proyectos de depósitos de relaves, los cuales son construidos buscando acumular el mayor volumen de material de desecho en la menor área posible, por lo que se construyen tan altos como su estabilidad y las regulaciones ambientales lo permitan. Debido a sus magnitudes y características estos depósitos almacenan gran cantidad de energía potencial, que, al ser liberados, podrían traer consecuencias catastróficas en sus alrededores.

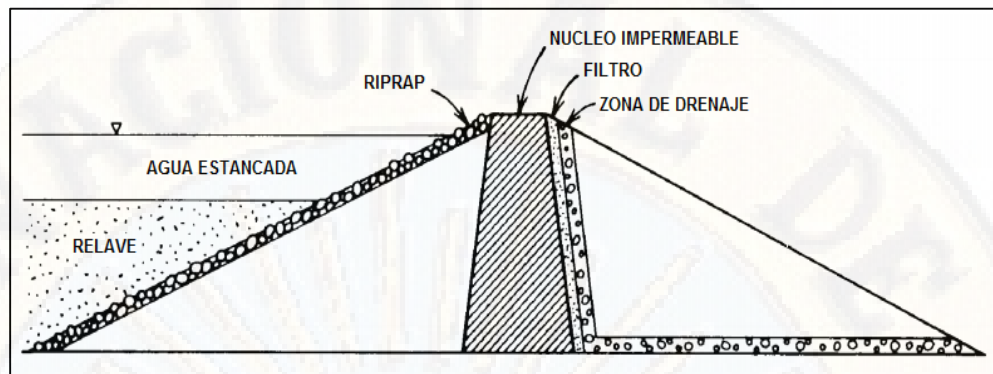


Figura 2. Presa De Retención Para La Disposición De Relaves(1994)

2.2.2. Tipos De Presas De Relave

La disposición superficial de los relaves emplea presas de varios tipos para formar el depósito que contenga los relaves y el agua proveniente del proceso de concentración del mineral. Existen dos clases generales de estructuras de retención:

- Presas de tierra y/o enrocamiento
- Presas de relaves

Las presas de tierra y/o enrocamiento son diseñadas y construidas de acuerdo con las técnicas usuales de presa para retención de agua, con la única excepción que los taludes aguas arriba no están adecuados para experimentar el vaciado rápido. Las presas de este tipo son construidas hasta su altura final, antes de que empiece la descarga de la deposición de los relaves.

Las presas de relaves difieren de las presas convencionales de tierra y/o enrocamiento, porque la construcción de las primeras es efectuada es efectuada por etapas durante la vida del depósito. El levantamiento de la presa generalmente se inicia con un dique de arranque que es construido de material natural de préstamos, y su tamaño debe permitir el almacenamiento del volumen de dos o tres años de flujo de relaves, así como el depósito de flujos de avenida si lo hubiera. El levantamiento de la presa puede ser construido empleando un rango ancho de materiales, incluyendo suelos de préstamo natural, desmonte de mina, relaves depositados hidráulicamente, o arenas de relaves ciclonadas. Indiferentemente del tipo de material empleado en la construcción, el

crecimiento de la presa cae generalmente en tres clases: Aguas Arriba, Aguas Abajo y Línea Central. Estas designaciones se refieren a la dirección en que se mueve la cresta de la presa, en relación a la posición inicial del dique de arranque, a medida que se incrementa su altura.

2.2.2.1. Presa De Relave Construido Con El Método Aguas Arriba

El método de paredes de contención que crece aguas arriba utiliza una fracción del material de relaves, el material es excavado de la playa del relave y usado para construir las plataformas depositadas unas sobre otras. Luego que el dique de arranque es construido, los relaves son descargados periféricamente desde su cresta para formar una playa, como se observa en la figura 02-(a). La playa formada viene a ser la fundación para un segundo dique perimetral como se muestra en la figura 02-(b). Este proceso continuo a medida que se incrementa la altura de la presa. Los relaves forman de esta manera una playa razonablemente competente para soportar los diques perimetrales. Como regla general, es necesario no menos de 40 - 60% de arena del total de relaves descargados. Esto usualmente impide el empleo del método Aguas Arriba con los relaves provenientes de las categorías de roca blanda o finos tales como: Arcillas fosfáticas; desechos de carbón fino; lama de Bauxita roja; potasa y otros; o también cuando la fracción de arena es removida del total de los relaves, para ser empleado en rellenos de la mina. Las mayores ventajas del método Aguas Arriba son el bajo costo y su simplicidad.

Para la construcción de los diques perimetrales son necesarios volúmenes mínimos de relleno colocado mecánicamente, y de esta forma pueden ser construidas grandes alturas de presas a muy bajo costo. Con frecuencia las arenas de relaves de la playa constituyen un conveniente recurso de relleno para los diques perimetrales, excavando y colocando el material con bulldozer. El uso del Método Aguas Arriba sin embargo es limitado a condiciones específicas, por factores que incluyen el control de nivel freático, capacidad de depósito del agua y la susceptibilidad a la licuefacción sísmica.

Sabemos que la ubicación del nivel freático es un elemento crítico en la determinación de la estabilidad del relleno.

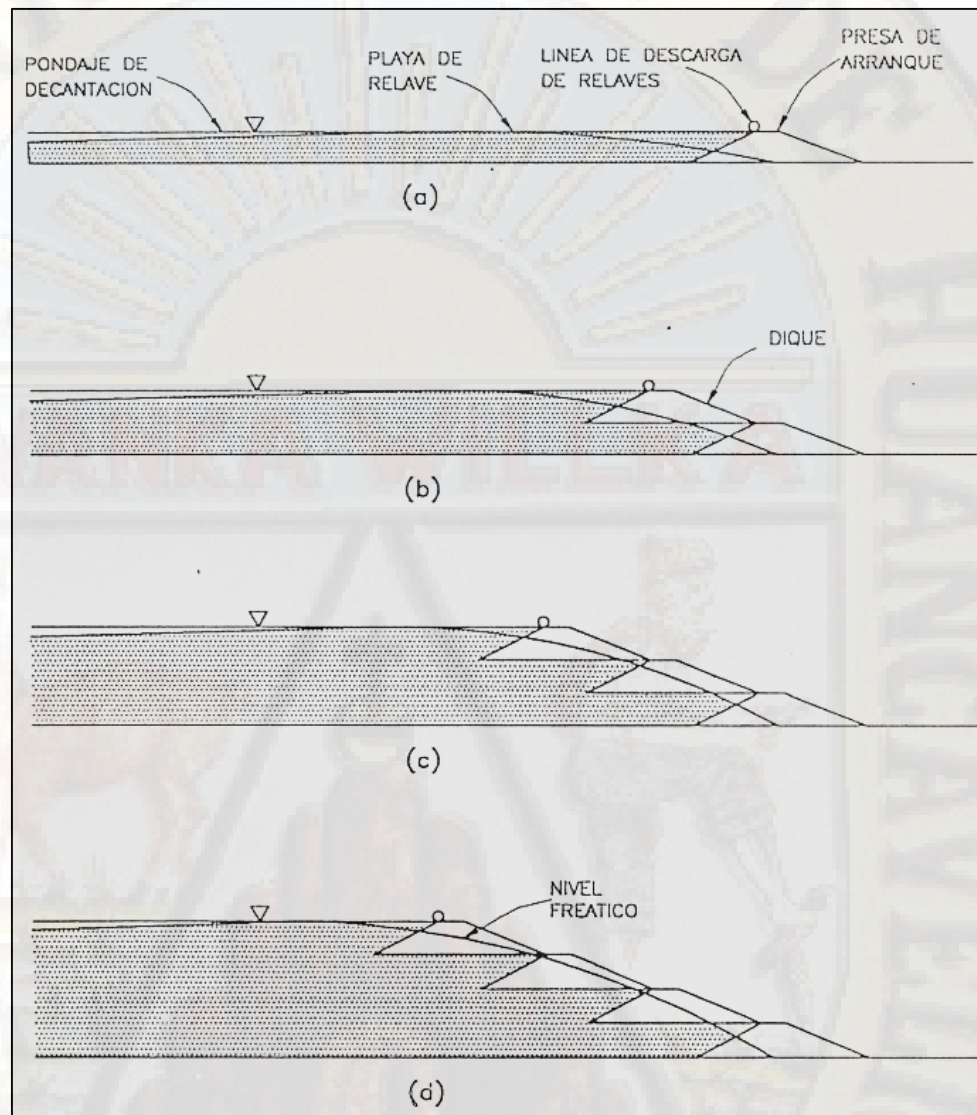


Figura 3. Muestra El Proceso De Construcción Una Presa De Relave Con El Método Aguas Arriba(Vick, 1983)

La figura 03 muestra que los factores más importantes que influyen en la ubicación del nivel freático son la permeabilidad de la fundación relacionada con los relaves; el grado de segregación del tamaño de grano y la variación de la permeabilidad lateral dentro del depósito, y la ubicación del pondaje de agua relacionada con la cresta de la presa. Así, en la figura 03-(a), el pondaje

de agua se encuentra sobre la playa de relaves gruesos, produciendo la condición de nivel freático alto cerca de la cara de la presa que presenta una condición de estabilidad crítica. En casos extremos esta condición puede originar que el agua sobrepase la corona y consecuentemente la rotura de la presa. Se puede afirmar que muchas de las fallas de presas de aguas arriba, se atribuyen a la distancia de separación adecuada entre el pondaje de agua y la corona de la presa. El pondaje de agua puede ser ubicado convenientemente hacia atrás de la cresta de la presa, mediante una apropiada descarga de los relaves con spigots (descarga de grifos) y procedimientos de decantación.

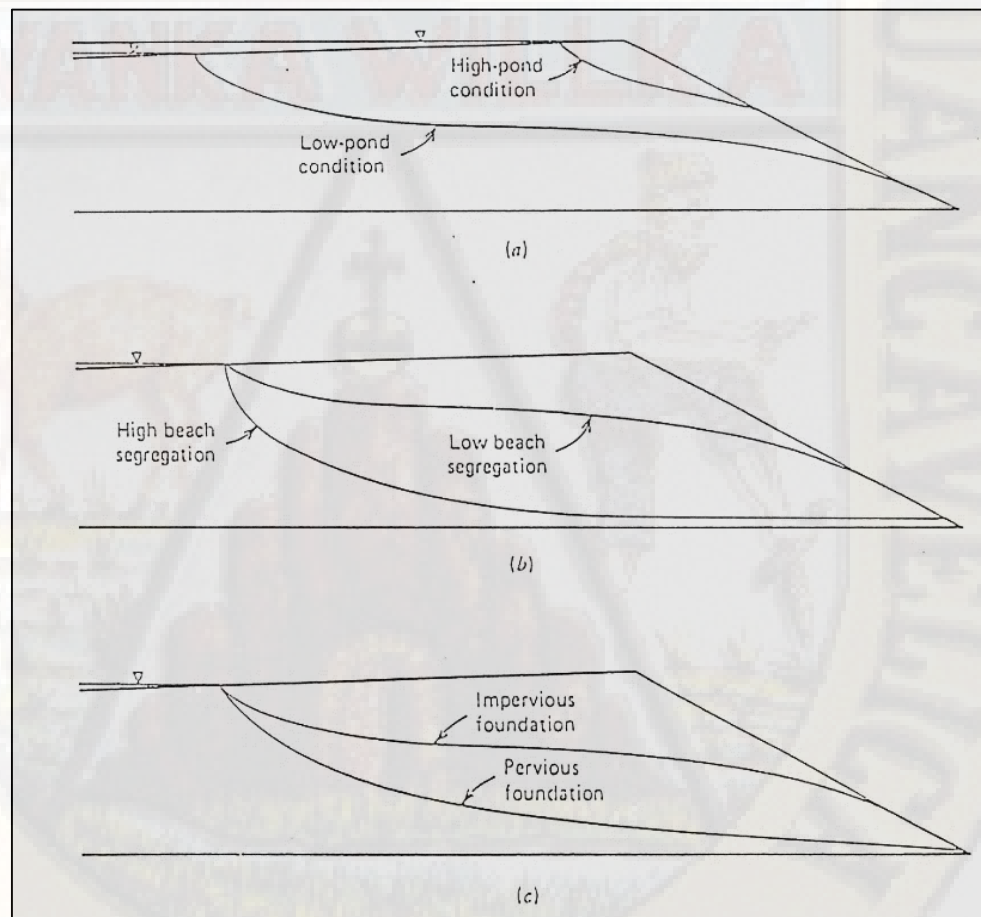


Figura 4. Muestra Que Los Factores Más Importantes Que Influyen En La Ubicación Del Nivel Freático Son La Permeabilidad De La Fundación(Vick, 1983)

Por otra parte, la baja densidad relativa y generalmente alta saturación que ofrecen estos depósitos, pueden originar la licuefacción de los relaves, con desastrosas consecuencias; por lo que se concluye que el método Aguas Arriba es claramente inapropiado en áreas de regular riesgo sísmico. Finalmente, si bien el rango de crecimiento, de la presa está determinado por el rango de producción de flujo de relaves de la mina y las condiciones topográficas del vaso, un rápido crecimiento puede producir presión de poros en exceso en el depósito, propiciando la falla de la presa. Mittal y Hardy en 1947 indican que rangos de crecimiento de 45 m/año pueden provocar falla de la presa.

2.2.2.2. Presa De Relave Construido Con El Método Aguas Abajo

En el método de construcción Aguas Abajo, inicialmente los relaves son descargados en el depósito formado por una presa de arranque, figura 04-(a). Las etapas de crecimiento que se observan en las figuras 04-(b), (c), (d); muestran que la presa es construida colocando el relleno sobre el Talud aguas abajo del levantamiento previo. Este método permite incorporar medidas estructurales dentro del cuerpo de la presa (Por ejemplo, núcleos impermeables y drenes internos, para un control positivo del nivel freático). En este caso, la presa puede almacenar volúmenes significantes de agua directamente contra el talud aguas arriba de la presa; y en otros casos el empleo de un apropiado sistema de descarga perimetral (spigotting) formando una ancha y bien controlada playa de relaves, puede originar en un buen control del nivel freático sin la necesidad de zonas impermeables y drenes.

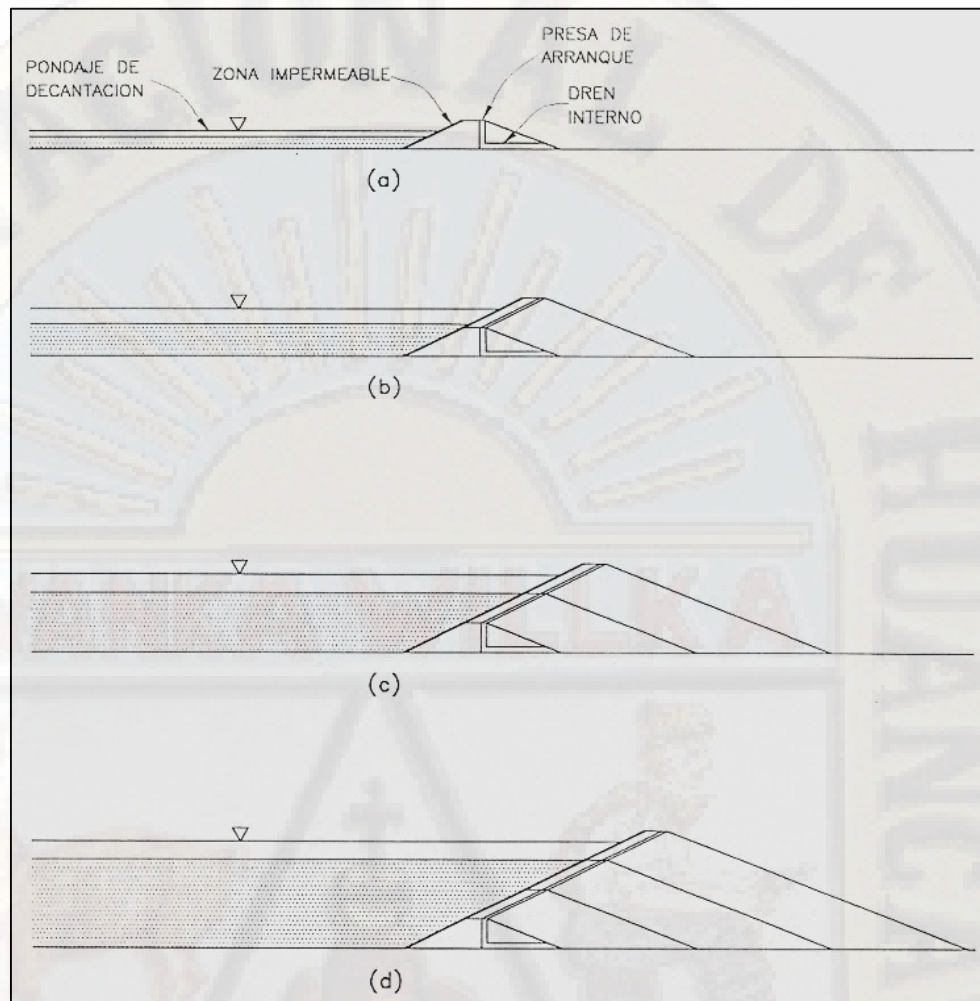


Figura 5. Muestra El Proceso De Construcción Una Presa De Relave Con El Método Aguas Abajo(Vick, 1983)

Considerando que el nivel freático puede ser mantenido en niveles bajos dentro del relleno y teniendo en cuenta que el cuerpo total del relleno puede ser compactado, este método de construcción es resistente a la licuefacción y puede ser empleado en áreas de regular sismicidad. La mayor desventaja del método de Crecimiento Aguas Abajo es el comparativamente gran volumen de relleno de presa requerido y el correspondiente alto costo. La disponibilidad de relleno para varios levantamientos de la presa, puede también imponer impedimentos de la construcción. En particular, si el desecho de mina o arenas de relaves empleando son usados para la construcción del cuerpo de la presa; esos materiales serán producidos en un rango más o menos constante. El volumen de relleno requerido para cada

sucesivo levantamiento aguas abajo, sin embargo, con frecuencia se incrementa exponencialmente a medida que el cuerpo de la presa incrementa su altura. Consecuentemente se requiere un planeamiento anticipado, para asegurar que el rango de producción de material de relleno será suficiente en todo momento, durante la construcción de la presa. Para resolver este problema, se efectuarán los siguientes análisis que se muestran en la **Grafico 05, Grafico 06, Grafico 07, Grafico 08.**

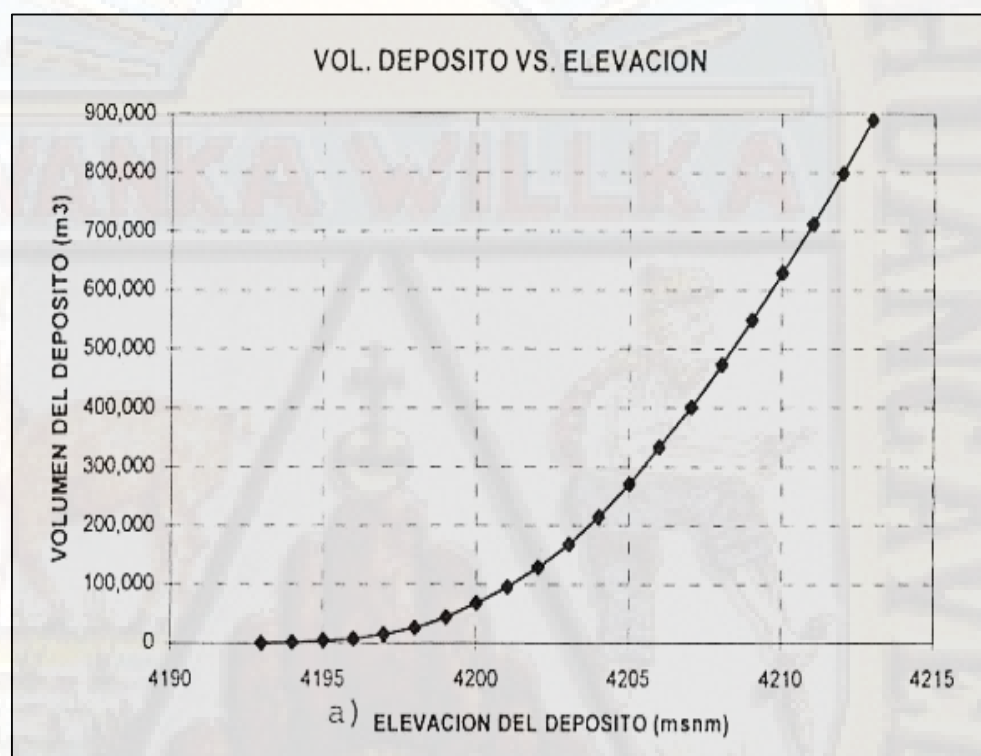


Gráfico 5. Muestra la curva volumen del depósito versus elevación superficial del depósito(Vick, 1983).

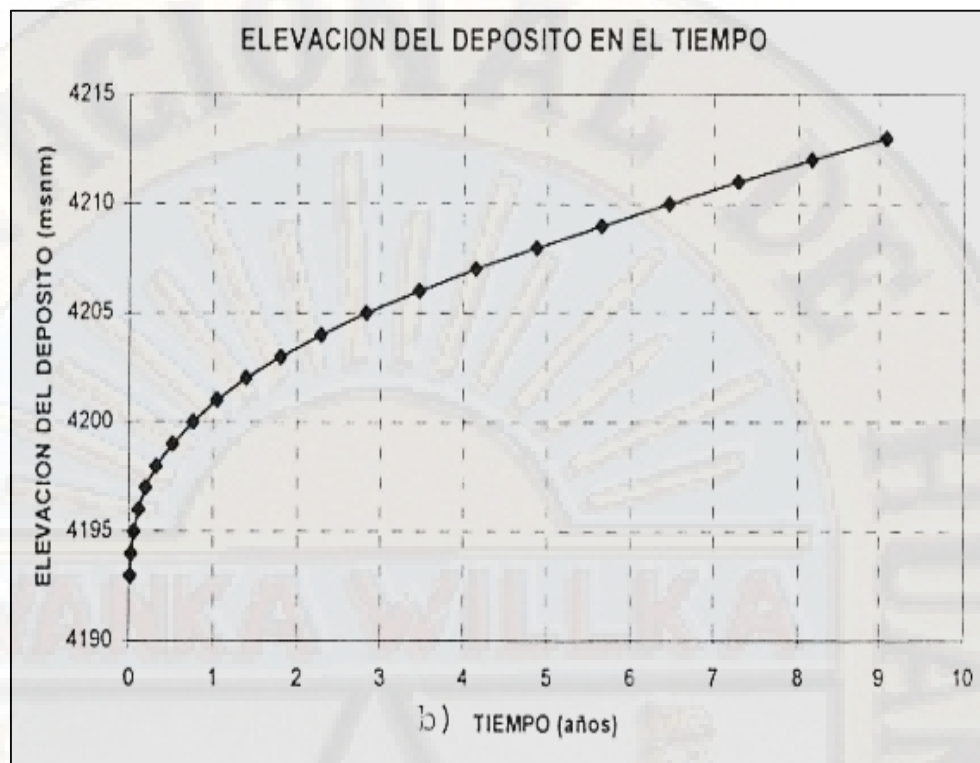


Gráfico 6. Muestra la curva volumen del depósito versus tiempo en años (Vick, 1983)

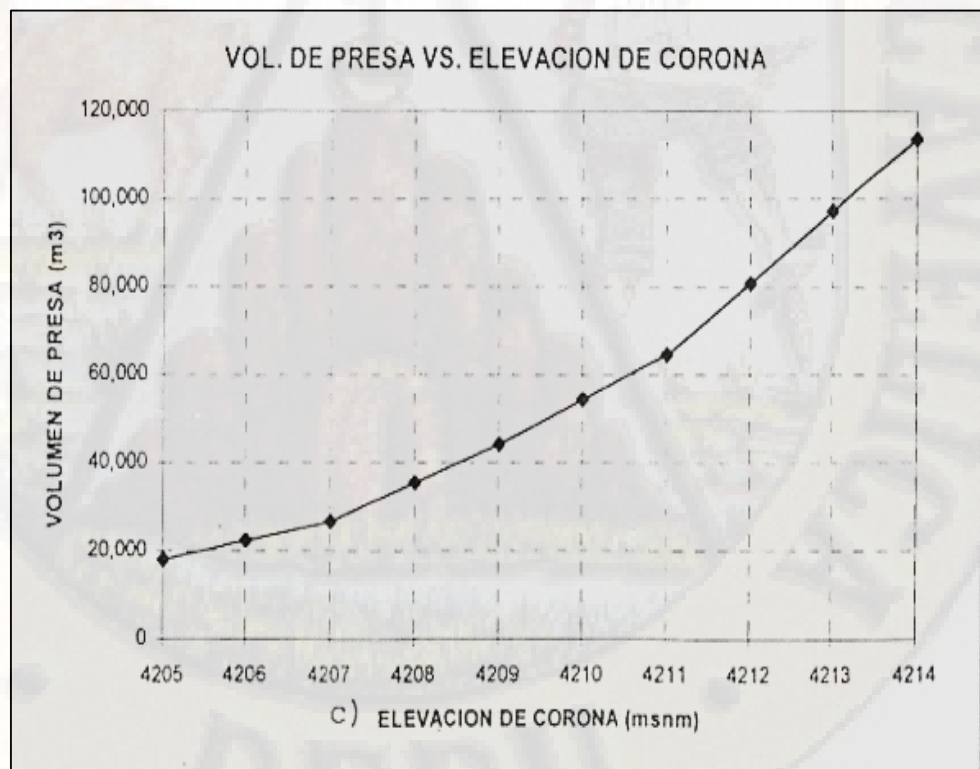


Gráfico 7. Muestra la curva volumen del depósito versus elevación de corona (Vick, 1983)

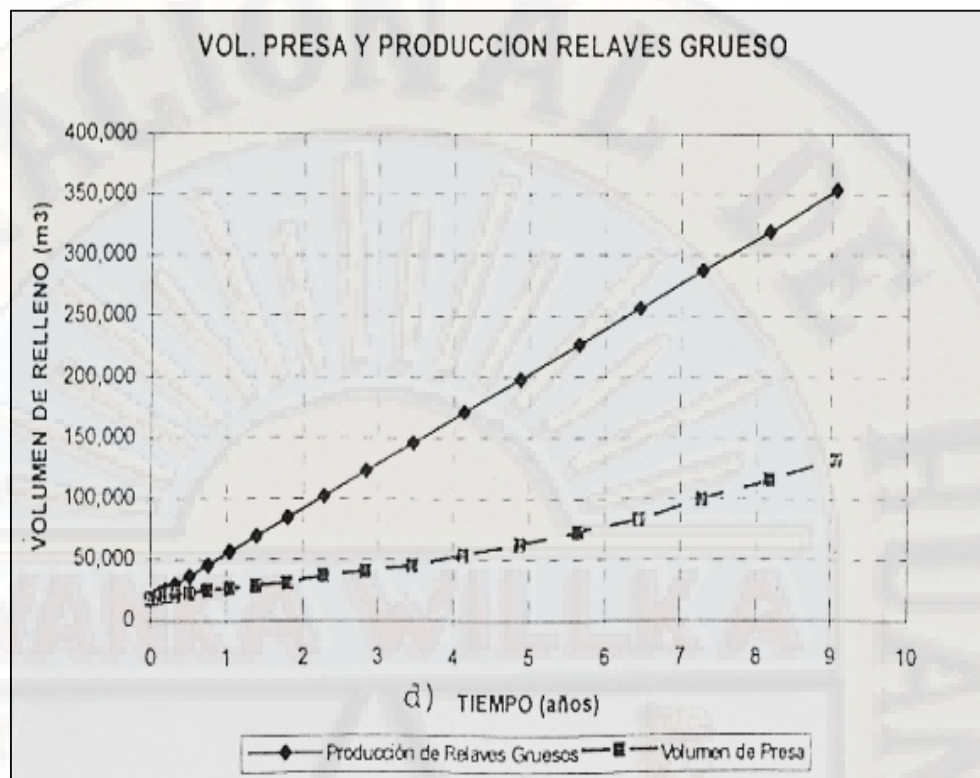


Gráfico 8. Muestra la curva volumen de relleno versus tiempo en años (Vick, 1983)

En la **Gráfico 05**, se muestra la curva volumen del depósito versus elevación superficial del depósito, que es estrictamente una función topográfica. La segunda curva que se obtiene se muestra en la **Gráfico 06**; relaciona la elevación de la superficie del depósito versus el tiempo. En este caso se puede considerar un suficiente incremento de altura del depósito para almacenar el flujo de agua de lluvias extraordinarias, como se muestra por la curva superior de la **Gráfico 06**. La **Gráfico 07**, muestra el volumen de relleno de presa requerido, como una función de la elevación de la corona de la presa; esta relación es determinada por la sección transversal de la presa y la topografía a lo largo del alineamiento de la presa. Para el método aguas abajo cada incremento de altura constante requiere cada vez volúmenes de relleno más grandes para su construcción. La **Gráfico 08**, muestra el volumen de relleno requerido de la presa como una función del tiempo, derivado de los **Gráfico 06**, **Gráfico 07**. La curva de producción de relaves es información proporcionada por la mina o por el Laboratorio metalúrgico (volumen/año)

mientras que la "curva acumulativa" se obtiene para cada caso, ploteando los valores de las curvas del **Grafico 06** y **Grafico 07**.

Por otra parte, si la producción del relave es suficiente en los primeros años, e insuficiente en elevaciones más altas de la presa, este problema puede ser resuelto construyendo un dique de arranque inicial más alto, con materiales de préstamo de suelos naturales, cambiando la curva de producción del relleno en la **Grafico 08** hacia arriba. Desde un punto de vista sísmico, la presa de relave más segura es la construida con el método de aguas abajo, con arena compactada y ciclonaje.

2.2.2.3. Presa De Relave Construido Con El Método De La Línea Central

El método de la Línea Central es un término medio entre los métodos Aguas Arriba y Aguas Abajo en muchos aspectos. Se puede decir que comparte hasta cierto grado las ventajas de los dos métodos, mitigando sus desventajas. El método de la Línea Central, empieza inicialmente con un dique de arranque, desde cuya cresta es distribuido el relave en todo su perímetro para formar el depósito. Los subsecuentes levantamientos son construidos colocando el relleno encima de la playa y del talud aguas abajo previamente levantado. Las líneas de centro de los levantamientos son coincidentes a medida que el relleno de la presa progresa. Pueden ser provistas zonas de drenaje internas dentro del cuerpo de la presa, para controlar el nivel freático, motivo por el cual la ubicación del agua del depósito no afectará a la estabilidad de la presa como el caso de la construcción aguas arriba. El "espigoteado" en el perímetro es necesario para formar una playa de arena superior razonablemente competente, para soportar el relleno nominal que debe ser colocado encima, durante las operaciones de levantamiento. Sin embargo, el ancho de la playa firme no necesita ser grande, y con frecuencia una predominante lama de relaves contiene una pequeña fracción de arena que es suficiente para depositar una adecuada, aunque estrecha playa cerca del punto de descarga.

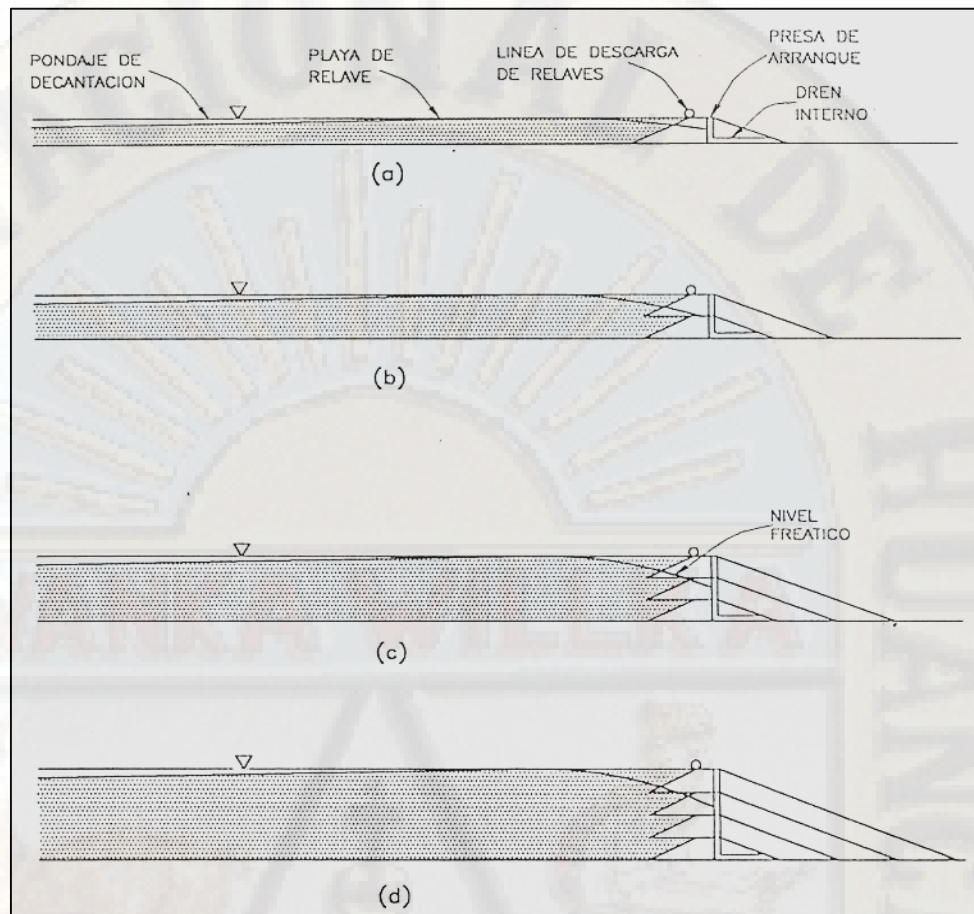


Figura 6. Muestra La Curva Volumen Del Depósito Versus Elevación Superficial Del Depósito(Vick, 1983)

A diferencia de las presas con el método Aguas Abajo, el método de la Línea Central no puede ser usado como depósito permanente de grandes profundidades de agua. El agua puede ser permitida para levantar y permanecer temporalmente durante avenidas, sin embargo, para que no afecte la estabilidad de la estructura se adecuarán zonas impermeables internas o de drenaje en el diseño. Como consecuencia de que el cuerpo principal del relleno de la presa puede ser compactado y controlado los niveles de saturación por drenaje interno, el método de la Línea Central tiene generalmente buena resistencia sísmica. Puede ocurrir en el evento de una licuefacción de la playa de relaves, una limitada falla que comprometa proporciones del relleno aguas arriba colocado sobre la playa.

Sin embargo, mientras las porciones central y aguas abajo de la presa permanecen intactas y si el agua no es acumulada directamente contra la presa, la integridad total y estabilidad de la presa como un todo se considera que no será afectada. El volumen de relleno requerido para una altura de presa dada, es intermedia entre los métodos aguas arriba y aguas abajo, resultando también en costos intermedios. La compatibilidad entre requerimientos de relleno y rangos de producción de relleno (para presas usando desechos de mina o arenas de relaves cicloneadas) puede ser un problema, como se conoce para la presa con el método aguas abajo, pero no con el mismo grado.

2.2.3. Comparaciones De Alternativas De Depósitos De Relaves

La selección de una apropiada opción de depósito de relaves, para un particular problema de deposición de relaves, requiere que sea cuidadosamente analizada la compatibilidad del método para especificar condiciones de sitio; la producción del flujo de relaves y la producción de la mina. De particular interés en muchos casos son las comparaciones de diferentes tipos de terraplenes sobre las bases del costo. Si se considera que el costo del terraplén es proporcional al volumen total del relleno, las comparaciones de varios tipos de terraplenes como se indica en la figura 07 es instructiva. Para alturas de rellenos equivalentes y para particulares configuraciones mostradas, el método aguas abajo o el tipo de presas de retención de agua requiere de aproximadamente tres veces más relleno que una presa con el método aguas arriba de similar altura. La divergencia entre volúmenes de relleno para los diferentes tipos de presas viene a ser más grande con el incremento de altura. Los costos de relleno de presa son ítems significantes en muchos casos, especialmente para presas altas y grandes rangos de producción de relaves. Sin embargo, la contribución de los costos de rellenos de presas al costo total de la colocación de los relaves, varía grandemente. En algunos casos, los costos para remover la parte superior del suelo de las áreas del depósito, el revestimiento del depósito, o el mejoramiento o restauración puede exceder lejos el valor de los costos del relleno de la presa. La selección de tipos de presas de relaves ha sido con frecuencia por combinaciones improbables de

precedentes históricos, observaciones empíricas y requerimientos reglamentarios, mejor que por evaluaciones estrictamente racionales de cada método alternativo en un particular sitio.

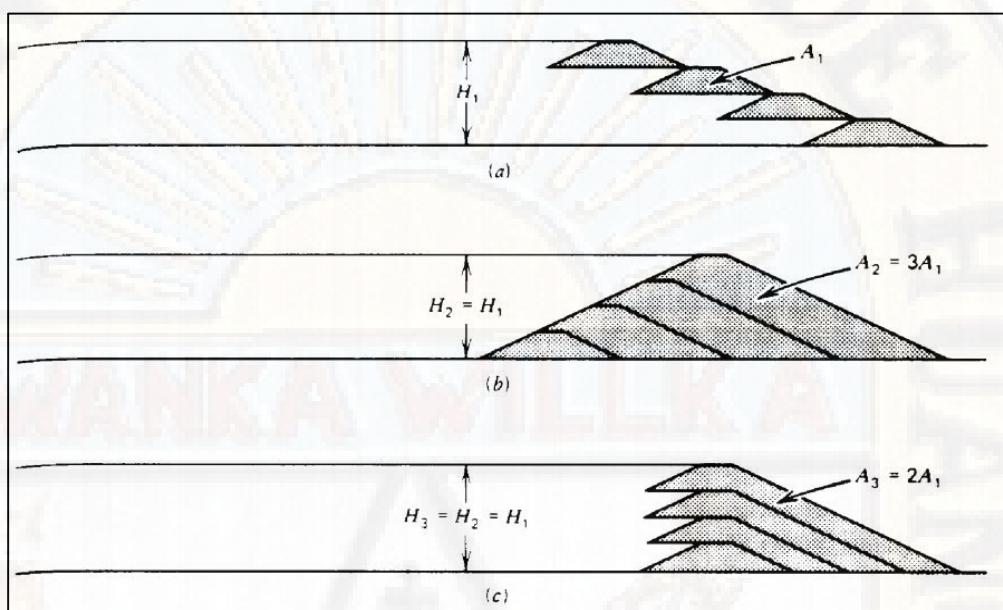


Figura 7. Muestra La Comparación De Alternativas De Presas De Relaves(Vick, 1983)

En las **Tablas 3 y 4** se muestran las comparaciones de las características de los Tipos de presas de Relaves tratados.

Tabla 3. Muestra La Comparación De Las Características De Los Tipos De Presas De Relaves(Vick, 1983)

TIPO DE PRESA	REQUERIMIENTOS RELAVES	REQUERIMIENTOS DESCARGA	ADECUADO DEPOSITO AGUA
Materiales Convencionales (Tierra)	Adecuado para cualquier tipo de relaves	Adecuado para cualquier descarga	Bueno
Aguas Arriba	Al menos 40% - 60% de arena en el total de relaves. Densidad Pulpa baja para promover segregación de los tamaños de granos.	Descarga periférica y una necesaria playa bien controlada.	No adecuado para depósito de agua significativo
Aguas Abajo	Adecuado para cualquier tipo de relaves.	Varía de acuerdo a detalles de diseño.	Bueno
Línea Central	Arenas o limos de baja plasticidad.	Descarga periférica	No recomendable como depósito

		permanente. Depósito de flujo temporal aceptable con apropiados detalles de diseño.
--	--	---

Tabla 4. Muestra La Comparación De Las Características De Los Tipos De Presas De Relaves(Vick, 1983)

TIPO DE PRESA	RESISTENCIA A SÍSMICA	RESTRICCIÓN N CRECIMIENTO	REQUERIMIENTO O RELLENO PRESA	COSTO RELATIVO O PRESA
Materiales Convencionales (Tierra)	Bueno.	Presa completa construida inicialmente.	Suelo natural préstamo.	Alto
Aguas Arriba	Pobre en áreas de alta sismicidad.	Mayormente deseable entre 5-10 m/año. Es peligroso para mayor de 15 m/año.	Suelo natural arena de relaves o desechos de mina.	Bajo
Aguas Abajo	Bueno.	Ninguno	Arena de relaves o desechos de mina si la producción es suficiente o suelo natural.	Alto
Línea Central	Aceptable.	Restricciones de altura para levantamientos individuales.	Arenas de relaves o desechos de mina si la producción es suficiente o suelo natural.	Moderado

2.2.4. Consideraciones Para El Diseño De Presas De Relave

En el diseño de presas de relave la mayor restricción es aquella referida a la limitación de altura debida a factores tales como las características del suelo de fundación y los materiales de desechos depositados, las condiciones geológicas y estructurales imperantes en el área, las condiciones sísmicas de la zona, la posibilidad de vientos importantes y también los posibles daños de importancia agua abajo en caso de producirse la rotura de una presa. Una limitación importante asociada a la altura de presa es la referida al volumen reservado para las deposiciones de material previsto para el futuro. Otra limitación, referida al área, puede estar asociada a la forma de los lugares de depósito en cuanto a sus volúmenes. Por ejemplo, en los valles angostos es necesario tener en vista varios

lugares de depósito para alcanzar la capacidad de embalse prevista por la explotación del futuro de la planta y teniendo en cuenta el ciclo de llenado y secado. Si la ubicación del depósito está cercana a un área municipal, el costo puede llegar a ser prohibitivo. Cuando se determina la dimensión del área necesaria, es importante hacer bien las previsiones, porque a veces puede llegar a ser imposible querer hacer ampliaciones del lugar de depósito.

Las condiciones climáticas pueden ser importantes para definir la ubicación, el método constructivo y la época del año en que se realizan ciertas tareas. Los inviernos severos requieren que la berma sea erigida solo durante los meses de verano, con un suficiente almacenaje disponible para mantener y alojar las necesidades de los materiales de desecho correspondientes a la época del invierno. En las ubicaciones donde hay muchas precipitaciones en combinación con terrenos resistentes, puede resultar que se tengan problemas con la evacuación del agua de esas altas precipitaciones, lo cual puede llegar a hacer casi imposible el erigir la presa. Si el material de desecho tiene bajas características de asentamiento o decantación, de manera que su clasificación sea muy lenta, se necesitan grandes áreas para obtener la decantación inicial. Por ello pueden ser necesarios áreas adicionales en serie para obtener un efluente suficientemente claro y aceptable. Si el agua debe ser reutilizada se deberá efectuar la clarificación de la solución y definitivamente deberá ser purificada si ese efluente será retornado a una cuenca que actúa como fuente de agua para necesidades agrícolas, industriales o municipales.

2.2.4.1. Topografía

El principal factor (Actis, 2000) a considerar en la ubicación del sitio, unido al área o volumen requerido para el almacenamiento durante toda la vida útil de la operación minera, es la topografía, en base a la que se fija el lugar adecuado a estudiar. Generalmente es útil o beneficioso ubicar las presas de desechos en una elevación más baja a la que se encuentra el concentrado para que el transporte resulte de menor costo. La topografía también determina la geometría de las presas y los métodos constructivos. Las formaciones geológicas y morfológicas o topográficas juegan un papel vital en la elección

del sitio de ubicación. Las formas de escurrimiento superficial, deben ser dejadas sin perturbar, de ser posible. Otras veces, el drenaje superficial debe ser redirigido de forma que pueda retomar su curso, agua abajo de la presa. Esto es ventajoso si se considera una posible falla de la presa debido a una excesiva afluencia al embalse o después de la época de producción, al abandonar de la obra. La topografía puede fijar el sistema de evacuación de los efluentes, ya sean drenes, zanjas, cunetas, torres o bombas portátiles, que debe ser instalado para remover los efluentes. La formación geológica, debajo de la cubeta propuesta, puede imponer el empleo de un sello del área de almacenamiento para eliminar la excesiva pérdida de fluido o para impedir que líquidos contaminantes lleguen a la capa freática. Para evitar filtraciones se emplean telas de PVC en todo el fondo del lago, aunque es un sistema de alto costo. Para la selección del lugar del depósito son muy útiles las fotografías aéreas y las cartas topográficas, como así también los levantamientos realizados por restitución aerofotogramétrica. De estas cartas se pueden obtener datos respecto a los lugares aptos para obtener las capacidades de volumen requeridos para el almacenamiento de los materiales. También se pueden determinar los desniveles entre la zona de tratamiento o beneficio de los materiales de la mina y la de ubicación de la presa para las instalaciones de transporte hidráulico y además se pueden evaluar las cuencas de aporte para determinar los caudales que habrá que evacuar por la presa.

2.2.4.2. Naturaleza De Los Materiales De Desecho

Es necesario conocer las características del material que se va a colocar en el depósito. Los tipos de materiales son:

- Material de descarga, material tal como sale del proceso de concentración.
- Material de descarga, material parcial sin saturación.
- Material de descarga, material sin agua o seco.
- Material que será usado (cuando sale de la concentración) como relleno de minas. El material será utilizado todo como desecho.

- Material de desecho, que puede ser descargado de la moledora como un barro o una lechada, usualmente con un rango de un 15 a 55% de sólidos dependiendo de si es espesado o no. Puede ser de libre escurrimiento o un barro gelatinoso dependiendo del contenido mineral, tamaño de la partícula y densidad.

El producto puede requerir transporte mecánico debido a la filtración final en el concentrado y el avance en las operaciones de concentración. El transporte de desechos finos al embalse es generalmente como una pasta o lechada hecha por gravedad o por bombeo, dependiendo de la elevación y las condiciones topográficas a salvar entre el concentrado y el área de evacuación y depósito. La composición del lodo o pulpa y su densidad y que el transporte sea por gravedad o bombeo, determinan el material de la tubería de transporte (acero, hormigón, asbesto-cemento, PVC, plástico, madera, etc.) para combatir las características corrosivas y erosivas de la pulpa durante el transporte. El transporte más económico es el transporte por gravedad. Es necesaria una evaluación cuidadosa de las capacidades de las bombas y tuberías en un sistema que no es por gravedad para que funcione bien y sin problemas. Será también necesario considerar el reciclaje de las aguas.

2.2.4.3. Impactos Ambientales

La mayoría de la legislación referente al tratamiento de los desechos ha sido dirigida particularmente a los aspectos de la contaminación de las aguas, pero en la actualidad se nota una atención creciente con respecto a la contaminación producida por el transporte del aire. El control de los escurrimientos naturales del agua ha llegado a ser más crítico en los años recientes dado que también se ha incrementado la ejecución de presas de desechos mineros e industriales por compañías que explotan yacimientos o fabrican materiales que dejan mucho desecho contaminante. Por ello las oficinas de los gobiernos provinciales y municipales también han incrementado los controles. El agua que escurre puede ser embalsada para servir como un lago de agua fresca y ser usada como una fuente para una planta de agua, o puede usarse para control decrecientes o para producción de

energía hidroeléctrica, o con fines recreacionales y de turismo. Los escurrimientos de agua, ordinariamente son canalizados alrededor del depósito de desechos y luego devueltos a los canales naturales de drenaje, arroyos, ríos, etc., existentes desde antes que se estableciera la planta. Un aspecto que se ha incrementado notablemente es el monitoreo y control de las filtraciones en la zona del depósito de los desechos, tanto horizontalmente como verticalmente. La neutralización de los líquidos producidos por el procesamiento de los materiales de concentración minera puede convertirse en el futuro en la mayor inversión dentro del costo total del proyecto. La selección del área de depósito puede estar acoplada a las condiciones del subsuelo, si las posibilidades de ubicación no son muchas, de tal manera que puede ser necesario que el área donde se ubicarán los desechos sea sellada antes del primer llenado. El mismo tratamiento debe dársele a las filtraciones que pueden escurrirse a través de las instalaciones. Es posible que un líquido relativamente inocuo pueda combinarse con el subsuelo en su camino de filtración para formar un fluido indeseable, de tipo contaminante, si no se lo trata previamente.

2.2.4.4. Estudios Hidrológicos

Para la ubicación de la presa es necesario conocer una serie de datos referidos al escurrimiento de agua por encima de la presa. La determinación del área que contribuye con agua al lugar del emplazamiento o cuenca de aporte, se determina con ayuda de pares de fotografías aéreas y con planimetría de la zona con curvas de nivel, obtenida de levantamientos topográficos o con trabajos de aerofotogrametría aérea. Una gran cuenca de aporte o superficie de drenaje agua arriba de una presa de cola generalmente requiere tomar algunas previsiones para derivar los caudales del escurrimiento, ya sea a través o debajo del área de depósito de materiales en ella. En algunos casos se debe incluir un dique separado del almacenamiento de agua para proveer a las operaciones de la planta de producción. Una pequeña cuenca de aporte producirá un escurrimiento de poco valor que usualmente podrá ser incorporado al diseño del área de depósito por medio de un agrandamiento

del sistema de decantación. Es necesario también efectuar estudios hidrológicos para detectar cualquier filtración de agua bajo presión hidrostática en todo el volumen de fundación que puede afectar la estabilidad. La presencia de zonas débiles o permeables en el sustrato de la presa (bed rock), pueden desarrollar presiones hidrostáticas debajo de la presa cuando se agrega la sobrecarga del embalse. Esto crea una condición inestable para la base de la presa. Se pueden instalar células de presión para medir estos parámetros. Es conveniente también estudiar los escurrimientos subterráneos en el entorno de la presa.

2.2.4.5. Estudios Climatológicos

La climatología juega un papel importante en la elección del sitio y diseño final de la presa de relave. Los principales factores a ser considerados son los siguientes:

- Régimen de lluvias.
- Evaporación
- Temperaturas de congelación
- Duración de la estación invernal
- Vientos

Cuando los inviernos son largos y fríos, con muchas heladas y considerables nevadas, la construcción del dique es usualmente restringida a los meses de verano. Ello es debido a que el congelamiento del agua genera problemas importantes en el avance constructivo pues el hielo impide el drenaje de las aguas y la compactación se ve dificultada. Es de gran utilidad el conocimiento de la historia de las precipitaciones pluviales de la zona como así también de los escurrimientos superficiales, para tenerlos en cuenta e incluirlos en el cálculo de los efluentes de la presa de cola. Este conocimiento implica tener determinadas las precipitaciones máximas por día y por hora en un período razonable de años, generalmente no menor de 50. Los datos climatológicos son obtenidos generalmente de los servicios meteorológicos gubernamentales o privados o por mediciones en el lugar.

2.2.4.6. Estudios Geotécnicos Para La Fundación De La Presa

Para el diseño de la fundación de la presa se debe tener en cuenta:

- Investigación de la fundación, Las investigaciones de las condiciones de fundación que se realizan para implantar una presa de desechos mineros son iguales a la que se realizan para una presa clásica. Las investigaciones de fundación usualmente incluyen ingeniería de mecánica de suelos e investigaciones geológicas tales como, exploraciones subsuperficiales, ensayos de laboratorio para conocer las características ingenieriles o calidad de los suelos y rocas de la fundación, permeabilidad, densidad, compresibilidad y resistencia al corte. Las investigaciones geológicas incluyen la preparación de un mapa superficial de los depósitos o rocas superficiales y cortes basados en el reconocimiento del área, como así también del estudio de fotografías aéreas estudiadas por el ingeniero o el geólogo. Se deberá hacer una evaluación del riesgo sísmico de la zona. Deberán estudiarse también las posibilidades de deslizamientos a producirse en la futura obra. Se estudiarán las fallas existentes y las zonas de rocas débiles y de las permeables.
- Investigaciones subterráneas, Consisten en la ejecución de perforaciones de investigación con extracción de testigos que son sometidos a ensayos para determinar las características mecánicas de las rocas de fundación. El número, ubicación, tipo y profundidad de las perforaciones depende del tipo y altura de la presa de desechos, como así también la geología del área. Se efectúan además mediciones de la resistencia in-situ de los suelos y de la dureza de la roca, además de la determinación de los niveles de agua subterránea. De las perforaciones se suelen extraer muestras no disturbadas, tanto de suelos, como de rocas. A veces se acompañan las perforaciones con la excavación de trincheras a cielo abierto. También se efectúan estudios geofísicos, como por ejemplo sísmicos, que proveen información indirecta de la configuración del terreno de fundación. Los perfiles sísmicos sirven además para determinar las capas de agua en los diferentes sitios

propuestos, y las características de los estratos de fundación, facilitando la selección y cuantificación del material adicional de las inmediaciones para la construcción de la presa inicial. La ventaja de la investigación geofísica es su bajo costo relativo. La permeabilidad puede ser estudiada a través de las perforaciones por medio del método Lúgeon de caracterización de los suelos y rocas. Complementariamente pueden utilizarse piezómetros a ser instalados por medio de perforaciones en ciertos puntos de los terraplenes, con el objeto de obtener observaciones continuas de las fluctuaciones del nivel de agua en el lugar.

- Extracción de muestras de suelos y ensayos, Los materiales a emplear en la construcción de una presa de desechos mineros incluyen, además de los materiales de procesos de la planta minera, materiales del lugar tales como suelos y rocas que servirán para la construcción. Será necesario además conocer las características de los suelos y rocas de apoyo de las presas. Para ello se deben sacar muestras, realizar ensayos granulométricos y clasificar los materiales según el sistema de Clasificación Unificado de Suelos. Se extraerán muestras no disturbadas a fin de obtener datos de la capacidad in-situ de los materiales correspondientes a las cargas actuales y humedad del terreno. Las muestras a extraer se separarán para dos fines: un pequeño grupo para la clasificación textural y otro grupo para determinar las características físicas con contenidos de humedad simulados. El número de muestras no disturbadas serán las necesarias para determinar las propiedades físicas de los suelos involucrados. Las determinaciones incluyen usualmente el análisis mecánico, efectuado por medio de tamices, el ensayo con hidrómetro, la determinación de la gravedad específica y de los límites de Atterberg. Los límites de Atterberg son ensayos de plasticidad que ponen de manifiesto la presencia y cantidad de material coloidal en arcillas. Los ensayos de compresión triaxial o corte directo de muestras no disturbadas o remodeladas permiten obtener los datos respecto a la resistencia al corte, consolidación y permeabilidad. Los dos tipos de ensayos in-situ, realizados con

perforaciones, son el de penetración, que nos da la capacidad del suelo a la penetración o capacidad soporte, y el de permeabilidad, que permite obtener datos respecto a las características de filtración de los suelos de apoyo. El ensayo de penetración es una medida de la energía requerida para deslizar por penetración una punta normalizada en un suelo o roca. El método de ensayo es un procedimiento empírico que se utiliza para estimar las características del soporte de los suelos, basados en la experiencia de suelos semejantes. Los ensayos de permeabilidad son también muy usados por los diseñadores de presas para conocer las características de los suelos o las rocas de apoyo. En el estudio de suelos se emplea el ensayo de carga hidráulica constante en una perforación, llenando con agua el hueco de la perforación, manteniendo siempre el mismo nivel por medio del agregado del líquido que sea necesario. A medida que va bajando el nivel se toman lecturas del volumen incorporado por la unidad de tiempo para mantener constante el nivel de agua en la perforación. Para la determinación de la permeabilidad en las rocas se emplea el ensayo tipo Lúgeon que se realiza en perforaciones hechas con barrenos, colocando tapones de una cierta longitud en los extremos de los segmentos a investigar e inyectando agua a presión y midiendo la cantidad de líquido que es absorbida en un determinado tiempo. Este ensayo es especialmente útil para investigar rocas con fallas o diaclasas y proyectar los tratamientos (inyecciones) a realizar, especialmente cuando son necesarias cortinas de impermeabilización o para fijar posibles pérdidas a verificarse en obra.

- Ensayos de laboratorio, Las investigaciones de laboratorio de los materiales del lugar nos darán las características de los suelos y rocas de fundación que soportará la presa de desechos, como así también de los materiales elegidos, preferentemente en los alrededores (materiales de préstamos), para emplear en la construcción de las presas iniciales. La clase de investigaciones a realizar será determinada por un ingeniero en suelos, así como la extracción de muestras representativas y la

realización de los ensayos apropiados. Para muestras no disturbadas generalmente se realiza las siguientes determinaciones:

- ✓ Clasificación visual, límites de Atterberg y análisis mecánico de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.
- ✓ Ensayos de muestras representativas que incluyen compresión y compresión triaxial, para obtener datos de resistencia al corte de los suelos de fundación y de la humedad natural, para muestras saturadas y ensayos de consolidación y permeabilidad.

2.2.4.7. Estudio De Los Materiales A Colocar

Los materiales de préstamo necesarios para ser utilizados en los diques iniciales o bermas, también deben ser ensayados. Se hace usualmente la clasificación textural, la determinación de los límites de Atterberg, ensayos de compactación, compresión triaxial, consolidación y permeabilidad, sobre especímenes de suelos compactados a varias densidades y con contenidos de humedad variable. Se deben ensayar además los materiales de desechos, incluyendo la clasificación visual, la determinación de los límites de Atterberg, el análisis mecánico de clasificación de acuerdo al Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, la determinación de la gravedad específica o peso específico, el análisis químico, etc. Se harán también los mismos ensayos realizados en los materiales de fundación o a los materiales de préstamo para ser usados en la presa.

2.2.4.8. Estudios De Sismicidad

Los diques de desechos mineros deben ser diseñados para resistir cualquier probable actividad sísmica de la zona. La acción sísmica es un problema de excitación por la base, en el caso de las presas el problema es especialmente complejo al producirse una interacción presa-fundación-relave, en zonas de sismicidad elevada, y para presas de relave, se deberían realizar estudios sismo tectónicos, para determinar los sismos de proyecto, así mismo se deberían considerar los efectos producidos por la sismicidad inducida por el embalse.

2.2.4.9. Estudios De Contaminación Del Medio Ambiente

Las consideraciones respecto al medio ambiente son muy importantes durante las etapas de los diseños de las áreas de depósito de los desechos mineros. Previsiones para el control del polvillo tanto como la prevención de la entrada de iones contaminantes al agua del subsuelo deben ser incluidas en el diseño.

2.2.5. Tipos de fallas en un talud

Según Knight (2015), pueden distinguirse las siguientes formas de falla en un talud.

2.2.5.1. Deslizamiento por rotación

Cuando se realiza un análisis bidimensional, la superficie de falla puede ser aproximada por un arco circular:

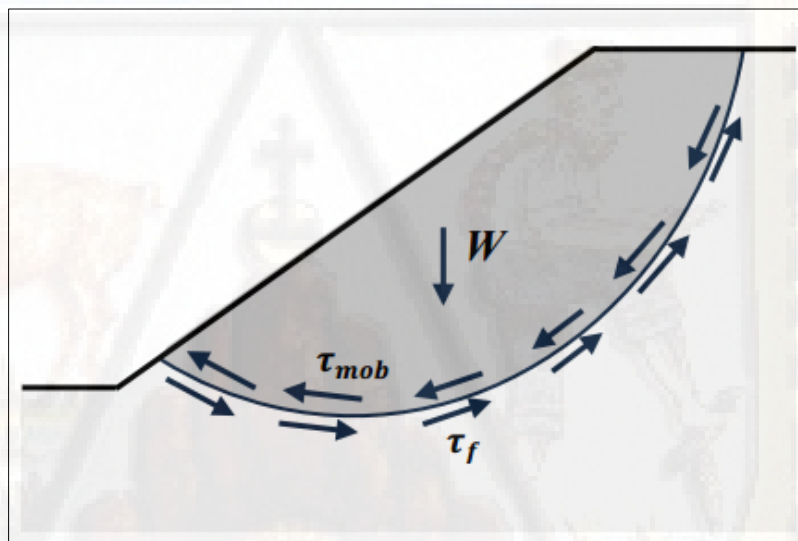


Figura 8. Superficie de falla circular en un talud(Knight, 2015)

Donde:

W = Peso de la masa de falla

τ_{mob} = Esfuerzo cortante que favorece el movimiento de la masa de falla

τ_f = Esfuerzo resistente a la superficie de falla

La falla ocurre cuando el esfuerzo cortante a lo largo de la superficie de falla, es igual o mayor que el esfuerzo resistente; en términos simples podemos mencionar que la falla ocurre cuando el factor de seguridad es menor que 1.

Si continuamos analizando podemos deducir de la figura anterior que existe un número infinito de posibles superficies de falla:

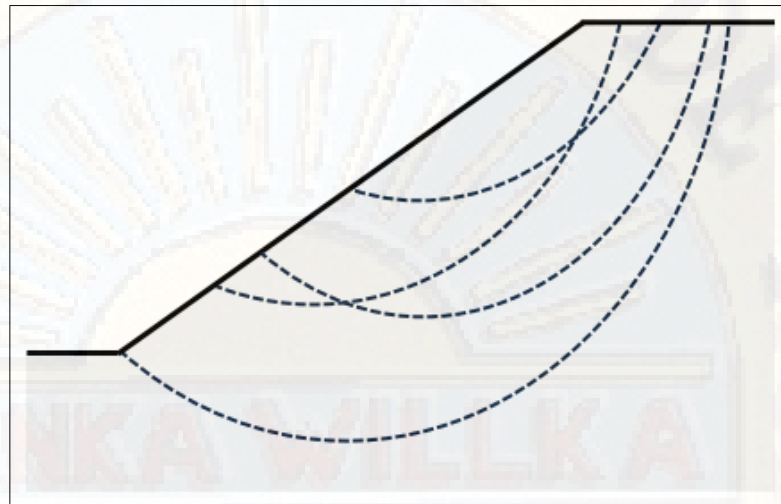


Figura 9. superficies de falla potenciales de un talud (Knight, 2015)

2.2.5.2. Deslizamiento traslacional

El desplazamiento traslacional es similar al desplazamiento rotacional, con la diferencia de que la superficie de falla es una línea recta en vez de curvilínea. La falla ocurre cuando un estrato de suelo más débil se superpone a un estrato rígido, permitiendo de esta manera que el suelo más débil se deslice hacia abajo.

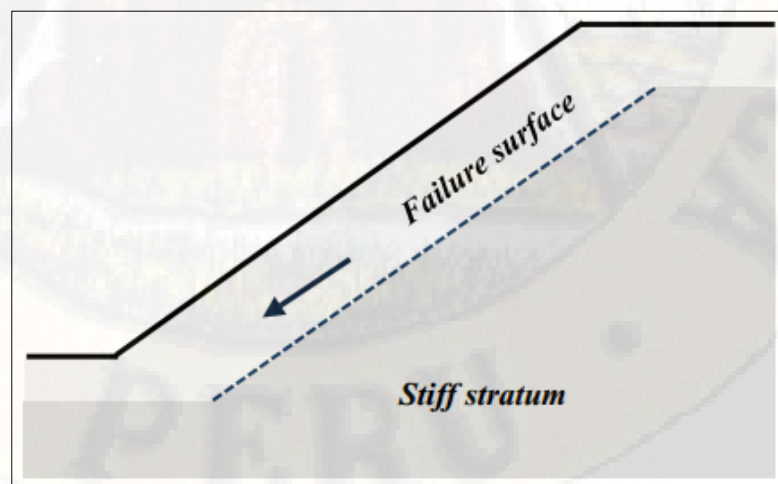


Figura 10. Falla por desplazamiento traslacional(Knight, 2015)

La combinación entre una falla rotacional y una falla traslacional (llamada también falla compuesta) ocurre cuando la superficie de falla es circular, pero es interceptado por un estrato rígido causando una superficie de falla recta a lo largo de la interfaz entre los estratos.

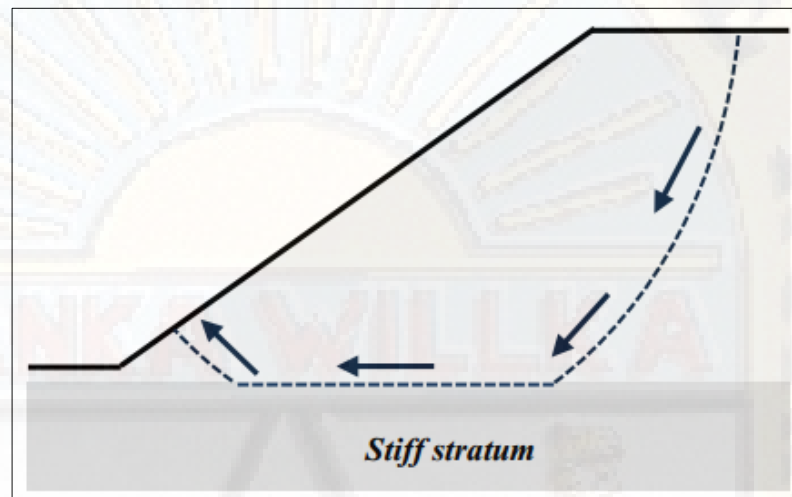


Figura 11. Superficie de falla compuesta(Knight, 2015)

2.2.5.3. Falla de fundación

las propiedades de la fundación de una presa de relave son importantes durante la fase de diseño y construcción, los planos potenciales de debilidades son inherentes a la interfaz entre la cimentación y el terraplén de la presa. ante este panorama es muy posible que se den fallas por deslizamiento, así como fallas compuestas o traslacionales.

La falla de la cimentación ocurre generalmente en presas construidas por el método aguas arriba, ya que los terraplenes existentes se tratan como cimientos para la posterior colocación y compactación del dique.

2.2.5.4. Falla por desbordamiento

La falla por desbordamiento puede ocurrir cuando hay un aumento en los niveles de agua, debido a las fuertes lluvias, las inundaciones o la mala gestión de los relaves que entran al estanque, si se produce un desbordamiento

excesivo, se romperá la pared aguas arriba y la posible erosión de la pendiente aguas abajo puede llevar a la falla completa de la presa.

Por lo tanto, es importante realizar un desvío efectivo del agua superficial y la escorrentía, pues es un componente clave en el diseño de las presas de relaves, a fin de poder evitar el exceso de agua de tormenta que ingresa a la presa.

2.2.5.5. Falla por tubificación

La tubificación es producto de la erosión interna en el cuerpo o la fundación de la presa, que puede conllevar a una falla rápida de la presa, la tubificación ocurre cuando hay filtración en el cuerpo o la fundación de la presa, de tal manera que se crea una región de baja presión que hace que el agua o los relaves líquidos fluyan a esta área.

2.2.5.6. Falla por licuefacción

Si las partículas de suelo en la presa no están consolidadas y tienen un tamaño similar, son susceptibles a fallar debido a la licuefacción. La licuefacción es el proceso por el que las partículas del suelo suspendidas en los relaves se vuelven viscosas (como resultado de eventos sísmicos o maquinaria en movimiento) y pueden fluir a través de las debilidades en el suelo.

2.3. Definición de términos

2.4. Hipótesis

Dada las bases teóricas desde un punto de vista científico y analizado las diferentes posturas sobre la problemática y teniendo en cuenta que las hipótesis son proposiciones que se expresan en forma afirmativa o negativa acerca de lo que el investigador espera encontrar, nos planteamos las siguientes hipótesis:

Hipótesis general

El Análisis Sísmico Pseudo Estático y Pseudo Dinámico genera resultados en la Estabilidad de la Presa de Relave Minero en la Provincia de Angaraes, Departamento de Huancavelica.

Hipótesis específicos

1. El Análisis Sísmico Pseudo Estático genera resultados en la Estabilidad de la Presa de Relave Minero en la Provincia de Angaraes, Departamento de Huancavelica.
2. El Análisis Sísmico Pseudo Dinámico genera resultados en la Estabilidad de la Presa de Relave Minero en la Provincia de Angaraes, Departamento de Huancavelica.
3. La cohesión y el Angulo de fricción influye significativamente en el factor de seguridad de la Presa de Relave Minero en la Provincia de Angaraes, Departamento de Huancavelica.

2.5. Variables

Del análisis realizado sobre la problemática en estudio, se ha identificado las variables de acuerdo a un criterio metodológico, para nuestro caso:

Variables Independientes:

- Análisis sísmico pseudo estático.
- Análisis sísmico pseudo dinámico.

Variable dependiente:

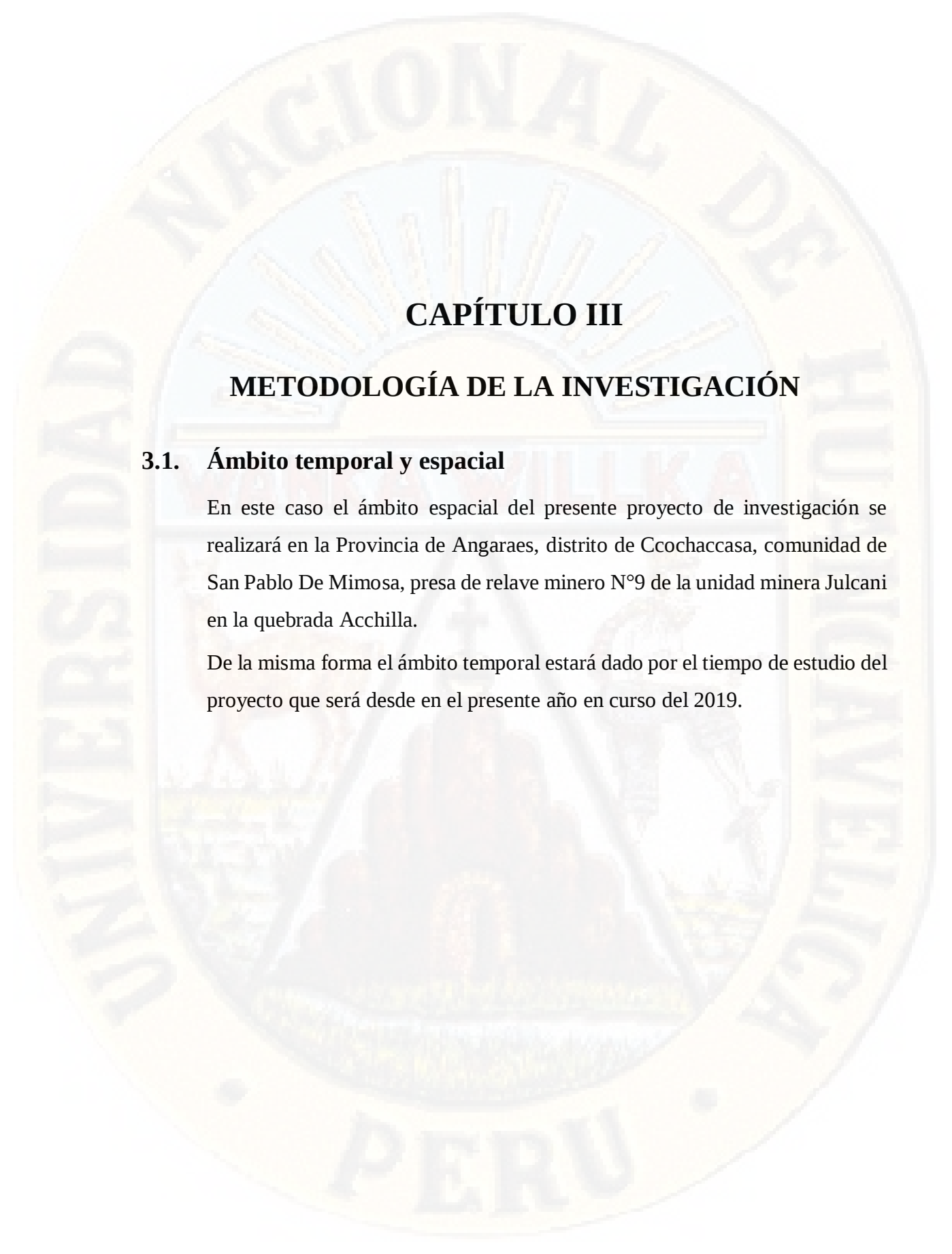
- Estabilidad de presa de relave

2.6. Operacionalización de variables

Tabla 5. Operacionalización de variables dependientes e independientes

Variable	Definición conceptual	Dimensión	Índice / Indicador
VARIABLE INDEPENDIENTE - análisis sísmico pseudo estático. - Analisis sísmico pseudo dinámico.		Densidad	kg/m ³
		Cohesión	gr/pulgada ²
		Angulo de fricción	
		Módulo de corte	
		Numero de Poisson	n
		Porosidad	m ³ /m ³
		Permeabilidad	cm/h
VARIABLE DEPENDIENTE tabilidad de presa de relave	La resistencia a la flexión es una medida de la resistencia a la tracción del concreto. El módulo de rotura será mayor que en el caso de la carga en los puntos tercios.	Factor de seguridad	

Fuente: Elaborado por las tesisistas.



CAPÍTULO III

METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Ámbito temporal y espacial

En este caso el ámbito espacial del presente proyecto de investigación se realizará en la Provincia de Angaraes, distrito de Ccochaccasa, comunidad de San Pablo De Mimosa, presa de relave minero N°9 de la unidad minera Julcani en la quebrada Acchilla.

De la misma forma el ámbito temporal estará dado por el tiempo de estudio del proyecto que será desde en el presente año en curso del 2019.

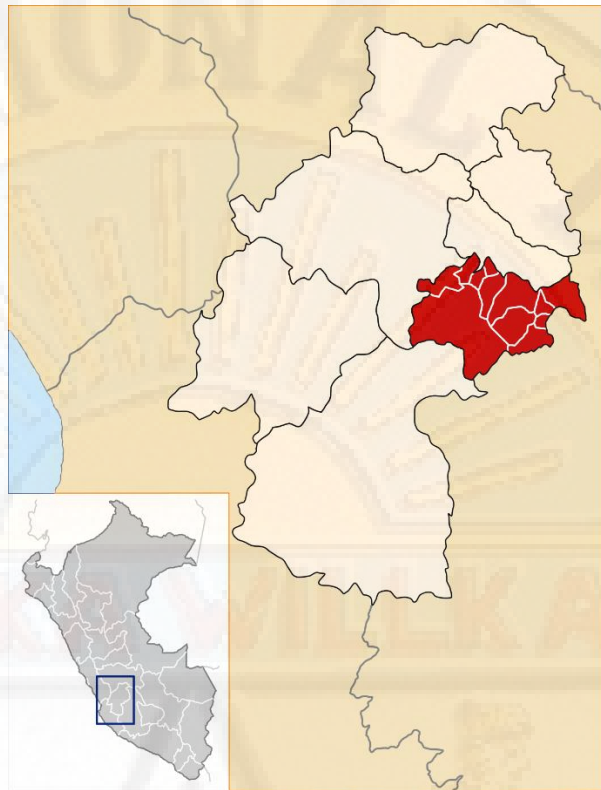


Figura 12. Mapa del departamento de Huancavelica.



Figura 13. Mapa de la provincia de Angaraes y ccochaccasa



Figura 14. Muestra la presa de relave minero Julcani unidad Accchilla.

3.1.1. Superficie del área de estudio

La superficie total de área de estudios es de 215,713.00 m², la cual es el area de influencia de la presa de relave el cual es el area de estudio.



Figura 15. Superficie del área de estudio

SECTOR	NORTE	ESTE	ÁREA m2
Presa acchilla N° 9	8571630.78 N	522168.66 E	215,713.00

Tabla 6: Ubicación y Área de los Sub Sectores de Estudio

3.2. Tipo de investigación

Según Gago ⁽¹⁶⁾ la investigación **aplicada o tecnológica** es aquella que se caracteriza por que busca la aplicación o utilización de los conocimientos que se adquieren. Por lo tanto la presente investigación es una Investigación Aplicada.

3.3. Nivel de investigación

Según Gago ⁽¹⁶⁾ la investigación explicativa se encarga de buscar el porqué de los hechos mediante el establecimiento de relaciones causa-efecto. Por lo tanto la presente investigación es una Investigación de nivel **Explicativo**.

3.4. Método de Investigación.

Según Gago ⁽¹⁶⁾ el método científico es en el que los investigadores hacen observaciones a las inducciones, formulando hipótesis y a partir de estas realizan deducciones y extraen las consecuencias lógicas, además que dentro del método científico encontramos el Método Descriptivo que consiste en el análisis e interpretación de los datos que han sido reunidos con un propósito definido. Por lo tanto la presente investigación utiliza **el Método Descriptivo**.

3.5. Diseño de Investigación

Según Gago ⁽¹⁶⁾ en el diseño longitudinal el investigador toma muestra de sujeto por un periodo bastante largo, algo que será evaluado en uno o varios momentos en el tiempo, así mismo menciona que el diseño ex post facto es aquel en el cual el investigador no introduce ninguna variable experimental en la situación que se desea estudiar. Por lo tanto la presente investigación tiene un Diseño longitudinal – ex post facto.

Donde:

$$M \begin{matrix} T_1 T_2 T_3 T_4 \\ O_1 O_2 O_3 O_4 \end{matrix}$$

M1, M2: Muestra de trabajo

T1, T2, T3, T4: Momentos observados

O1, O2, O3, O4: Observaciones realizadas

M: Muestra de estudio

3.6. Población, muestra y muestreo

Según Gago ⁽¹⁶⁾ en una investigación la población está dada por el conjunto de sujetos al que puede ser generalizado los resultados del trabajo. Esta definición es muy importante como lo veremos a continuación. Porque en virtud de ella, se puede hablar de dos tipos de población. Una a la que se denomina población objetivo y que involucra al total de sujetos a los que se intentará generalizar los resultados y otra a la que se llama población accesible. Esta es en realidad un subconjunto de la población objetivo; generalmente también numerosa; aunque evidentemente menos que la población objetivo.

La Población: Ahora bien, para nuestro caso, la población de estudio estará en el Distrito de Cochaccasa.

Muestra: Será la unidad minera Julcani en la quebrada Acchilla donde se encuentra la presa de relave minero N°9.

Muestreo: Será la presa de relave minero N°9.

3.7. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

3.7.1. Técnicas de recolección de datos

Según Gonzales et al. (2011), la observación es una técnica que consiste en observar atentamente el fenómeno, hecho o caso, tomar información y registrarla para su posterior análisis. Dentro de la cual está la observación científica que consiste en observar con un objetivo claro, definido y preciso.

Técnicas: Las técnicas a usar en la presente investigación serán instrumentación, Observación directa - estructurada.

Los instrumentos: Los instrumentos a usar en la presente investigación serán equipos de prospección geotécnica que estarán instalados en diferentes puntos del área de estudio.

3.8. Procedimiento de Recolección de Datos.

Según Gago ⁽³⁶⁾ el fichaje es una técnica auxiliar de todas las demás técnicas empleada en investigación científica; consiste en registrar los datos que se van obteniendo en los instrumentos llamados fichas, las cuales, debidamente elaboradas y ordenadas contienen la mayor parte de la información que se recopila en una investigación por lo cual constituye un valioso auxiliar en esa tarea, al ahorra mucho tiempo, espacio y dinero. La observación de campo es el recurso principal de la observación descriptiva; se realiza en los lugares donde ocurren los hechos o fenómenos investigados. Por lo tanto para la presente investigación para la recolección de datos se hará uso de la observación de campo conjuntamente con el uso de fichas para registrar datos de campo.

3.9. Técnicas y procesamiento de análisis de datos

Según Gago ⁽³⁶⁾ el Marco de referencia de un estudio estadístico conlleva:

- Definir la unidad de observación (elemento sobre el que vamos a registrar los datos). Las unidades de observación pueden tener existencia natural, como una persona o una cosa –elementos tangibles–, o pueden estar definidas artificialmente, como las distintas áreas de una empresa.
- Determinar qué vamos a medir (lo que vamos a observar).

Definir si el relevamiento de datos se hace sobre la totalidad (población) o sobre una muestra. Si el análisis se realiza en base a una muestra, el objetivo es obtener conclusiones acerca de la población. Por lo tanto, la muestra debe ser representativa de la población de la cual fue extraída.

El estadígrafo de la Prueba de la razón t. cuyo objeto es determinar la existencia de la hipótesis nula o la hipótesis de investigación se calculará la razón t. Por lo para la presente investigación se hará uso de un análisis cuantitativo. Para el tratamiento de datos se dispondrá del siguiente software:

- Para el tratamiento previo de datos se usara Microsoft office Excel

- Para el tratamiento de la topografía se hará uso de software especializado como Autodesk Civil 3D, ArcGis v.10.3.
- Para el análisis y modelamiento de la presa de relave se usara SLID

CAPÍTULO IV

PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

4.1. Tipo de presas de relave Acchilla N°09

La presa de tierra está en funcionamiento desde el año 1953 con la iniciación de la explotación de la minera buenaventura de la unidad de julcani, está construido de acuerdo con las técnicas usuales de presa para retención de agua, con la única excepción que los taludes aguas arriba no están adecuados para experimentar el vaciado rápido. Las presas de este tipo son construidas hasta su altura final, antes de que empiece la descarga de la deposición de los relaves

4.1.1. presa de relave Acchilla N°09 construido con el método aguas arriba.

Para la construcción de la presa acchilla los diques son necesarios volúmenes mínimos que se rellenó colocado mecánicamente, y de esta forma pueden ser construidas grandes alturas de presas a muy bajo costo. Con frecuencia las arenas de relaves de la playa constituyen un conveniente recurso de relleno para los diques perimetrales, excavando y colocando el material con bulldozer. El uso del Método Aguas Arriba sin embargo es limitado a condiciones específicas, por factores que incluyen el control de nivel freático, capacidad de depósito del agua y la susceptibilidad a la licuefacción sísmica. Sabemos que la ubicación del nivel freático es un elemento crítico en la determinación de la estabilidad del relleno.



Figura 16. Muestra el relave minero construido aguas arriba.

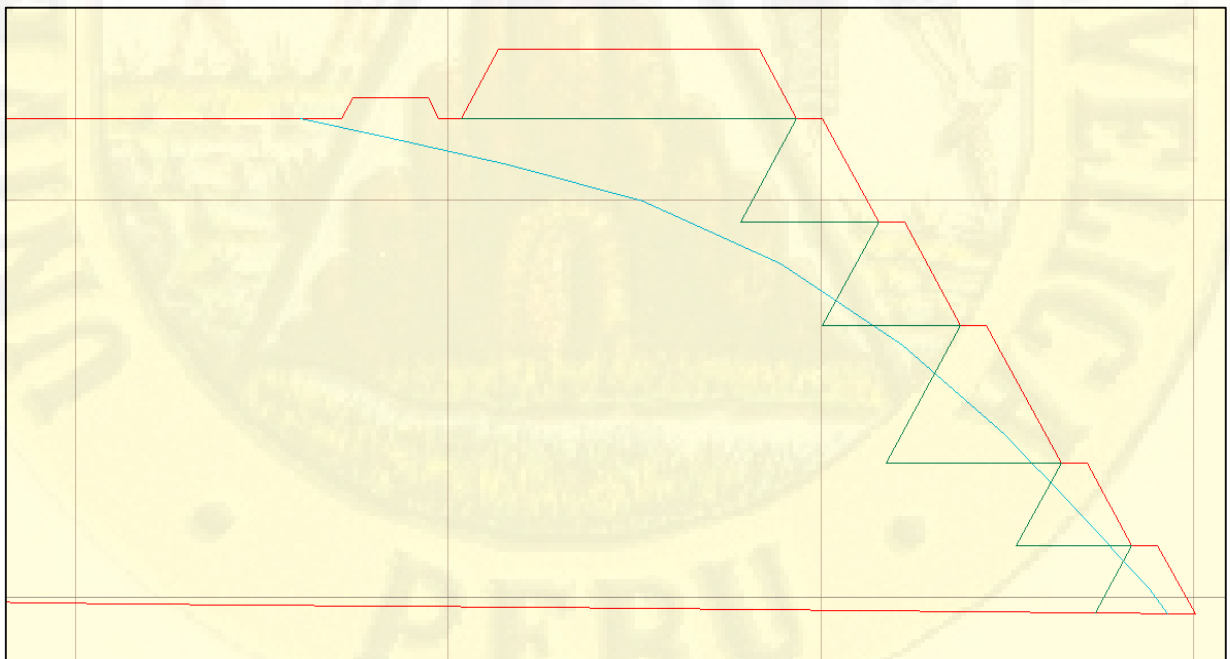


Figura 17. Muestra la sección el cual se viene construyendo más diques aguas arriba

Ancho de corona	8 m.
Talud de aguas Arriba	1.5H : 1 V
Talud de aguas Abajo	1.5H : 1 V
Longitud de corona	300 m.
Cota de corona del dique	4114 msnm
Borde libre	1m
Altura del dique de contención	1.50 m.
Altura total del dique	70 m

Tabla 7: parámetros operativos del depósito de relave

Por otra parte, la baja densidad relativa y generalmente alta saturación que ofrecen estos depósitos, pueden originar la licuefacción de los relaves, con desastrosas consecuencias; por lo que se concluye que el método Aguas Arriba es claramente inapropiado en áreas de regular riesgo sísmico. Finalmente, si bien el rango de crecimiento, de la presa está determinado por el rango de producción de flujo de relaves de la mina y las condiciones topográficas del vaso.

4.1.2. Topografía

Se realizó el levantamiento fotogramétrico de alta precisión. El principal factor (Actis, 2000) a considerar en la ubicación del sitio, unido al área o volumen requerido para el almacenamiento durante toda la vida útil de la operación minera, es la topografía, en base a la que se fija el lugar adecuado a estudiar. Generalmente es útil o beneficioso ubicar las presas de desechos en una elevación más baja a la que se encuentra el concentrado para que el transporte resulte de menor costo. La topografía también determina la geometría de las presas y los métodos constructivos. Las formaciones geológicas y morfológicas o topográficas juegan un papel vital en la elección del sitio de ubicación. Las formas de escurrimiento superficial, deben ser dejadas sin perturbar, de ser posible. Otras veces, el drenaje superficial debe ser redirigido de forma que pueda retomar su curso, agua abajo de la presa. Esto es ventajoso si se considera una posible falla de la presa debido a una excesiva afluencia al embalse o después de la época de producción, al abandonar de la obra. La topografía puede fijar el sistema de evacuación de

los efluentes, ya sean drenes, zanjias, cunetas, torres o bombas portátiles, que debe ser instalado para remover los efluentes. La formación geológica, debajo de la cubeta propuesta, puede imponer el empleo de un sello del área de almacenamiento para eliminar la excesiva pérdida de fluido o para impedir que líquidos contaminantes lleguen a la capa freática. Para evitar filtraciones se emplean telas de PVC en todo el fondo del lago, aunque es un sistema de alto costo. Para la selección del lugar del depósito son muy útiles las fotografías aéreas y las cartas topográficas, como así también los levantamientos realizados por restitución aerofotogrametría

4.1.3. Levantamiento topográfico de la presa de relave N° 9 Acchilla

Para la determinación de la topografía del lugar se realizó el levantamiento topográfico de la presa de relave N° 9 Acchilla mediante qué equipo dron, esto con el fin de poder determinar la mayor cantidad de precisión y detalle del relieve del terreno.

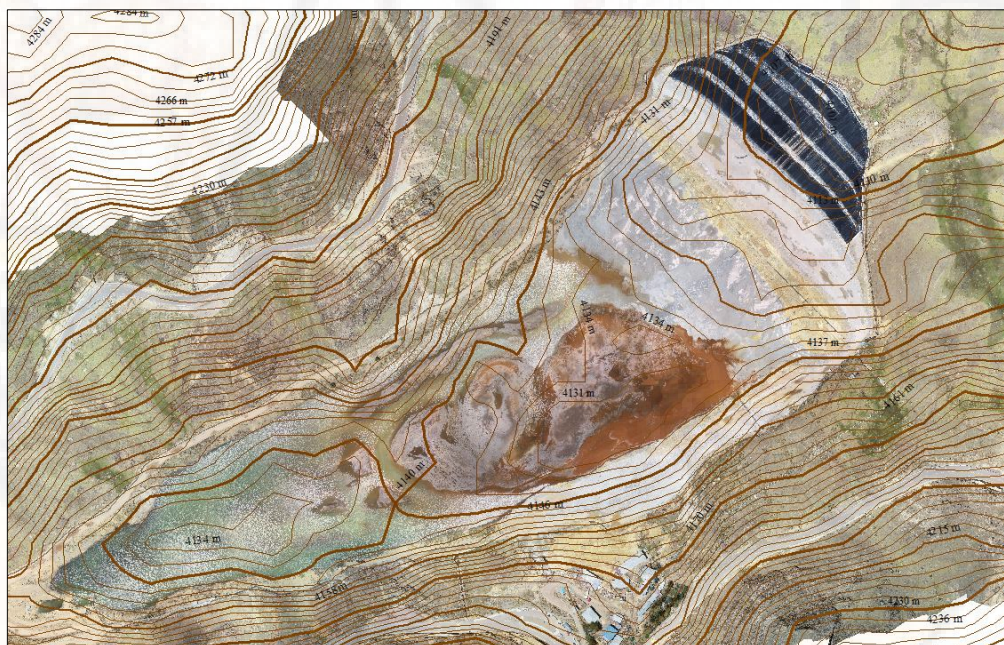


Figura 18. Vista en planta de la topografía de la zona de estudio (elaboracion propia)

De manera similar se obtenido a una vista en elevación de la presa de relave:



Figura 19. Vista en elevación de la presa de relave

4.1.4. Topografía - ortofoto

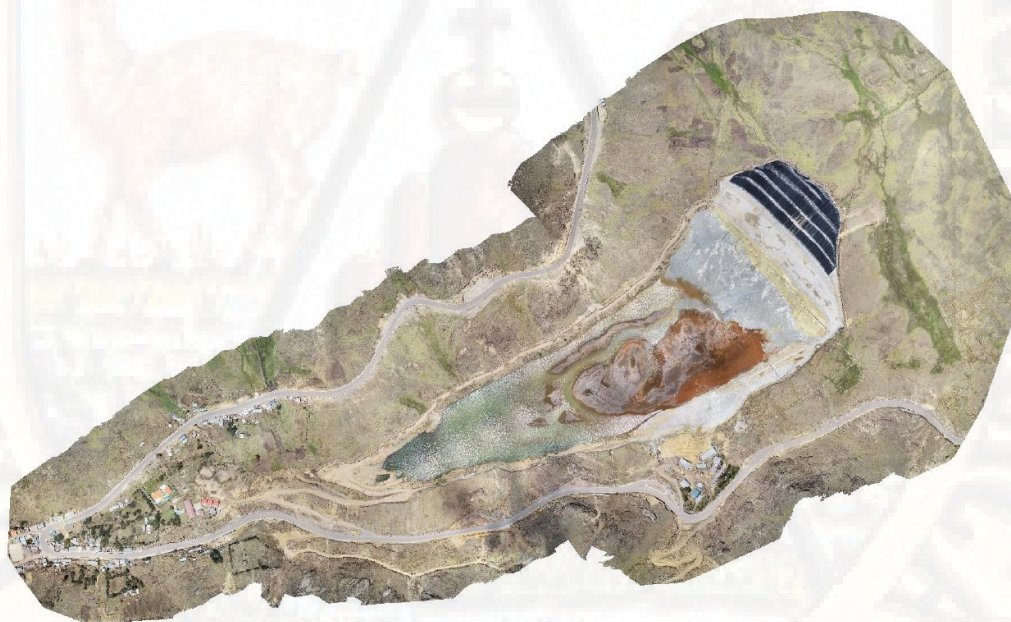


Figura 20. Ortomosaico

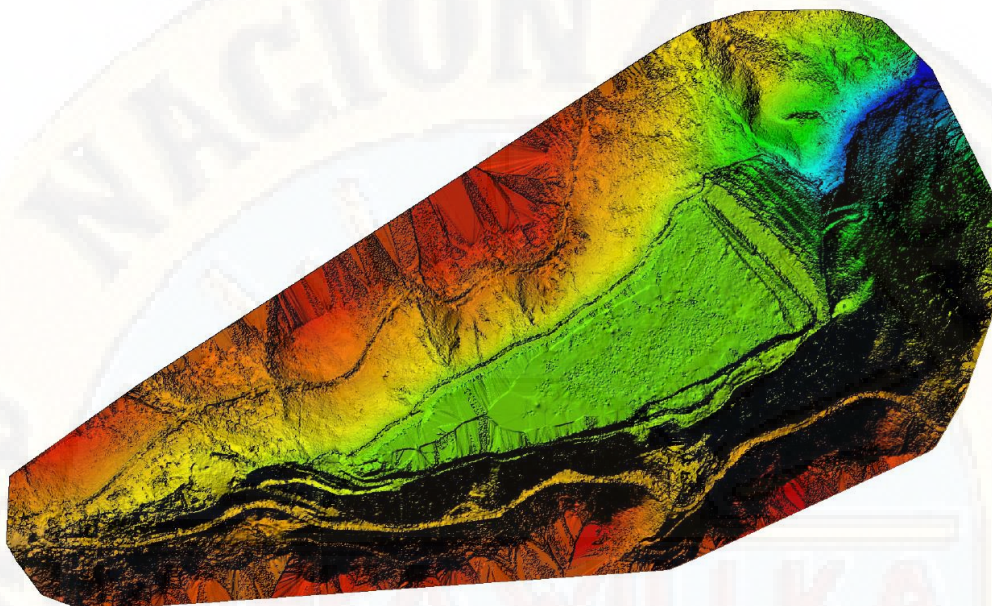


Figura 21: modelo de superficie digital (DSM) disperso correspondiente antes de la densificación.

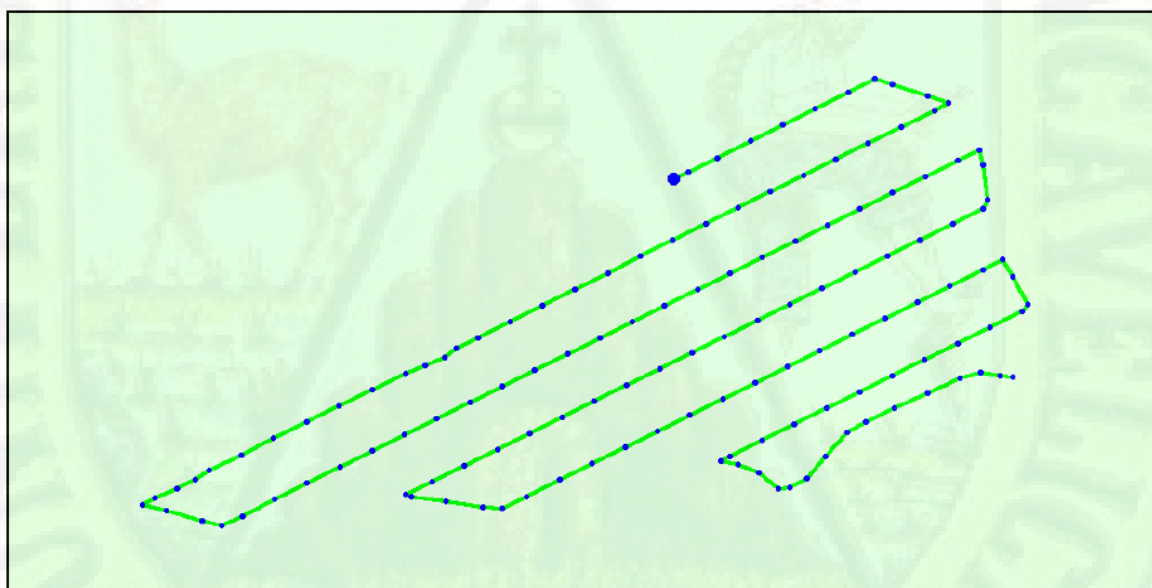


Figura 22: Vista superior de la posición inicial de la imagen. La línea verde sigue la posición de las imágenes en el tiempo a partir del punto azul grande.

4.1.5. Imagen calculada / GCP / Posiciones de puntos de enlace manuales

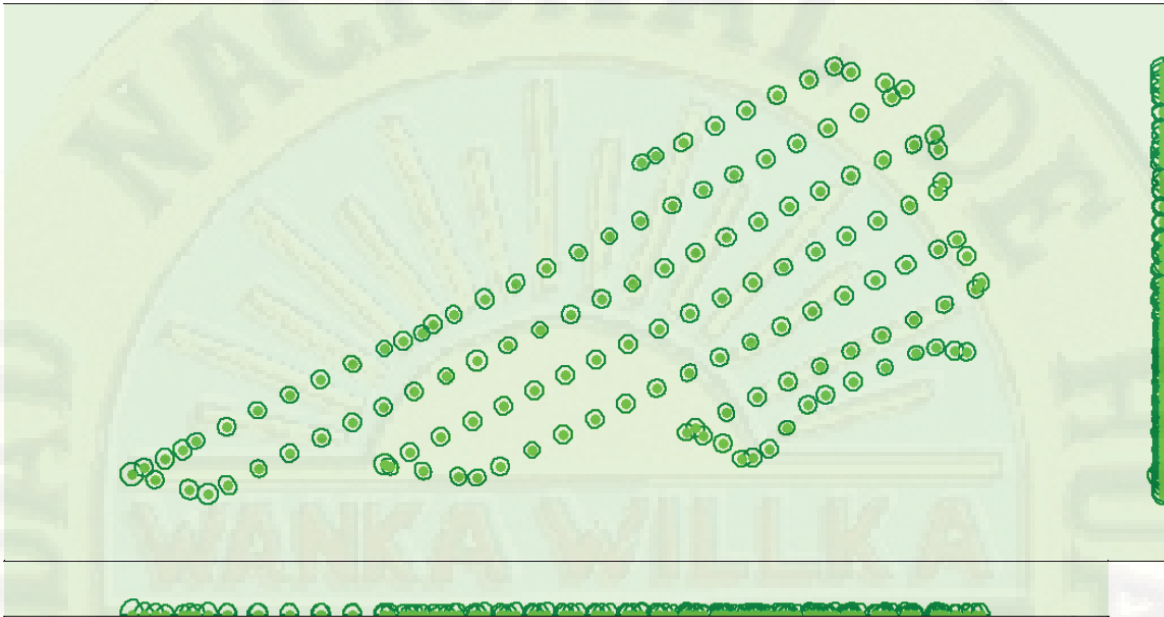


Figura 23: Desplazamiento entre las posiciones de imagen inicial (puntos azules) y calculadas (puntos verdes), así como el desplazamiento entre las posiciones iniciales de GCP (cruces azules) y sus posiciones calculadas (cruces verdes) en la vista superior (plano XY), vista frontal (plano XZ) y vista lateral (plano YZ). Las elipses de color verde oscuro indican lo absoluto incertidumbre de posición del resultado del ajuste del bloque de paquete.

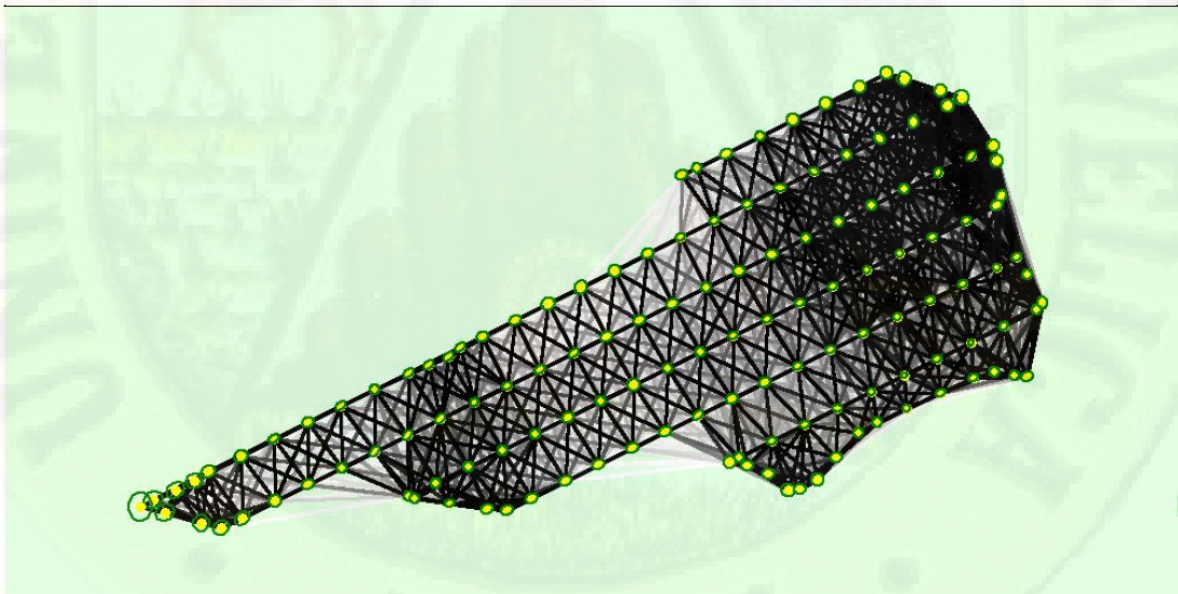


Figura 24 : Posiciones de imágenes calculadas con enlaces entre imágenes coincidentes. La oscuridad de los enlaces indica el número de puntos clave 2D coincidentes entre imágenes. Los enlaces brillantes indican enlaces débiles y requieren puntos de enlace manuales o más imágenes. Las elipses de color verde oscuro indican la incertidumbre relativa de la posición de la cámara resultado de ajuste de bloque de paquete.

4.1.6. Estudios Hidrológicos de la presa acchilla

Empleando el método del SCS, se estableció el modelo basado en un Hidrograma unitario promedio determinado por la precipitación máxima de 24 horas, pendiente y longitud del cauce principal y un valor de CN=69 que representa las condiciones del tipo de suelo y de cobertura vegetal de la cuenta. En base a dicha información se determinaron los caudales máximos instantáneos en el punto de captación para diferentes periodos de retorno. Las precipitaciones máximas en 24 horas fueron determinadas en base a los datos de la estación meteorológica Choclococha para diversos periodos de retorno, los cuales se muestran en el siguiente Cuadro.

Periodo de Retorno en años	Periodo de Retorno en años
5	54.50
10	62.11
25	71.35
50	78.03
100	84.55
200	90.98
500	99.41
1000	105.77

Tabla 8: Precipitación máxima esperada para diferentes periodos de retorno

4.1.7. Estudios Climatológicos

La climatología juega un papel importante en la elección del sitio y diseño final de la presa de relave. Los principales factores a ser considerados son los siguientes:

- Régimen de lluvias.
- Evaporación
- Temperaturas de congelación
- Duración de la estación invernal

➤ Vientos

Cuando los inviernos son largos y fríos, con muchas heladas y considerables nevadas, la construcción del dique es usualmente restringida a los meses de verano. Ello es debido a que el congelamiento del agua genera problemas importantes en el avance constructivo pues el hielo impide el drenaje de las aguas y la compactación se ve dificultada. Es de gran utilidad el conocimiento de la historia de las precipitaciones pluviales de la zona como así también de los escurrimientos superficiales, para tenerlos en cuenta e incluirlos en el cálculo de los efluentes de la presa de cola. Este conocimiento implica tener determinadas las precipitaciones máximas por día y por hora en un período razonable de años, generalmente no menor de 50. Los datos climatológicos son obtenidos generalmente de los servicios meteorológicos gubernamentales o privados o por mediciones en el lugar.

4.1.8. Estudios Geotécnicos Para La Fundación De La Presa

Para el diseño de la fundación de la presa se debe tener en cuenta:

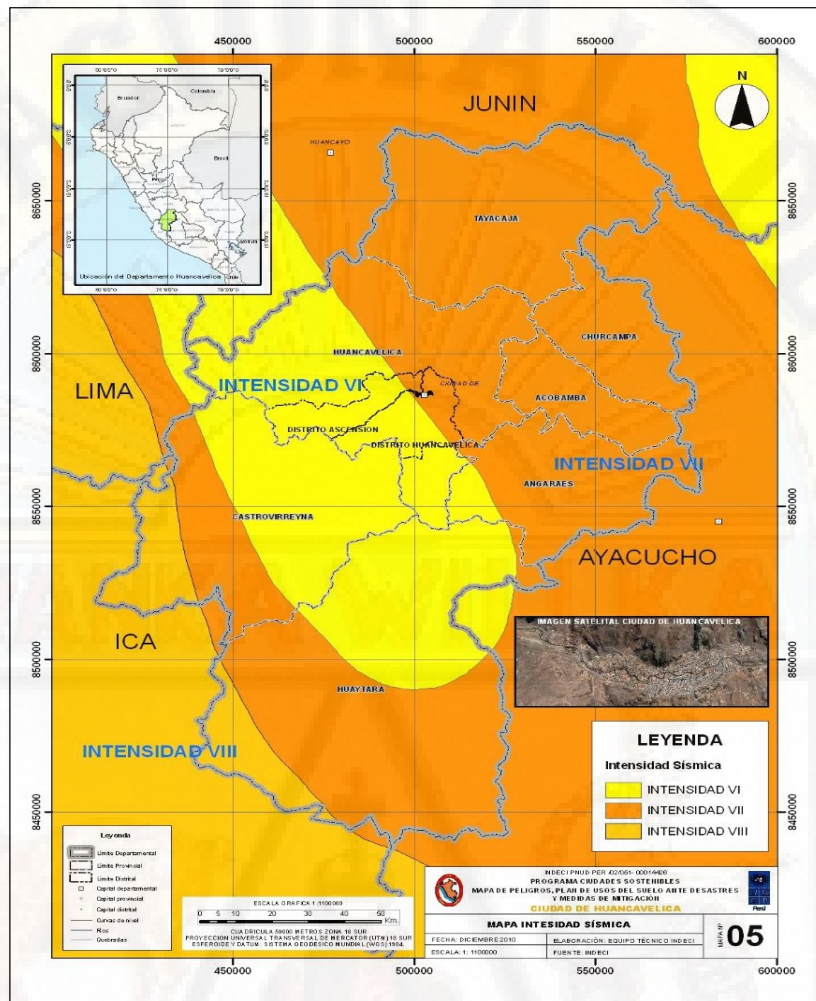
- Investigación de la fundación, Las investigaciones de las condiciones de fundación que se realizan para implantar una presa de desechos mineros son iguales a la que se realizan para una presa clásica. Las investigaciones de fundación usualmente incluyen ingeniería de mecánica de suelos e investigaciones geológicas tales como, exploraciones subsuperficiales, ensayos de laboratorio para conocer las características ingenieriles o calidad de los suelos y rocas de la fundación, permeabilidad, densidad, compresibilidad y resistencia al corte. Las investigaciones geológicas incluyen la preparación de un mapa superficial de los depósitos o rocas superficiales y cortes basados en el reconocimiento del área, como así también del estudio de fotografías aéreas estudiadas por el ingeniero o el geólogo. Se deberá hacer una evaluación del riesgo sísmico de la zona. Deberán estudiarse también las posibilidades de deslizamientos a producirse en la futura obra. Se estudiarán las fallas existentes y las zonas de rocas débiles y de las permeables.

➤ Ensayos de laboratorio, Las investigaciones de laboratorio de los materiales del lugar nos darán las características de los suelos y rocas de fundación que soportará la presa de desechos, como así también de los materiales elegidos, preferentemente en los alrededores (materiales de préstamos), para emplear en la construcción de las presas iniciales. La clase de investigaciones a realizar será determinada por un ingeniero en suelos, así como la extracción de muestras representativas y la realización de los ensayos apropiados. Para muestras no disturbadas generalmente se realiza las siguientes determinaciones:

- ✓ Clasificación visual, límites de Atterberg y análisis mecánico de acuerdo con el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos.
- ✓ Ensayos de muestras representativas que incluyen compresión y compresión triaxial, para obtener datos de resistencia al corte de los suelos de fundación y de la humedad natural, para muestras saturadas y ensayos de consolidación y permeabilidad.

4.1.9. Estudios De Sismicidad

Para la identificación de datos referente a la intensidad sísmica del área de estudio, se tiene en cuenta el mapa de intensidad sísmica INDECI PNUD PER/02/051-00014426, donde se identifican los registros de intensidad sísmica de VI, VII y VIII ubicados indistintamente en el Departamento de Huancavelica, lo que significa que el área de estudio en su totalidad registra una intensidad Sísmica de VII, según Mora Vahrson este calificativo se encuentra en nivel de susceptibilidad sísmica medio con un valor ponderado de 05.



Mapa 25: Intensidad Sísmica en la Región de Huancavelica

4.2. FACTOR DE SEGURIDAD

A) ANÁLISIS ESTÁTICOS

Para el desarrollo del análisis estático se utilizó el método de Equilibrio Límite Plástico de Bishop, Ordinary Spencer y Jambu, en el que se considera no sólo el equilibrio normal y tangencial (equilibrio de fuerzas) sino también el equilibrio de momentos para cada rebanada del análisis, lo cual hace este método más confiable pues se acerca más a la realidad. Por otra parte, también se empleó el método de elementos

finitos el cual divide la masa del suelo en unidades discretas, de esta manera se optimen datos más aproximados a la realidad.

A continuación, se presenta los factores de seguridad obtenidos en los sub sectores de Santa Bárbara.

METODOS	MÉTODO DE EQUILIBRIO LIMITE	ELEMENTOS FINITOS	CONCLUSIÓN
Método Ordinario (Fellenius)	1.61	1.61	ESTABLE
Método de Bishop Simplificado	1.661	1.661	ESTABLE
Método de Janbu Simplificado	1.59	1.59	ESTABLE
Método de Janbu Corregido	1.66	1.66	ESTABLE
Método de Spencer	1.55	1.55	ESTABLE
Método de Lowe-Karafiath	1.66	1.66	ESTABLE
Método del Equilibrio Limite Global (Morgenstern-Price)	1.55	1.55	ESTABLE

Tabla 9: Factor de Seguridad de los análisis estáticos

Partiendo de la premisa que un talud es inestable si su FS es menor que uno la Tabla 19 al tener un factor de seguridad menor a 1.

B) ANÁLISIS PSEUDO ESTÁTICOS

METODOS	MÉTODO PSEUDO ESTATICO	ELEMENTOS FINITOS	CONCLUSIÓN
Método Ordinario (Fellenius)	1.45	1.45	ESTABLE
Método de Bishop Simplificado	1.49	1.49	ESTABLE
Método de Janbu Simplificado	1.43	1.43	ESTABLE
Método de Janbu Corregido	1.49	1.49	ESTABLE
Método de Spencer	1.40	1.40	ESTABLE
Método de Lowe-Karafiath	1.49	1.49	ESTABLE
Método del Equilibrio Limite Global (Morgenstern-Price)	1.40	1.40	ESTABLE

Tabla 10: Factor de Seguridad de los análisis pseudo estáticos

C) ANÁLISIS PSEUDO DINAMICO

METODOS	MÉTODO PSEUDO DINAMICO	ELEMENTOS FINITOS	CONCLUSIÓN
Método Ordinario (Fellenius)	1.28	1.28	ESTABLE
Método de Bishop Simplificado	1.32	1.32	ESTABLE
Método de Janbu Simplificado	1.27	1.27	ESTABLE
Método de Janbu Corregido	1.32	1.32	ESTABLE
Método de Spencer	1.24	1.24	ESTABLE
Método de Lowe-Karafiath	1.32	1.32	ESTABLE
Método del Equilibrio Limite Global (Morgenstern-Price)	1.24	1.24	ESTABLE

Tabla 11: Factor de Seguridad de los análisis pseudo dinamico.

D) ANÁLISIS DINÁMICO

METODOS	MÉTODO DINAMICO	ELEMENTOS FINITOS	CONCLUSIÓN
Método Ordinario (Fellenius)	1.12	1.12	INESTABLE
Método de Bishop Simplificado	1.16	1.16	INESTABLE
Método de Janbu Simplificado	1.11	1.11	INESTABLE
Método de Janbu Corregido	1.16	1.16	INESTABLE
Método de Spencer	1.09	1.09	INESTABLE
Método de Lowe-Karafiath	1.16	1.16	INESTABLE
Método del Equilibrio Limite Global (Morgenstern-Price)	1.09	1.09	INESTABLE

Tabla 12: Factor de Seguridad de los análisis dinamico

Para el desarrollo del análisis dinámico se ha tomado en consideración la combinación de la acción de las cargas sísmicas y la

disminución de la resistencia que produce una disminución o aumento en la estabilidad del talud.

Para efectuar el análisis dinámico de la estabilidad de taludes se optó por incluir el sismo del 20 de octubre del 2006 el cual fue registrada por la Pontificia Universidad Católica del Perú cuyos registros se nos facilitaron para la realización de la presente tesis, Los gráficos y datos de los registros de aceleraciones se pueden encontrar en los anexos.

Tabla 13 : Datos de los eventos sísmicos para los análisis dinámicos

FECHA DE SISMO	LUGAR	MAGNITUD	DURACION APROX (s)	ACELERACION PICO E-W(g)	ACELERACION PICO N-S(g)	ACELERACION PICO U-D(g)
20 de Octubre de 2006	Pisco	6.7*	42.1	0.015**	0.021**	0.014

* **Mw = Magnitud de momento**

**** En el caso del sismo del 2006, la dirección E-W se refiera al registro transversal y la N-S al longitudinal**

Para el presente análisis se asumirá que los patrones del sismo del 20 de octubre de 2006 se replica en la ciudad de Huancavelica, ya que en la ciudad de Huancavelica no existe registros sísmicos.

A continuación, se presentan las gráficas de la variación del factor de seguridad para las superficies de falla consideradas críticas y para las secciones analizadas, bajo el efecto de las componentes horizontal y vertical del sismo

Grafico 1 : Resultados de Factor de Seguridad vs. Tiempo, bajo el efecto del sismo del 20 de octubre de 2006

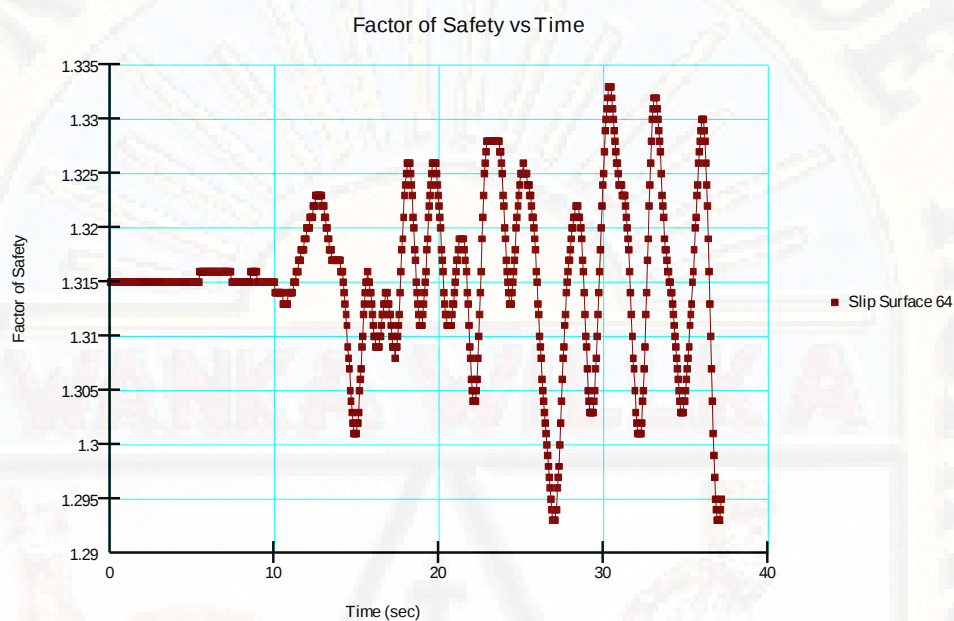


Grafico 2 : Resultados de Factor de Seguridad vs. Tiempo , bajo el efecto del sismo del 20 de octubre de 2006

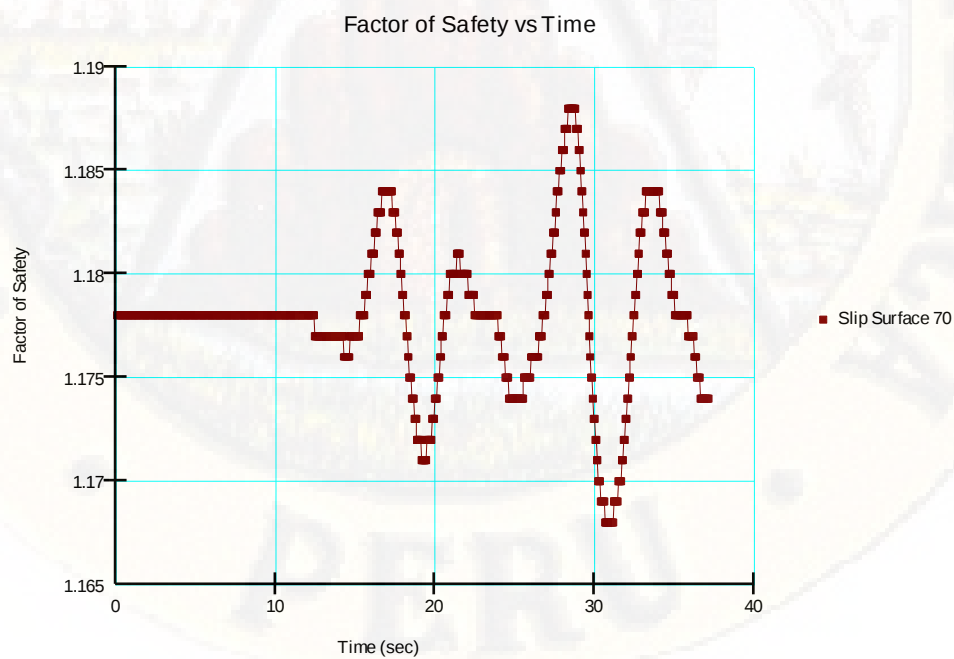


Grafico 3 : Resultados de Factor de Seguridad vs. Tiempo , bajo el efecto del sismo del 20 de octubre de 2006

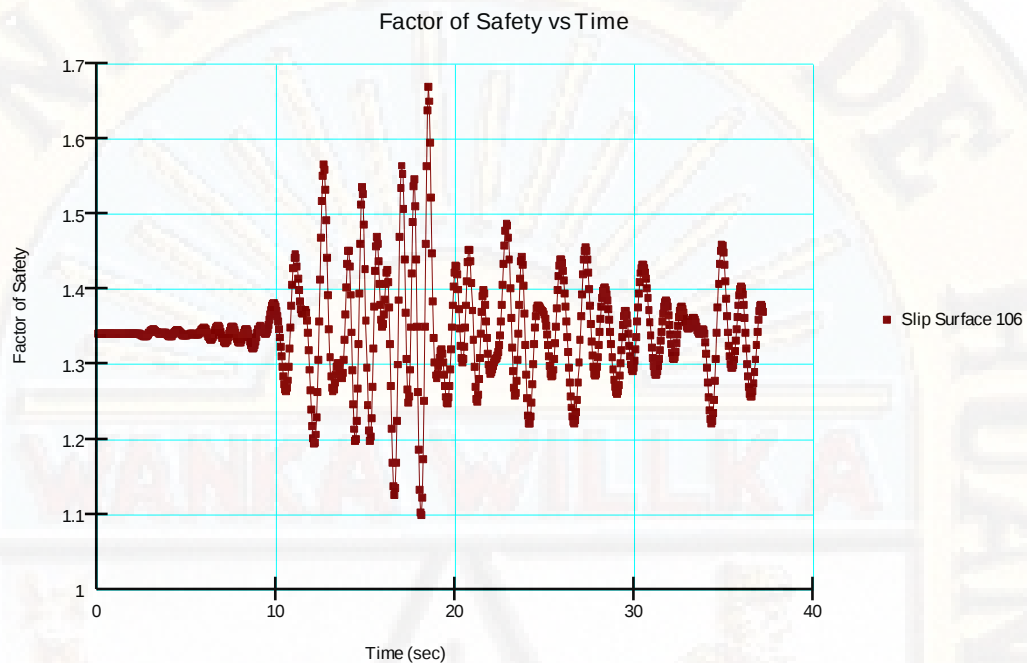


Grafico 4 : Resultados de Factor de Seguridad vs. Tiempo, bajo el efecto del sismo del 20 de octubre de 2006

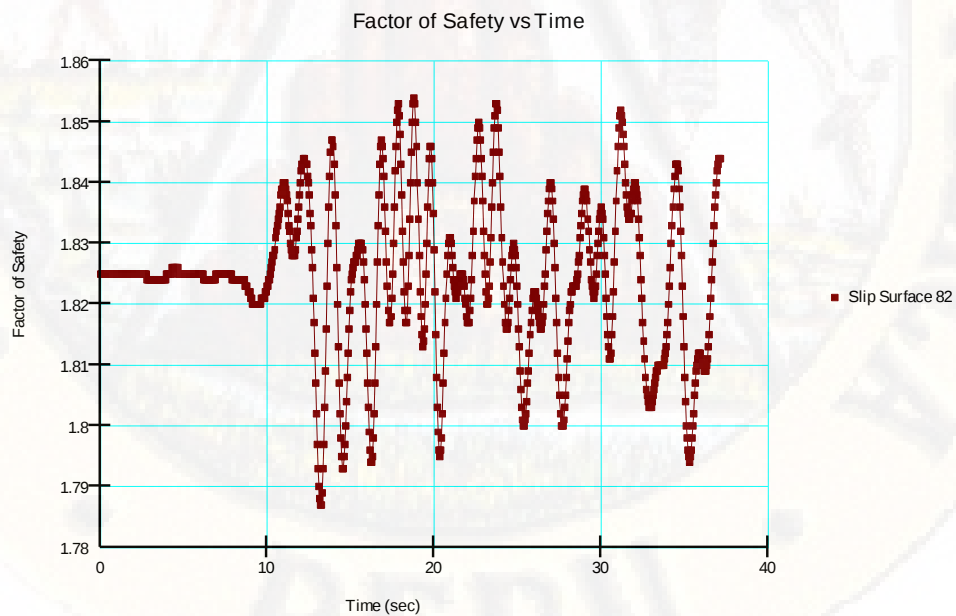


Grafico 5 : Resultados de Factor de Seguridad vs. Tiempo, bajo el efecto del sismo del 20 de octubre de 2006

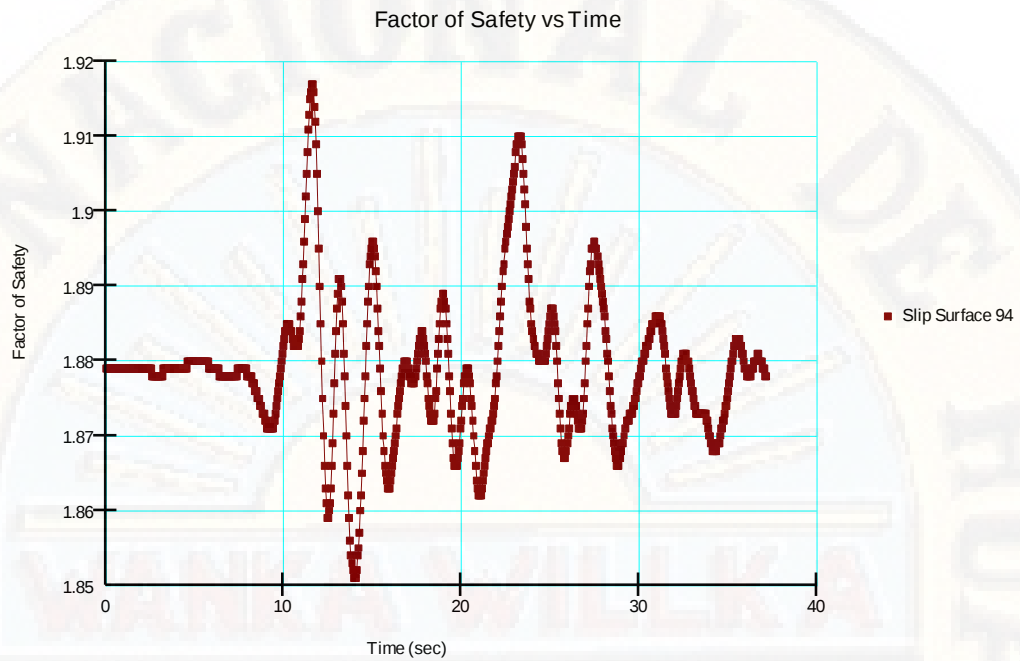
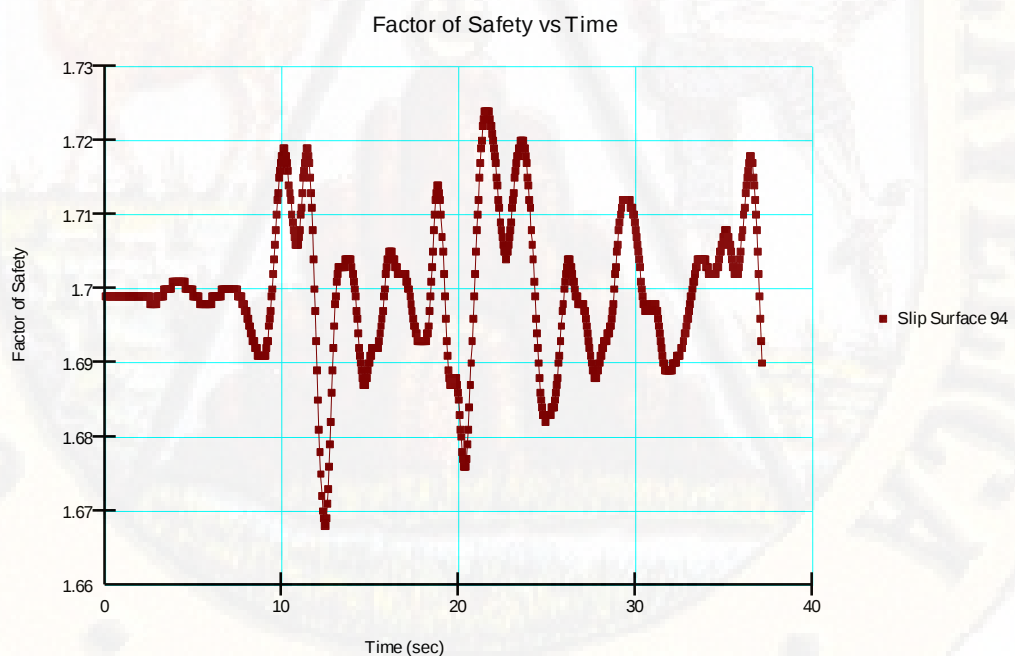


Grafico 6 : Resultados de Factor de Seguridad vs. Tiempo, bajo el efecto del sismo del 20 de octubre de 2006



De los gráficos mostrados podemos concluir que los Grafico 01, Grafico 04, Grafico 05, Grafico son estables esto a referencia que en ningún momento el factor de seguridad cae por debajo de 1.25 bajo un

sismo de magnitud de 6.7, por el contrario, los taludes de son inestables al presentar factores de seguridad por debajo de 1.25.

4.3. SISTEMA DE ESTABILIDAD PROPUESTO: ANÁLISIS DE LA PRESA DE RELAVE CON REFUERZO DE GEOMALLA

ANÁLISIS DE LA PRESA DE RELAVE CON REFUERZO DE GEOMALLA				
Método de análisis	FACTOR DE SEGURIDAD			
	Condición Estático	Condición Pseudo Estático	Condición pseudo Dinámico	Condición Dinámico
Método Ordinario (Fellenius)	1.82	1.73	1.55	1.37
Método de Bishop Simplificado	1.84	1.75	1.56	1.38
Método de Janbu Simplificado	1.74	1.65	1.48	1.31
Método de Janbu Corregido	1.83	1.74	1.56	1.37
Método de Spencer	1.72	1.63	1.46	1.29
Método de Lowe-Karafiath	1.85	1.76	1.57	1.39
Método del Equilibrio Limite Global (Morgenstern-Price)	1.74	1.65	1.48	1.31

Tabla 14: Factor de Seguridad de los análisis con refuerzo de geomalla

4.4. Análisis de información

4.4.1. Estudio geotécnico de las propiedades mecánicas del material

Del estudio geotécnico realizado se ha obtenido las siguientes propiedades necesarias para realizar el modelamiento de la estabilidad del talud, las cuales

son específicamente para la utilización del diseño, esta esta proporcionada un informe por la empresa JMF INGENIERIA & CONSTRUCCION con RUC: 20508908645 y El laboratorio de AUSENCO sede Perú con RUC:20102026471.

Material	γ_{total} (KN/m ³)	PARÁMETROS DE RESISTENCIA	
		Cohesión C [kPa]	Angulo de fricción ϕ [°]
Material relave	22	20	39
Material dique	17.5	30	26.5

4.4.2. Análisis de estabilidad pseudo-estatica y pseudo-dinamica

De las propiedades anteriormente calculadas, se ha procedido a calcular la estabilidad pseudo-estatica y pseudo-dinamica de la presa de relave, para tal motivo se ha identificado la siguiente sección de análisis:



Figura 26: Presa de relave N° 9 Acchilla, sección de análisis

En la vista de elevación se tiene:



Figura 27: Presa de relave N° 9 Acchilla, vista en elevación de la sección de análisis

Introducidos todos los parámetros necesarios al software, se ha obtenido los siguientes gráficos:

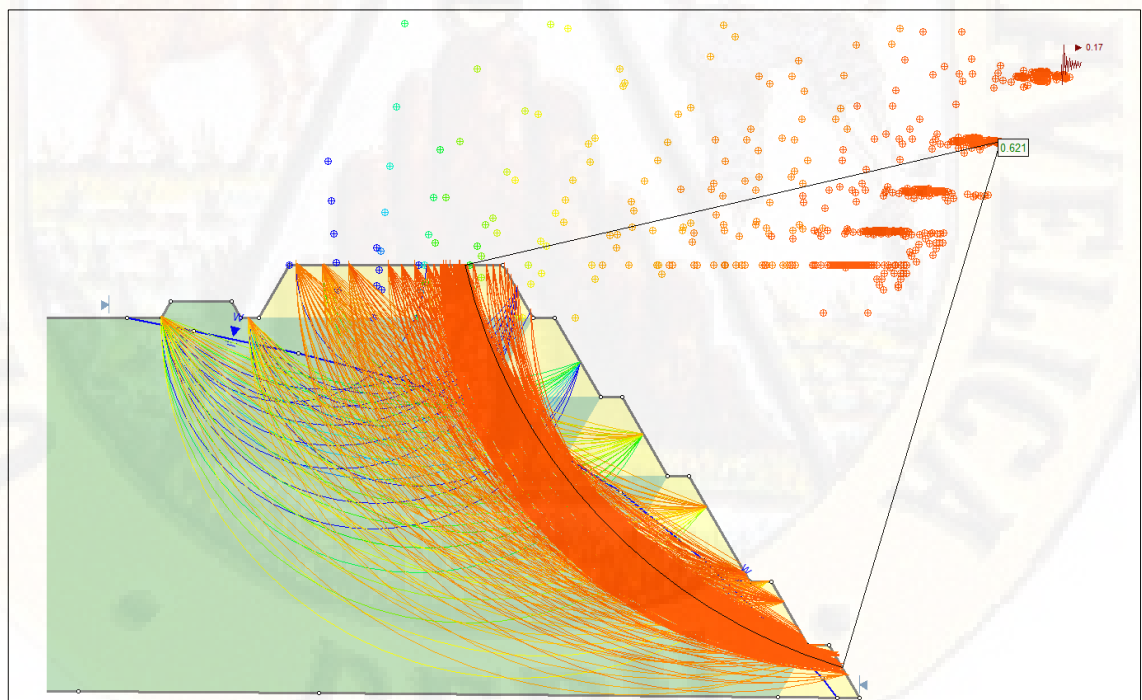


Figura 28: Superficies de falla potenciales según el método de Fellenius

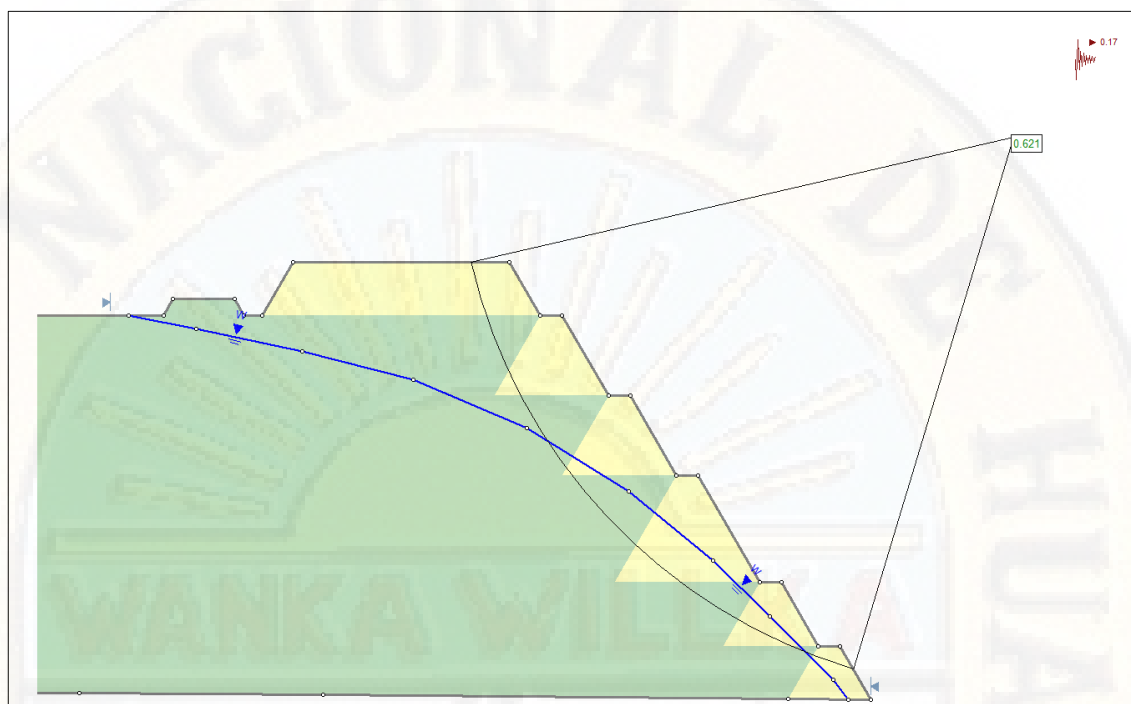


Figura 29: Superficie de falla crítica según el método de Fellenius, $FS = 0.621$

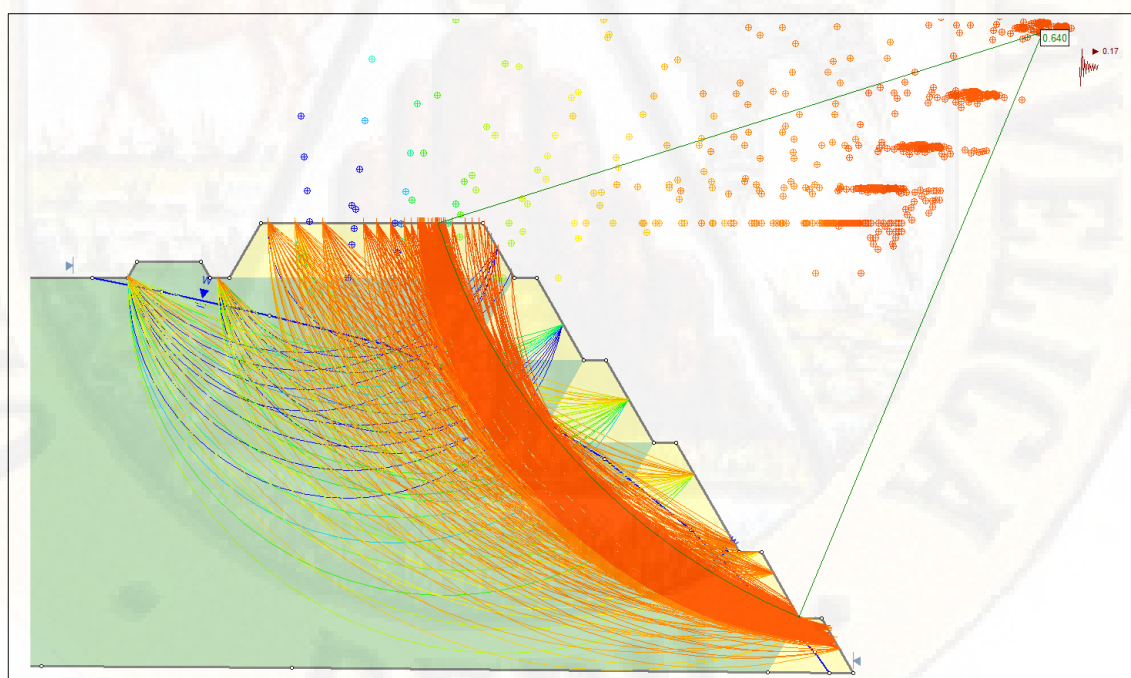


Figura 30: Superficies de falla potenciales según el método de Bishop Simplificado

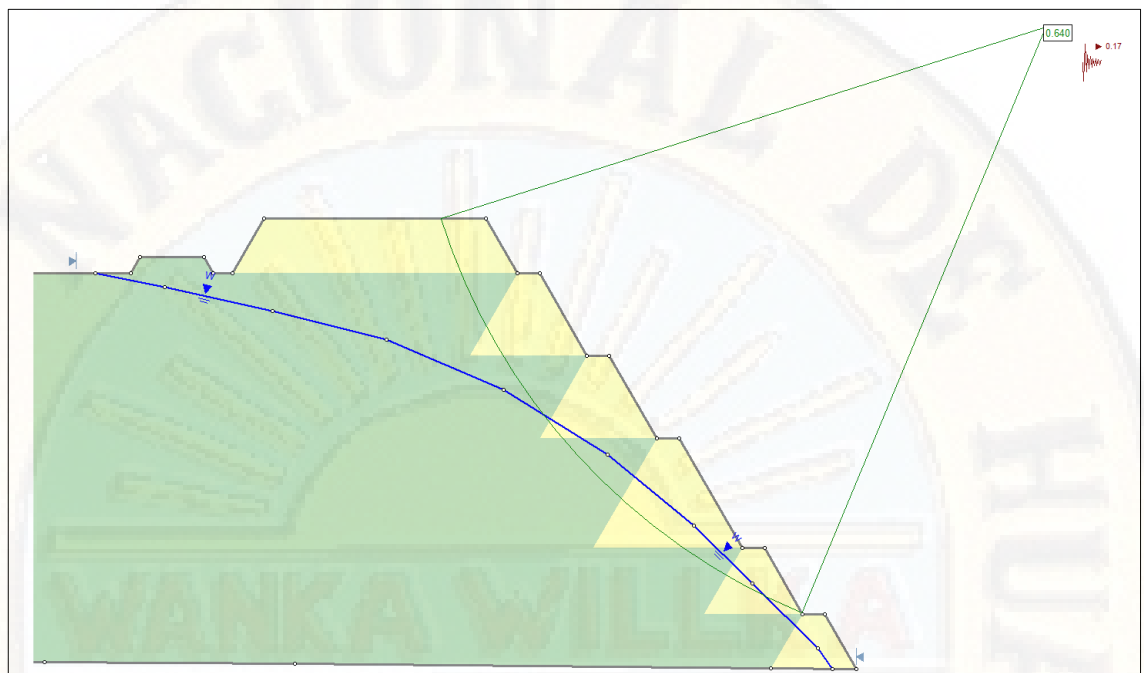


Figura 31: Superficie de falla crítica según el método de Bishop Simplificado, $FS = 0.640$

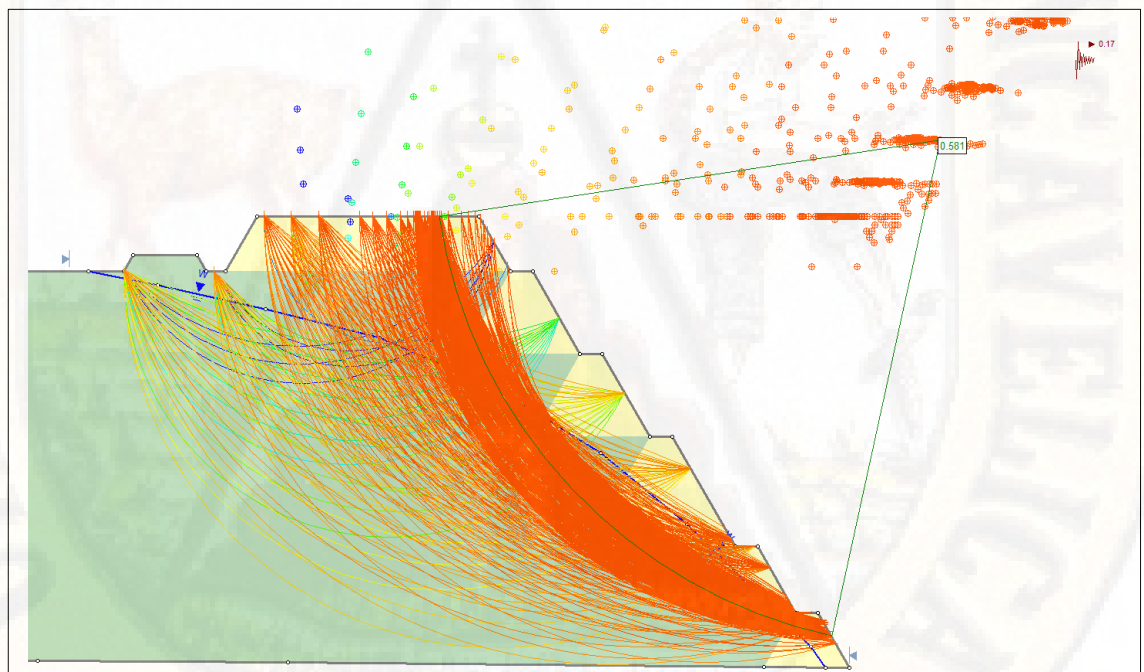


Figura 32: Superficies de falla potenciales según el método de Janbu simplificado

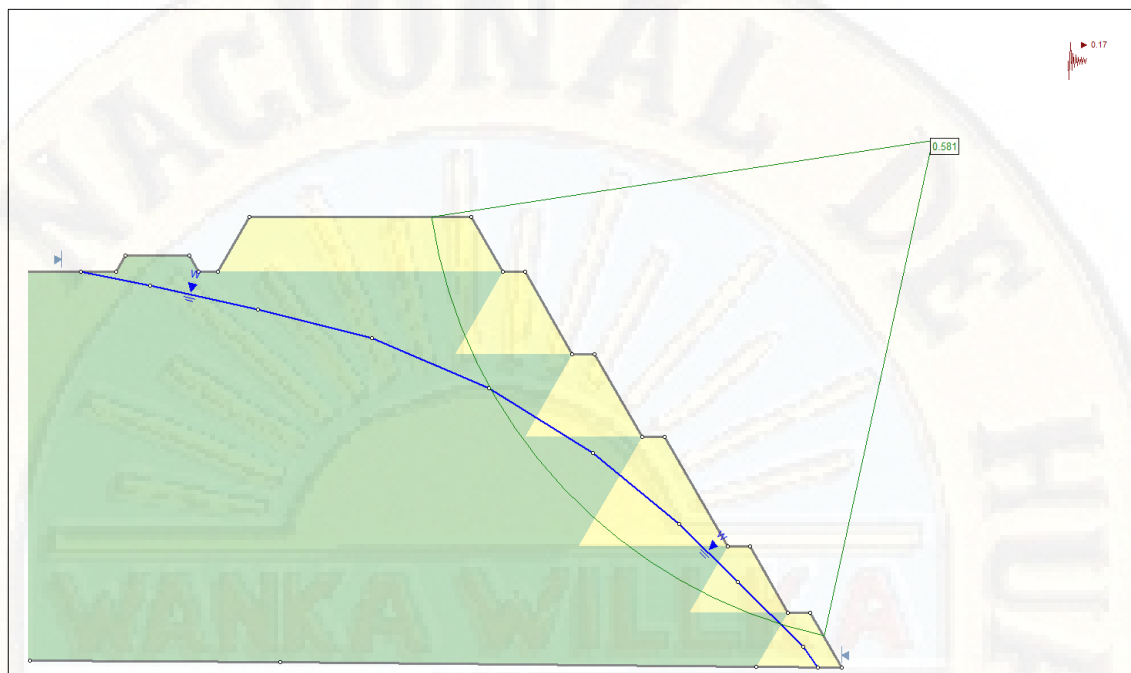


Figura 33: Superficie de falla critica según el método de Janbu simplificado, $FS = 0.581$

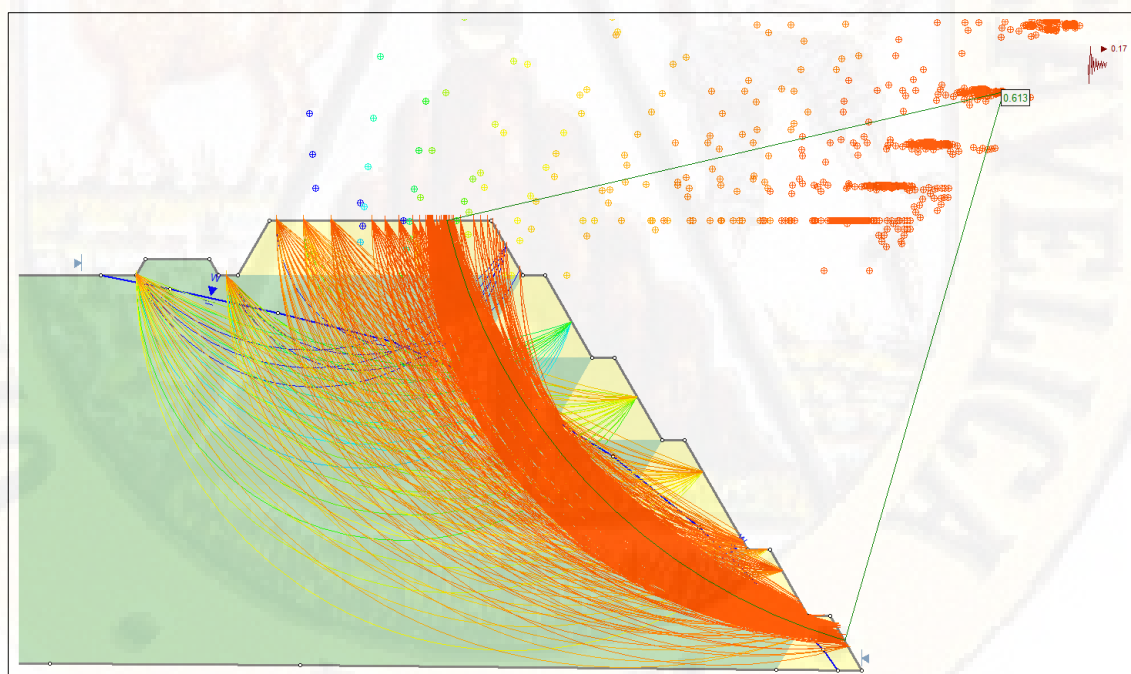


Figura 34: Superficies de falla potenciales según el método de Janbu

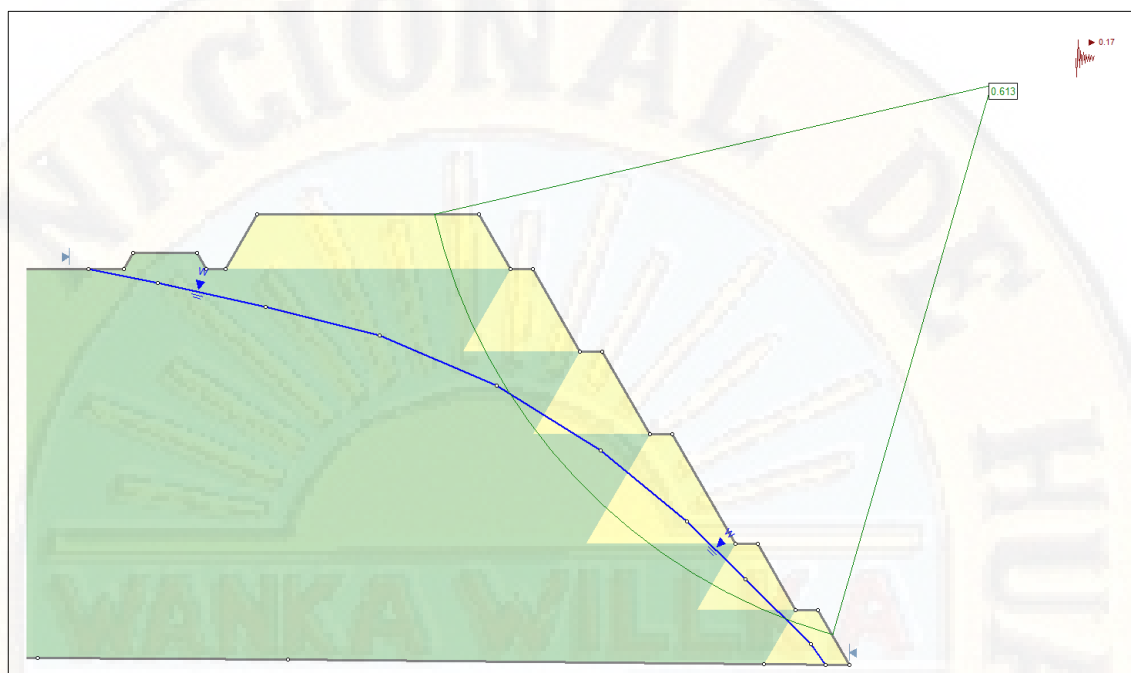


Figura 35: Superficie de falla crítica según el método de Janbu, $FS = 0.613$

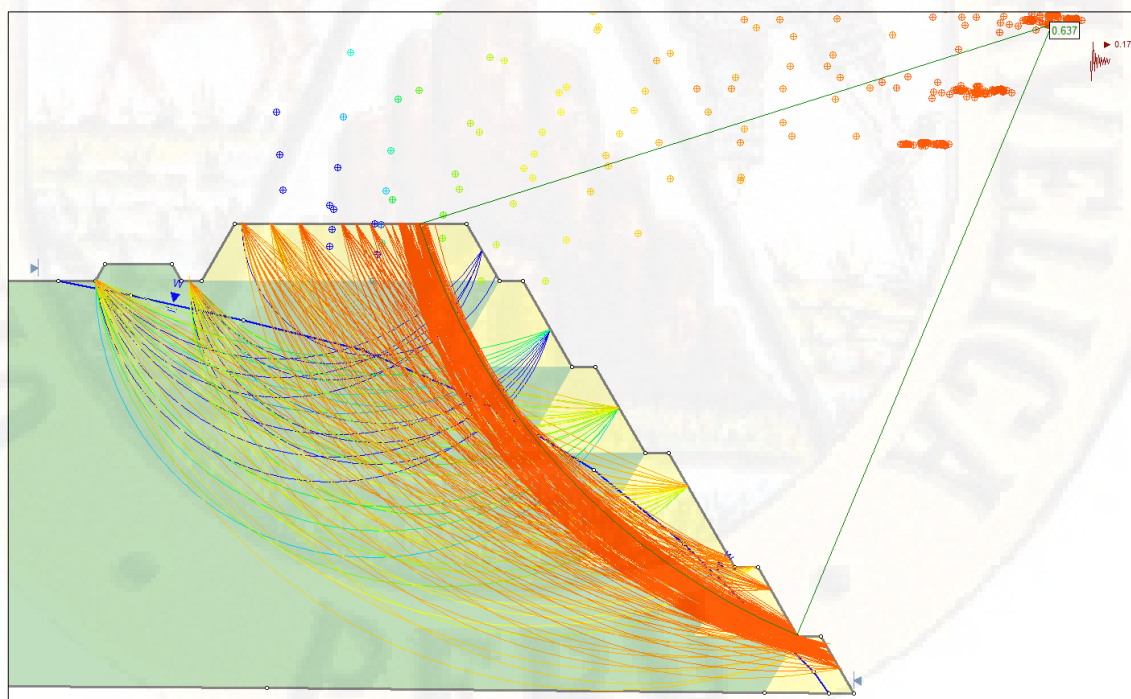


Figura 36: Superficies de falla potenciales según el método de Spencer

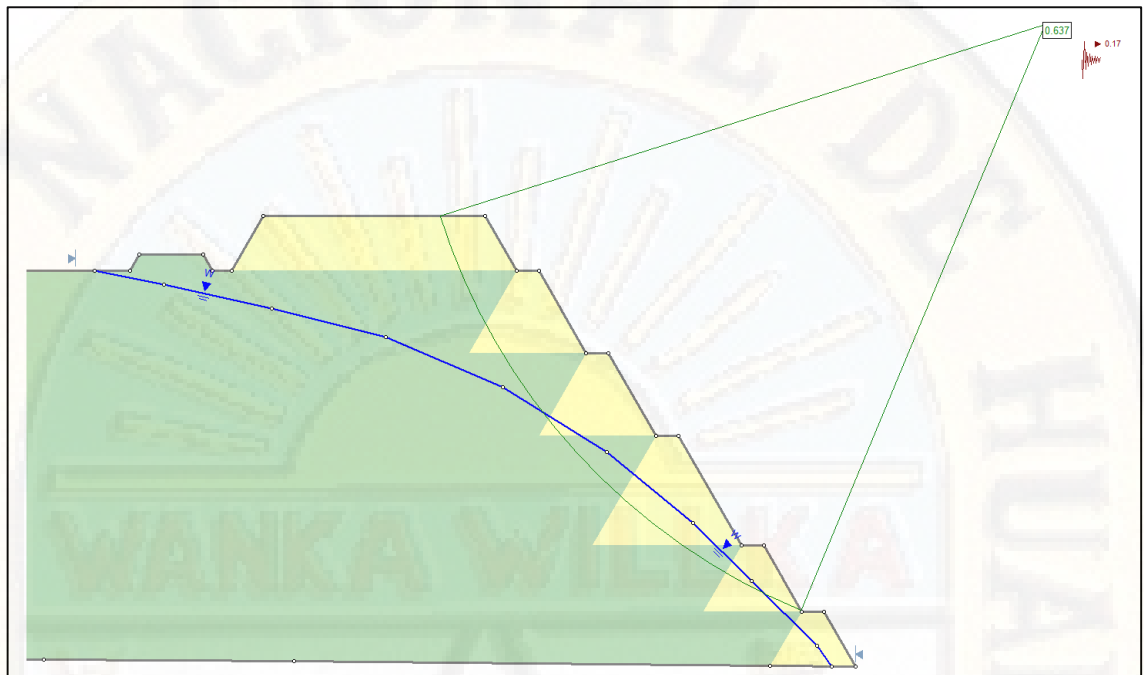


Figura 37: Superficie de falla crítica según el método de Spencer, $FS = 0.637$

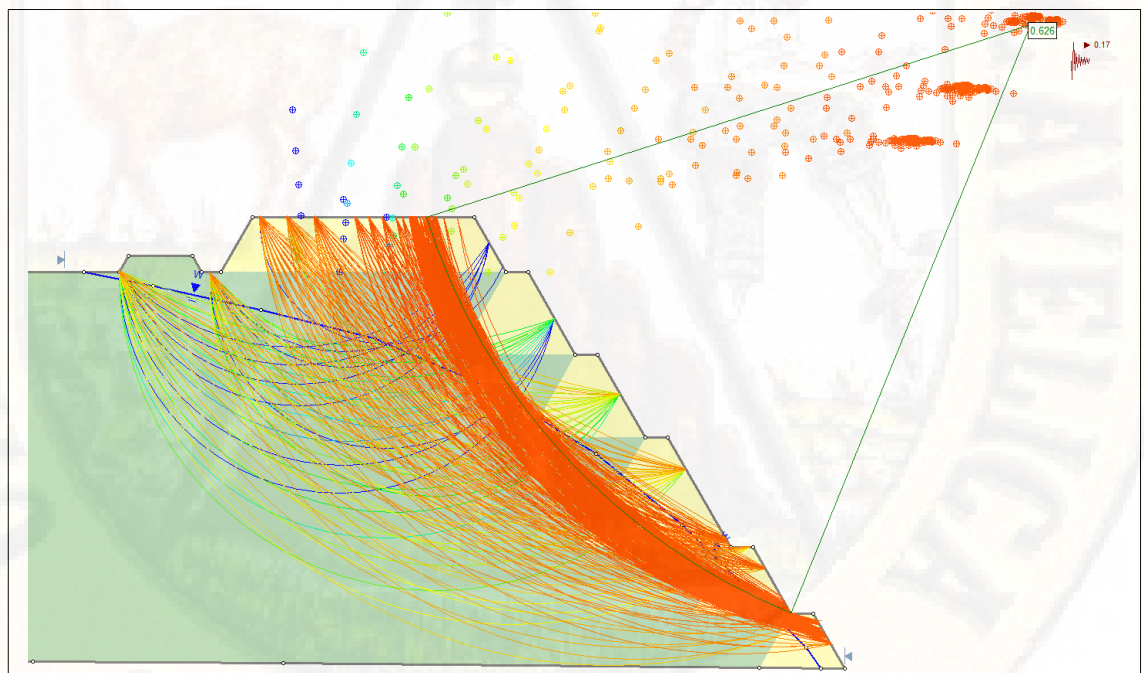


Figura 38: Superficies de falla potenciales según el método del cuerpo de ingenieros de EE.UU.

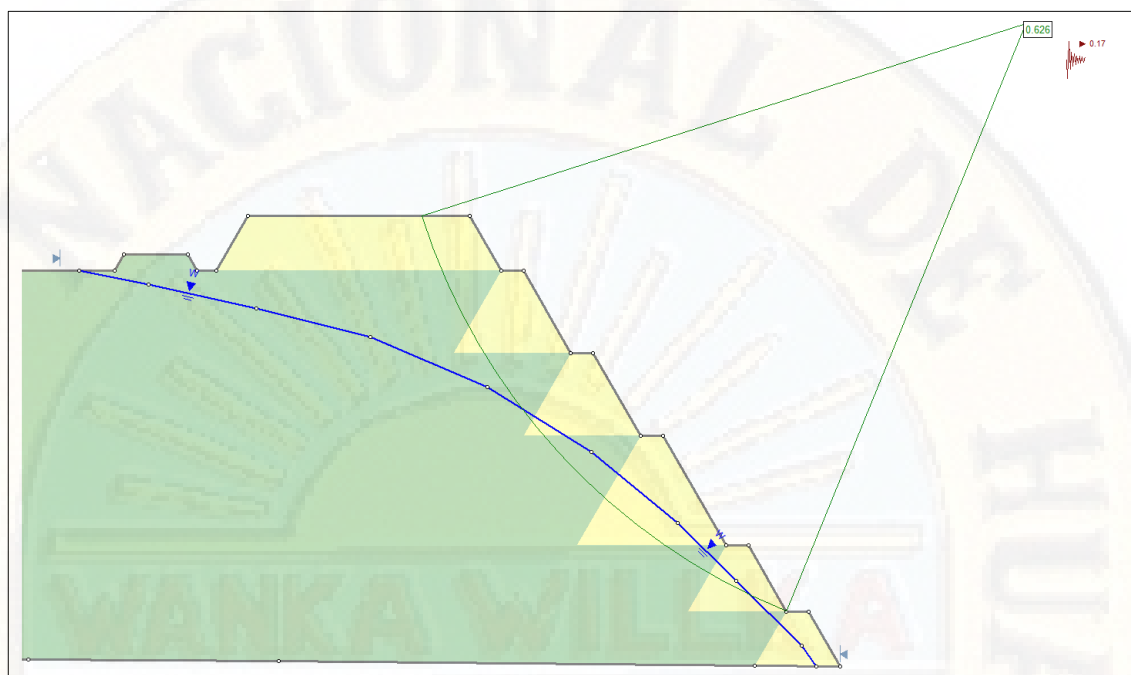


Figura 39: Superficie de falla critica según el método del cuerpo de ingenieros de EE.UU, FS = 0.626

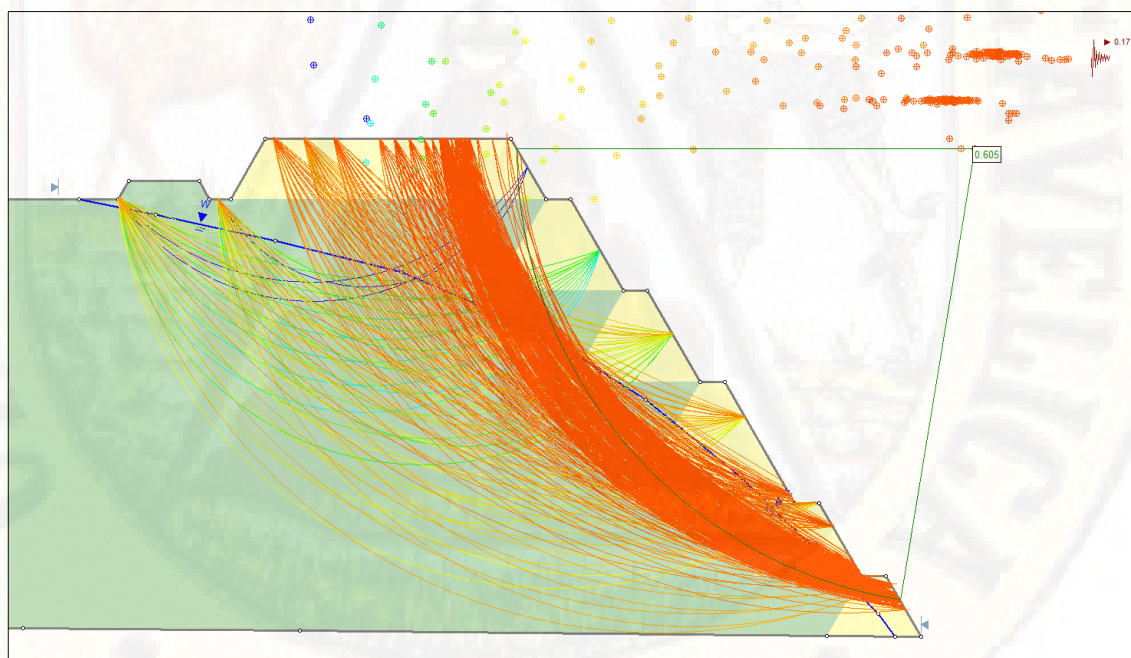


Figura 40: Superficies de falla potenciales según el método de Lowe – Karafiath

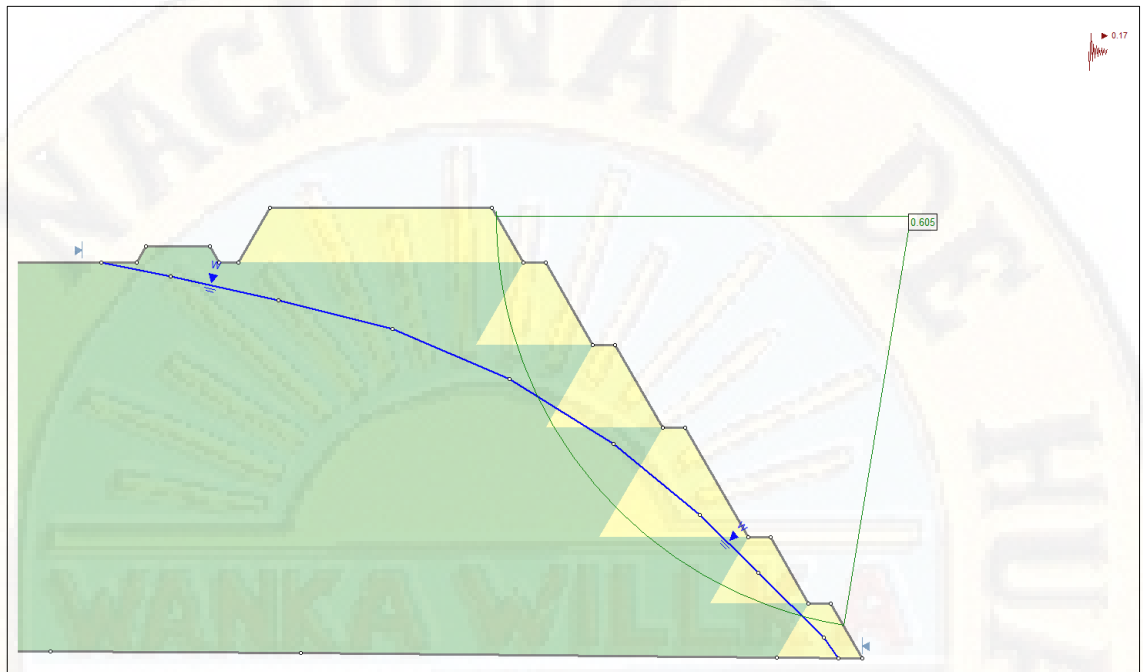


Figura 41: Superficie de falla crítica según el método de Lowe – Karafiath, $FS = 0.605$

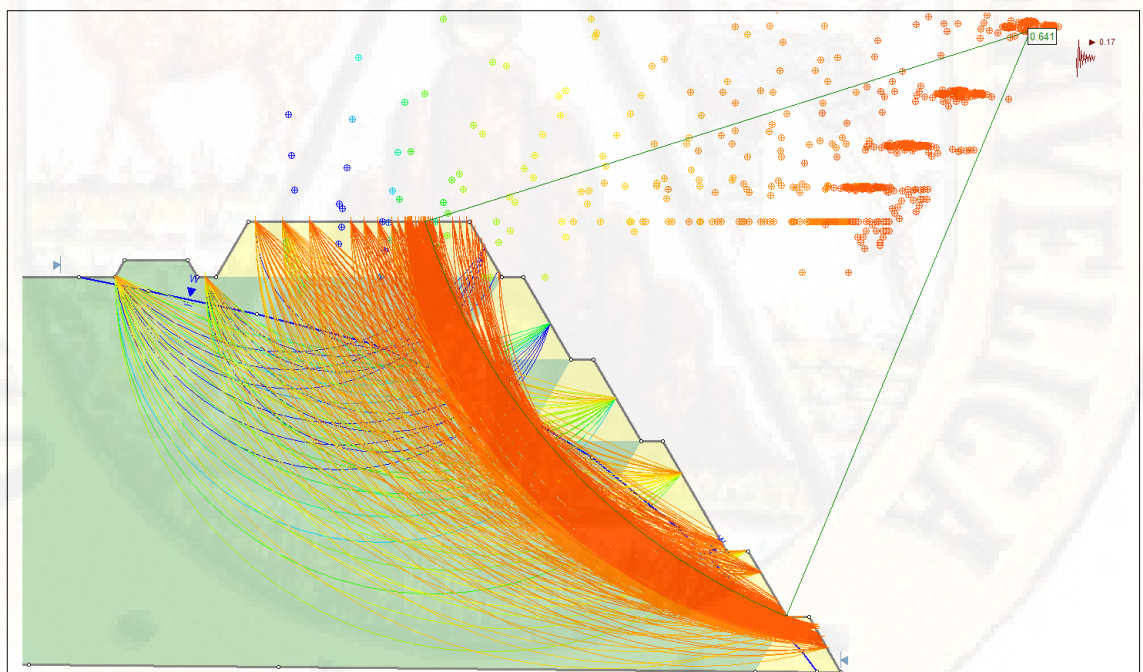


Figura 42: Superficies de falla potenciales según el método de Morgenstern - Price

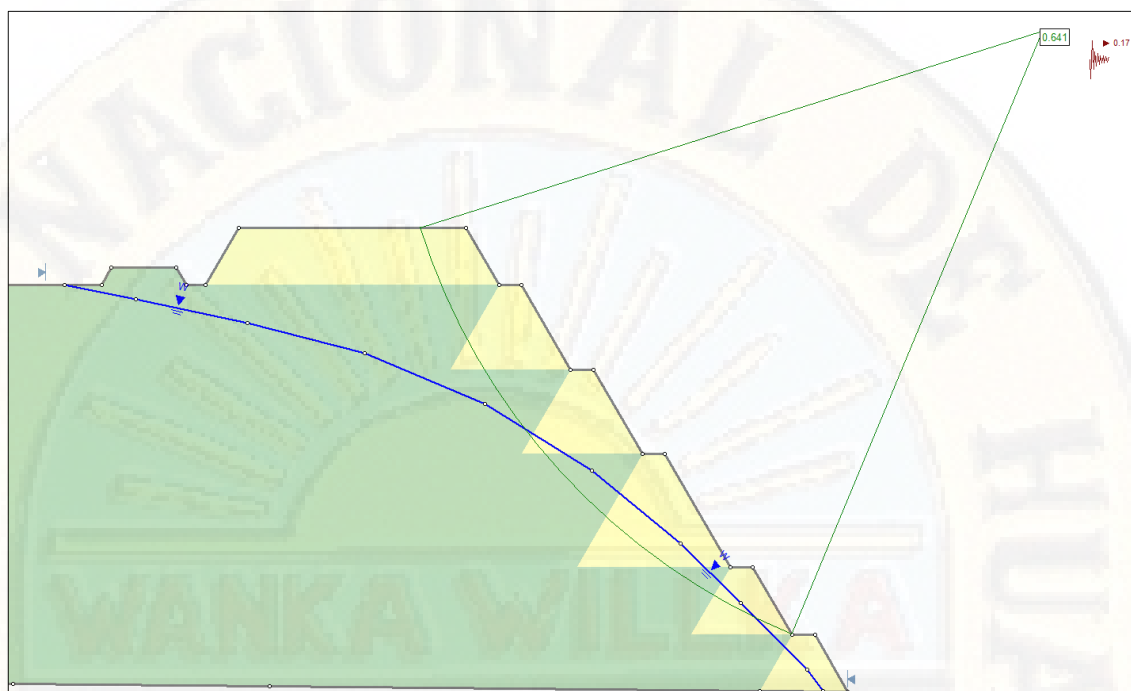


Figura 43: Superficie de falla crítica según el método de Morgenstern – Price, $FS = 0.641$

De los métodos aplicados se ha obtenido el siguiente cuadro resumen de los respectivos factores de seguridad:

4.3. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

De los trabajos de investigación citados en el presente estudio se ha determinado que el método de elementos finitos tiene una mejor performance para la determinación del análisis de taludes, así mismo, al realizar un análisis de los antecedentes internacionales para este estudio, se han citado a León & González (2013), Aguilar & Zúñiga (2015), García (2004), estos autores han realizado un análisis de la estabilidad de taludes todos ellos usando los métodos del equilibrio límite y considerando el efecto de la fuerza sísmica, y en todos estos estudios los taludes resultaron ser estables según a la normativa de su país, por lo que podríamos que decir que realizaron una corroboración de la estabilidad del talud. Esto resultado muestra que la ingeniería aplicada a la estabilización de taludes en los países extranjeros posee probablemente mayor rigurosidad de análisis.

Del estudio de Parga (2012) y Tagle (2011), se establece que los análisis estuvieron fundamentados en el análisis de grietas que se da dentro del material de relave y que estas grietas son llenadas con el material blando de la nueva capa de material de relave, estos estudios siguen el algoritmo de un modelo numérico constitutivo elastoplástico basado en elementos finitos.

Por otro lado Banda (2008) utiliza el modelo constitutivo elastoplástico mediante el software FLAC 2D, recordemos que el investigador clasificó en tres grupos los sismos registrados en su zona de estudio, Chakraborty y Choudhury (2013) implementan el modelo pseudo estático y pseudo dinámico en el software FLAC 3D comparando dichos resultados con un análisis dinámico.

Finalmente, Moreno (2006) realizó el análisis sísmico dinámico, pero bajo un enfoque de análisis de riesgos, mientras que Rey (2012) se enfocó en comparar los resultados del análisis estático y dinámico

CONCLUSIONES

Conclusión General

La Presa N° 9 Acchilla-Ccochaccasa-Angaraes-Huancavelica bajo condiciones estáticas resulta ser estable sin embargo bajo condiciones pseudo estáticas, pseudo dinámicas y condición dinámica es inestable, según a la norma CE.020 del reglamento nacional de edificaciones

Conclusiones Específicas:

1. Para condiciones pseudo estáticas donde el coeficiente de aceleración sísmica es constante la presa de relave N° 9 Acchilla-Ccochaccasa-Angaraes-Huancavelica es inestable.
2. Para condiciones pseudo dinámicas donde el coeficiente de aceleración sísmica es variable la presa de relave N° 9 Acchilla-Ccochaccasa-Angaraes-Huancavelica es inestable.
3. Las fuerzas sísmicas influyen considerablemente sobre la estabilidad de la presa N° 9 Acchilla-Ccochaccasa-Angaraes-Huancavelica.

RECOMENDACIONES

Recomendación General:

- Para poder estabilizar la Presa N° 9 Acchilla-Ccochaccasa-Angaraes-Huancavelica es necesario el uso de geomenbranas, puesto que, al momento de realizar la simulación de la estabilidad, cumple con el estándar de la norma CE.020 del Reglamento Nacional De Edificaciones.

Recomendaciones Específicas:

- El análisis bajo condiciones pseudo estáticas resulta ser un método muy simplificado debido a que el coeficiente de aceleración sísmica es constante, por lo que no se aproxima a la realidad, no se recomienda uso.
- El análisis bajo condiciones pseudo dinámicas donde el coeficiente de aceleración sísmica es variable resulta tener mayor aproximación al comportamiento real de la presa de relave N° 9 Acchilla-Ccochaccasa-Angaraes-Huancavelica, pero que sin embargo no se puede generalizar su uso, es mas recomendable usar el análisis dinámico.
- Las fuerzas sísmicas tienen una gran influencia sobre las estructuras, por lo que es recomendable que en las zonas que no hay mucha actividad sísmica, si se deba considerar su efecto sobre la estructura, esto debido principalmente al silencio sísmico.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Banda LP. Análisis Sísmico De Una Presa De Arena De Relave. Ms [Tesis]. Chile: Pontificia Universidad Católica De Chile; 2008.

Parga GB. Análisis Sísmico 2D De Una Presa De Relaves Espesados Considerando La Existencia De Grietas Por Dsecación. Ms [Tesis]. Chile: Pontificia Universidad Católica De Chile; 2012.

D. Kossoff, W.E. Dubbin, M. Alfredsson, S.J. Edwards, M.G. Macklin, K.A. Hudson-Edwards. Mine Tailings Dams: Characteristics, Failure, Environmental Impacts, and Remediation. *Applied Geochemistry*. 2014; 51(2):229–245. doi:10.1016/j.apgeochem.2014.09.010

M. Mayoral, P. Romo. Geo-Seismic Environmental Aspects Affecting Tailings Dams Failures. *American Journal of Environmental*. 2008; 4(3):212-222. doi:10.3844/ajessp.2008.212.222

T. Rudolph, G. Coldewey. Implications of Earthquakes on the Stability of Tailings Dams. *Applied Geology*. 1971; disponible en: http://www.imwa.de/docs/imwa_2008/IMWA2008_025_Rudolph.pdf

M. Rico, G. Benito, A.R. Salgueiro, A. Diez-Herrero, H.G. Pereira. Reported tailings dam failures A review of the European incidents in the worldwide context. *Journal of Hazardous Materials*. 2007; 152(8):846–852. doi: 10.1016/j.jhazmat.2007.07.050

S. Azam, Q. Li. Tailings Dam Failures: A Review of the Last One Hundred Years. *Waste Geotechnics*. 2010; 5(1):50-53. disponible en: <http://zazemiata.org/origin/wp-content/uploads/2014/08/Azam2010.pdf>

A.C. Gil. Accidentes Y Fallas En Presas De Relave. *Geotecnia De Los Suelos Peruanos*. disponible en: http://www.acingenieros.com/descargas/pdfs/Articulo_03_Parte_03.pdf

C. Bernedo. Predictive Models And Available Software For Tailings Dams. 2011.
disponible en: <http://www.infomine.com/publications/docs/Bernedo2011.pdf>

P.N. Psarropoulos, Y. Tsompanakis. Stability of tailings dams under static and seismic loading. Canadian Geotechnical Journal. 2008; 45(5):663-675.
doi:10.1139/T08-014

D. Chakraborty, D. Choudhury, M. ASCE. Advances in Geotechnical Engineering. 2011; 20(45):3138-3147. doi:10.1061/41165(397)321

Tagle G.F. Estudio Del Comportamiento Sísmico De Relaves Espesados Mediante El Análisis De Columna Unidimensional, Considerando Grietas De Contracción. Ms [Tesis]. Chile: Pontificia Universidad Católica De Chile; 2011.

D. Chakraborty, D. Choudhury. Pseudo-Static and Pseudo-Dynamic Stability Analysis of Tailings Dam Under Seismic Conditions. Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section A: Physical Sciences. 2013; 83(1):63-71.
doi:10.1007/s40010-013-0069-5

E.T. Moreno. Contribución A La Estimación De Consecuencias de Fallo Y Rotura de Presas en el Contexto del Análisis de Riesgos. Ms [Tesis]. España: Universidad Politécnica de Valencia; 2006.

D.C. Rey. Comportamiento Geotecnico de Presas de Residuos Bajo Acciones Estáticas Y Dinámicas. Ms [Tesis]. España: Universidad Politécnica de Madrid; 1987

A.G. Castro, D.O. Gago, G.R. Rosales, L.G. Chagua. Como Aprender Y Enseñar Investigacion Cientifica. Segunda edición. Perú: Biblioteca Nacional Del Perú; 2014.

MATRIZ DE CONSISTENCIA

MATRIZ DE CONSISTENCIA					
PROBLEMAS	OBJETIVOS	MARCO TEORICO	HIPOTESIS	VARIABLE	METODOLOGIA
Problema General: ¿Cuál es la estabilidad de la presa N° 9 Acchilla - Ccochaccasa - Angaraes - Huancavelica mediante el análisis sísmico Pseudo Estático y Pseudo Dinámico?	Objetivo General: Determinar la estabilidad de la presa N° 9 Acchilla - Ccochaccasa - Angaraes - Huancavelica mediante el análisis sísmico Pseudo Estático y Pseudo Dinámico.	Antecedentes: - D. Kossoff, W.E. Dubbin, M. Alfredsson, S.J. Edwards, M.G. Macklin, K.A. Hudson-Edwards. Mine Tailings Dams: Characteristics, Failure, Environmental Impacts, and Remediation. Applied Geochemistry. 2014. - M. Mayoral, P. Romo. Geo-Seismic Environmental Aspects Affecting Tailings Dams Failures. American Journal of Environmental. 2008. - M. Rico, G. Benito, A.R. Salgueiro, A. Diez-Herrero, H.G. Pereira. Reported tailings dam failures A review of the European incidents in the worldwide context. Journal of Hazardous Materials. 2007. - S. Azam, Q. Li. Tailings Dam Failures: A Review of the Last One Hundred Years. Waste Geotechnics. 2010. - D. Chakraborty, D. Choudhury, M.ASCE. Advances in Geotechnical Engineering. 2011.	Hipótesis General: El Análisis Sísmico Pseudo Estático y Pseudo Dinámico muestra la Estabilidad de la Presa N° 9 Acchilla - Ccochaccasa - Angaraes - Huancavelica.	Variable Independiente: Pseudo Estático. Pseudo Dinámico. Dimensiones: - Peso específico - Cohesión - Angulo de fricción	Tipo de investigación: Investigación Aplicada o tecnológica Nivel de investigación: Investigación Descriptivo - Explicativo Diseño de investigación: Transversal Población y muestra: - Población: Presa de relave minero - Muestra: Presa Acchilla N° 9 - Muestreo: No probabilístico
Problema Específico: 1. ¿Cuál es el efecto del peso específico del material en la estabilidad de la presa N° 9 Acchilla-Ccochaccasa-Angaraes-Huancavelica mediante el análisis sísmico Pseudo Estático y Pseudo Dinámico? 2. ¿Cuál es el efecto de la cohesión del material en la estabilidad de la presa N° 9 Acchilla-Ccochaccasa-Angaraes-Huancavelica mediante el análisis sísmico Pseudo Estático y Pseudo Dinámico? 3. ¿Cuál es el efecto del ángulo de fricción del material en la estabilidad de la presa N° 9 Acchilla-Ccochaccasa-Angaraes-Huancavelica mediante el análisis sísmico Pseudo Estático y Pseudo Dinámico?	Objetivo Específico: 1. Determinar el efecto del peso específico del material en la estabilidad de la presa N° 9 Acchilla-Ccochaccasa-Angaraes-Huancavelica mediante el análisis sísmico Pseudo Estático y Pseudo Dinámico. 2. Determinar el efecto de la cohesión del material en la estabilidad de la presa N° 9 Acchilla-Ccochaccasa-Angaraes-Huancavelica mediante el análisis sísmico Pseudo Estático y Pseudo Dinámico. 3. Determinar el efecto del ángulo de fricción del material en la estabilidad de la presa N° 9 Acchilla-Ccochaccasa-Angaraes-Huancavelica mediante el análisis sísmico Pseudo Estático y Pseudo Dinámico.	Marco Teórico Referencial: - Se hace un resumen de las fallas ocurridas en presas de relave en todo el mundo y su impacto ambiental, social, económico - Se realiza un recuento sobre el comportamiento de las presas de relave ante condiciones sísmicas. - Se profundiza sobre el efecto de las fuerzas sísmicas sobre las presas de relave. - Se plantean dos nuevos métodos para el análisis de falla de presas de relave.	Hipótesis Específica: 1. El peso específico del material afecta en la estabilidad de la presa N° 9 Acchilla-Ccochaccasa-Angaraes-Huancavelica mediante el análisis sísmico Pseudo Estático y Pseudo Dinámico. 2. La cohesión del material afecta en la estabilidad de la presa N° 9 Acchilla-Ccochaccasa-Angaraes-Huancavelica mediante el análisis sísmico Pseudo Estático y Pseudo Dinámico. 3. El ángulo de fricción del material afecta en la estabilidad de la presa N° 9 Acchilla-Ccochaccasa-Angaraes-Huancavelica mediante el análisis sísmico Pseudo Estático y Pseudo Dinámico.	Variable dependiente: Estabilidad de la presa Dimensiones: - Factor de seguridad	Técnicas e instrumentos de recolección de datos: - Técnicas: Observación directa - Instrumentos: *Equipo dron para levantamiento topográfico. * Equipo de laboratorio para estudio geotécnico. Técnicas de análisis y procesamiento de datos: - Técnicas Análisis cuantitativo - Procesamiento de datos * Global Mapper * Civil 3D 2015 * SLIDE * GeoStudio

Autores: Los Tesistas