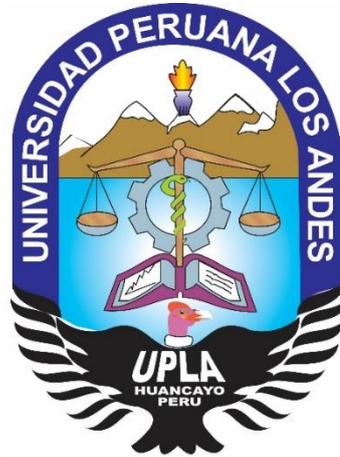


UNIVERSIDAD PERUANA LOS ANDES

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS

**MÉTODOS DE CRECIMIENTO PARA LA VIABILIDAD EN LA
CONSTRUCCIÓN DEL DEPÓSITO DE RELAVES
CHACCHUILLE IV**

PRESENTADO POR:

BACH. MACHACUAY URETA, HENRY RONALD

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:

TRANSPORTE Y URBANISMO

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO CIVIL

LIMA – PERÚ

2018

Mg. Gallardo Mendoza, Juan Carlos

Mg. Vignate Dueñas, Rene

DEDICATORIA

Dedico especialmente a Dios y a todos los santos, especialmente a Santo Toribio; por haberme dado fortaleza, para poder cumplir mis objetivos propuestos.

A mis padres Santiago e Hilda por apoyarme moralmente y económicamente para poder ser un profesional más para la sociedad.

A mi pareja Wendy quien compartió y estuvo en mi formación profesional.

A mis hijas Priya y Zahory que son el motor de mi vida.

A mis amigos Renzo Maldonado, Susán Salazar, Eugenio Gonzales por haberme apoyado en mis metas.

AGRADECIMIENTO

A la Universidad Peruana, Los Andes, por haberme dado la oportunidad y ser parte de ella durante la etapa de mi formación profesional.

A mis padres Santiago e Hilda por haberme educado, forjado en valores y por haberme apoyado durante mi formación.

A mi esposa Wendy mi compañera durante 6 años y para toda la vida.

Al ingeniero, Eugenio Gonzales y el Licenciado, Renzo Maldonado por el apoyo y exigencia para realizar dicha investigación.

A todos que fueron parte de este proyecto, sus ayudas fueron primordiales en la ejecución de mi propósito.

HOJA DE CONFORMIDAD DE LOS JURADOS

DR. CASIO AURELIO TORRES LÓPEZ
PRESIDENTE

ING. NATALY LUCIA CORDOVA ZORRILLA
JURADO

ING. CHRISTIAN MALLAUPOMA REYES
JURADO

ING. CHRISTIAN MALLAUPOMA REYES
JURADO

MG. MIGUEL ANGEL CARLOS CANALES
SECRETARIO DOCENTE

ÍNDICE

RESUMEN	12
ABSTRAT	13
INTRODUCCIÓN	14
CAPÍTULO I: PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	17
1.1 Planeamiento del problema	17
1.2 Formulación y sistematización del problema.....	17
1.2.1 Problema general	17
1.2.2 Problemas específicos	17
1.3 Justificación.....	18
1.3.1 Social o práctica	18
1.3.2 Metodológica.....	18
1.4 Delimitaciones.....	18
1.4.1 Espacial	18
1.4.2 Temporal	18
1.4.3 Económica.....	18
1.5 Limitaciones	19
1.6 Objetivos	19
1.6.1 Objetivo general	19
1.6.2 Objetivos específicos.....	19
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....	20
2.1 Antecedentes	20
2.1.1 Antecedentes nacionales.....	20
2.1.2 Antecedentes Internacionales	22
2.2 Marco conceptual	23
2.2.1 Depósito de relaves	23
2.2.2 Tipos de depósito de relaves.....	24
2.2.3 Métodos de crecimiento de presas de relaves	24
2.2.4 Componentes principales de un depósito de relaves	27
2.2.5 Parámetros geotécnicos del depósito de relaves	29
2.2.6 Material de construcción del depósito de relaves.....	34
2.2.7 Prospección geofísica	36
2.2.8 Análisis de estabilidad de taludes	38
2.2.9 Aspectos sísmicos del área	41
2.2.10 Software	45
2.3 Definición de términos	46
2.4 Hipótesis.....	47

2.4.1	Hipótesis general	47
2.4.2	Hipótesis específicas	47
2.5	Variables	47
2.5.1	Definición conceptual de la variable.....	47
2.5.2	Definición operacional de la variable	47
2.5.3	Operacionalización de la variable.....	48
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA.....		49
4.1	Método de investigación.....	49
4.2	Tipo de investigación	49
4.3	Nivel de investigación	49
4.4	Diseño de la investigación.....	49
4.5	Población y muestra	49
4.5.1	Población.-	49
4.5.2	Muestra.-	49
4.6	Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	50
4.7	Procesamiento de la información.....	50
4.8	Técnicas y análisis de datos.....	50
4.8.1	Geomorfología y caracterización geológica.....	50
4.8.2	Programa de investigaciones geotécnicas de campo	52
4.8.3	Ensayos de laboratorio de mecánica de suelos.-	56
4.8.4	Configuración geométrica del dique del depósito de relaves.-	56
CAPITULO IV: RESULTADOS		60
4.1	Resultado de ensayos.....	60
4.1.1	Ensayos de densidad in situ	60
4.1.2	Ensayos índices de mecánica de suelos	60
4.1.3	Ensayo de compactación	61
4.1.4	Ensayo de resistencia cortante Triaxial Consolidado No Drenado – CU (ASTM D-4767) 61	
4.2	Sondeo geofísico	62
4.2.1	Tabla de resultados	62
4.2.2	Tabla de descripción de sondajes eléctricos:	64
4.2.3	Descripción de secciones geoelectricas	68
4.3	Caracterización geotécnica de los materiales.....	69
4.4	Propiedades físicas y parámetros de resistencia cortante	72
4.5	Configuración geométrica del depósito de relaves Chacchuille IV.....	72
4.5.1	Método línea central.....	72
4.5.2	Método Aguas abajo.....	74

4.6	Análisis de Estabilidad de Talud del Depósito de Relaves Chacchuille IV	76
4.6.1	Aceleración sísmica de diseño	76
4.6.2	Análisis de estabilidad de taludes	76
4.7	Instalaciones auxiliares en la construcción del depósito de relaves Chacchuille IV	90
4.8	Presupuesto	92
4.8.1	Presupuesto método línea central	92
4.8.2	Presupuesto método aguas abajo	92
4.9	Evaluación ambiental	93
4.9.1	Impactos identificados durante la etapa de construcción:	93
4.9.2	Impactos identificados durante la etapa de operación	94
4.9.3	Impactos identificados durante la etapa de cierre	95
CAPITULO V: DISCUSIÓN DE RESULTADOS		97
5.1	Discusión de resultados	97
CONCLUSIONES		98
RECOMENDACIONES		99
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		100
ANEXOS		101

TABLAS

Tabla 1: Rango de resistividad de rocas y materiales	38
Tabla 2: Valores mínimos permisibles del factor de seguridad	41
Tabla 3: Aceleraciones máximas esperadas (% g).....	42
Tabla 4: Operacionalización de Variables e indicadores	48
Tabla 5: Resumen de las calicatas excavadas	54
Tabla 6: Coordenadas de ubicación de los sondajes eléctricos en el área del Depósito de Relaves Chacchuille IV	56
Tabla 7: Parámetros de diseño depósito de relaves Chacchuille IV. (Línea central)	58
Tabla 8: Parámetros de diseño depósito de relaves Chacchuille IV. (Aguas abajo).....	58
Tabla 9: Ensayos de densidad in situ	60
Tabla 10: Resumen de ensayo de clasificación de suelos	61
Tabla 11: Resumen del ensayo de compactación estándar	61
Tabla 12: Resumen de los ensayos se muestra	62
Tabla 13: Resultados de los sondajes eléctricos	63
Tabla 14: Sondaje 01.....	64
Tabla 15: Sondaje 02.....	64
Tabla 16: Sondaje 03.....	64
Tabla 17: Sondaje 04.....	65
Tabla 18: Sondaje 05.....	65
Tabla 19: Sondaje 06.....	65
Tabla 20: Sondaje 07.....	65
Tabla 21: Sondaje 08.....	66
Tabla 22: Sondaje 09.....	66
Tabla 23: Sondaje 10.....	66
Tabla 24: Sondaje 11.....	66
Tabla 25: Sondaje 12.....	67
Tabla 26: Sondaje 13.....	67
Tabla 27: Sondaje 14.....	67
Tabla 28: Sondaje 15.....	67
Tabla 29: Sondaje 16.....	68
Tabla 30: Propiedades físicas y parámetros de resistencia cortante de los materiales	72
Tabla 31: Nivel de cresta del dique y volumen requerido para la conformación del dique método línea central.....	73
Tabla 32: Nivel de cresta del dique y capacidad de almacenamiento del depósito de relaves Chacchuille IV método línea central	74

Tabla 33: Nivel de cresta del dique y volumen requerido para la conformación del dique método aguas abajo.....	75
Tabla 34: Nivel de cresta del dique y capacidad de almacenamiento del depósito de relaves Chacchulle IV método aguas abajo	76
Tabla 35: Resumen de resultados de factores de seguridad método línea central	83
Tabla 36: Resumen de resultados de factores de seguridad método aguas abajo	90

FIGURAS

Figura 1. Vista en planta de un depósito de relaves.....	23
Figura 2. Vista en sección de un depósito de relaves.....	23
Figura 3. Método aguas arriba.....	25
Figura 4. Método aguas abajo.	26
Figura 5. Método línea central.	27
Figura 6. Impermeabilización del vaso del depósito de relaves con geomembrana.	28
Figura 7. Esquema del método de resistividad eléctrica.	37
Figura 8. Zonificación sísmica del Perú	43
Figura 9. Mapa de distribución de máxima intensidad sísmica	44
Figura 10. Mapa isoaceleraciones para 475 años de periodo de retorno	45
Figura 11. Mapeo geológico superficial, zona del depósito de relaves IV proyectado y el cerro muerto.	52
Figura 12 Mapeo geológico superficial, zona superior del depósito de relaves IV proyectado ..	52
Figura 13 Vista panorámica y trabajos realizados en campo del depósito de relaves Chacchuille IV proyectado.....	53
Figura 14. Excavación de calicatas CC-02 con maquinaria dentro del dique del depósito de relaves proyectado.....	54
Figura 15 Excavación de calicatas de cantera dentro del vaso del depósito de relaves proyectado	55
Figura 16. Sondeo de densidad de campo de la muestra en cada una de las calicatas	55
Figura 17. Vista el área del proyecto del depósito de relaves chacchuille IV por el lado este	57
Figura 18. Vista el área del proyecto del depósito de relaves chacchuille IV por el lado oeste ..	57
Figura 19. Vista en planta del DR Chacchuille IV por el método línea central	73
Figura 20. Vista en sección del DR Chacchuille IV por el método línea central	73
Figura 21. Vista en sección del DR Chacchuille IV por el método aguas abajo	74
Figura 22. Vista en sección del DR Chacchuille IV por el método aguas abajo	75
Figura 23 Vista isométrica del depósito de relaves chacchuille IV	92

GRÁFICOS

Gráfico 1. Análisis Estático - Falla circular - Sección de Análisis 1-1'	77
Gráfico 2. Análisis Pseudo-estático - Falla circular Corto Plazo - Sección de Análisis 1-1'	78
Gráfico 3. Análisis Pseudo-estático - Falla circular a Largo Plazo - Sección de Análisis 1-1' ...	79
Gráfico 4. Análisis Estático - Falla circular - Sección de Análisis 2-2'	80
Gráfico 5. Análisis Pseudo-estático - Falla circular a Corto Plazo - Sección de Análisis 2-2' ...	81
Gráfico 6. Análisis Pseudo-estático - Falla circular a Largo Plazo - Sección de Análisis 2-2' ...	82
Gráfico 7. Análisis Estático - Falla circular - Sección de Análisis 1-1'	84
Gráfico 8. Análisis Pseudo-estático - Falla circular Corto Plazo - Sección de Análisis 1-1'	85
Gráfico 9. Análisis Pseudo-estático - Falla circular a Largo Plazo - Sección de Análisis 1-1' ...	86
Gráfico 10. Análisis Estático - Falla circular - Sección de Análisis 2-2'	87
Gráfico 11. Análisis Pseudo-estático - Falla circular a Corto Plazo - Sección de Análisis 2-2' ..	88
Gráfico 12. Análisis Pseudo-estático - Falla circular a Largo Plazo - Sección de Análisis 2-2' ..	89

RESUMEN

El presente trabajo de investigación, responde al siguiente problema general: ¿En qué medida, influyen los métodos de crecimiento de depósitos de relaves para la viabilidad en la construcción del depósito de relaves Chacchuille IV de Cía. Minera Caraveli S.A.C.?, el objetivo general es: Determinar la influencia de los métodos de crecimiento de depósito de relaves para la viabilidad en la construcción del depósito de relaves Chacchuille IV de Cía. Minera Caraveli S.A.C. y la hipótesis general que debe verificarse es: Los métodos de crecimiento de depósito de relaves influyen en la viabilidad para la construcción del depósito de relaves Chacchuille IV de CIA Minera Caraveli S.A.C.

La metodología general de la investigación es el método científico, tipo aplicado y cuantitativo, nivel explicativo, diseño cuasi-experimental; la población está constituido por los depósitos de relaves construidos con métodos de crecimiento aguas abajo y línea central, existentes en la concesión de beneficio “Chacchuille” de la Cía. Minera Caraveli S.A.C. y de otras empresas mineras, el tipo de muestreo es no probabilístico, dirigido y la muestra es el nuevo depósito de relaves Chacchuille IV de Cía. Minera Caraveli S.A.C.

Se concluye que; Los métodos de crecimiento de depósito de relaves influyen en la viabilidad para la construcción del depósito de relaves Chacchuille IV de CIA Minera Caraveli S.A.C., porque de acuerdo a los resultados del factor de seguridad obtenida para el método aguas abajo son mayores a los mínimos recomendados y adoptados como criterios de diseño; ocurre lo contrario para el método línea central. Es decir, haciendo la comparación de los resultados obtenidos, se concluye que el método aguas abajo presentará niveles de estabilidad geotécnica apropiados en la etapa final de crecimiento y condición de abandono.

Palabras claves: Métodos de crecimiento, viabilidad en la construcción, depósito de relaves.

ABSTRACT

The present research work responds to the following general problem: To what extent do the tailings deposits growth methods influence the viability in the construction of the Chacchuille IV de Cía deposit? Minera Caraveli S.A.C.? The general objective is: To determine the influence of tailings deposit growth methods for the viability in the construction of the tailings deposit Chacchuille IV de Cía. Minera Caraveli S.A.C. and the general hypothesis that should be verified is: The tailings deposit growth methods influence the viability for the construction of the Chacchuille IV tailings deposit by CIA Minera Caraveli S.A.C.

The general methodology of the research is the scientific method, applied and quantitative type, explanatory level, quasi-experimental design; the population consists of tailings deposits built with downstream and central line growth methods, existing in the "Chacchuille" benefit concession of the Cía. Minera Caraveli S.A.C. and from other mining companies, the type of sampling is non-probabilistic, directed and shown by the new tailings deposit Chacchuille IV de Cía. Minera Caraveli S.A.C.

It is concluded that; the tailings deposit growth methods influence the viability for the construction of the Chacchuille IV tailings deposit by CIA Minera Caraveli SAC, because according to the results of the safety factor obtained for the downstream method they are greater than the recommended minimums and adopted as design criteria; the opposite occurs for the centerline method. That is, by comparing the results obtained, it is concluded that the downstream method will present levels of appropriate geotechnical stability in the final stage of growth and abandonment condition.

Keywords: Growth methods, viability in the tailings, deposit construction.

INTRODUCCIÓN

El presente investigación titulada “**Métodos de crecimiento para la viabilidad en la construcción del depósito de relaves Chacchulle IV**”, se desarrolla los problemas.

Dado que las instalaciones de almacenamiento por lo general contienen residuos químicos y elevado nivel de metales, es crucial asegurar su estabilidad física y química.

Cabe mencionar que éstas estructuras no generan ingresos a la empresa minera, al contrario son inversiones que no retornan y requieren permanente monitoreo. En este contexto, se requiere evaluar los métodos de crecimiento del depósito de relaves, teniendo en consideración la seguridad de las personas, el ambiente e infraestructura social y productiva.

La estructura de la presente investigación está conformado por 5 capítulos:

Capítulo I: El cual se desarrolla el planteamiento del problema, formulación y sistematización del problema, Justificación, delimitaciones, limitaciones y objetivos.

Capítulo II: Se desarrolla el marco teórico, antecedentes nacionales e internacionales de trabajos de investigaciones similares, marco conceptual se desarrolla los conceptos básicos métodos de crecimientos métodos de crecimiento para la viabilidad en la construcción del depósito de relaves Chacchulle IV, definición de términos, hipótesis y las variables de la investigación.

Capítulo III: Metodología, la tesis se está desarrollando con el método científico, tipo aplicada y cuantitativo, nivel de investigación explicativo, el diseño de la investigación cuasi-experimental, población, muestra y análisis de datos.

Capítulo IV: Contiene los resultados del trabajo de investigación, ensayos de campo, laboratorio, análisis de estabilidad, presupuesto e impacto ambiental.

Capítulo V: La discusión de resultados del trabajo de investigación, basándose en el análisis de estabilidad física, presupuesto, impacto ambiental de los métodos de crecimiento de depósito de relaves para la construcción del depósito de relaves Chacchulle IV.

Como parte del estudio presentan los anexos los cuales son los siguientes: perfiles estratigráficos, ensayos de densidad de campo, ensayos de laboratorios, planos y presupuesto.

CAPÍTULO I:

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1 Planeamiento del problema

Para el inicio y continuidad de operaciones de un proyecto minero en el Perú y en el mundo, se requiere de instalaciones para el almacenamiento de residuos, los cuales son obtenidos por el procesamiento de minerales, estos residuos son comúnmente denominados “relaves”. Cía. Minera Caraveli S.A.C., para continuar sus operaciones mineras viene evaluando las características constructivas de su nuevo depósito de relaves Chacchuille IV.

Dado que las instalaciones de almacenamiento por lo general contienen residuos químicos y elevado nivel de metales, es crucial asegurar su estabilidad física y química.

Cabe mencionar que, éstas estructuras no generan ingresos a la empresa minera, al contrario son inversiones que no retornan y requieren permanente monitoreo. En este contexto, se requiere evaluar los métodos de crecimiento de la presa de relaves Chacchuille IV, teniendo en consideración la seguridad de las personas, el ambiente e infraestructura social y productiva.

1.2 Formulación y sistematización del problema

1.2.1 Problema general

¿En qué medida, influyen los métodos de crecimiento de depósitos de relaves para la viabilidad en la construcción del depósito de relaves Chacchuille IV de Cía. Minera Caraveli S.A.C.?

1.2.2 Problemas específicos

- a. ¿De qué manera influyen los métodos de crecimiento de depósito de relaves en la estabilidad física del depósito de relaves Chacchuille IV?
- b. ¿Qué método de crecimiento de depósito de relaves es económicamente factible para la construcción del depósito de relaves Chacchuille IV?
- c. ¿En qué medida influyen los métodos de crecimiento del depósito de relaves Chacchuille IV al impacto del medio ambiente?

1.3 Justificación

1.3.1 Social o práctica

La investigación se enfoca en analizar los métodos de crecimiento de depósito de relaves Chacchuille IV, con la finalidad de minimizar la afectación a la calidad de vida de la población y del ecosistema circundante en la unidad minera, por ser una estructura de gran importancia.

1.3.2 Metodológica

Para lograr los objetivos del estudio, se empleará como metodología de investigación el método científico, el cual consiste en aplicar procedimientos y métodos establecidos en las normas y reglamentos, tanto para los estudios de campo, ensayos de laboratorio y trabajos en gabinete; para determinar el método de crecimiento más viable para la construcción del depósito de relaves Chacchuille IV.

1.4 Delimitaciones

1.4.1 Espacial

El área del proyecto es relativamente compacta, cubriendo un área de aproximadamente 13.75 hectáreas (ha). El área del proyecto está delimitada por el río Tocota al oeste y por límites de propiedades alrededor del resto del sitio. La ubicación del depósito de relaves Chacchuille IV, está comprendida sobre un área donde desembocan varias quebradas tributarias distribuidas en drenaje subparalela, en las márgenes de estas quebradas se han formado depósitos de acumulación en abanico, que se denomina “Cono Aluvial”.

1.4.2 Temporal

Para la investigación se realizó trabajos de campo, laboratorio y gabinete, el cual se ejecutó un periodo de 8 meses, se inició el 20 de octubre y culminó el 10 de junio del 2018.

1.4.3 Económica

Los recursos económicos invertidos durante la investigación, no fue numerosa ya que contaba con información tanto de campo, ensayos de laboratorio de estudios anteriores o ingeniería básica, asimismo se dispone de software necesario. La elaboración de los documentos que incluyen al software empleado, y los gastos que implican los ensayos de

laboratorio, fotocopiado, impresión, anillado y empastado, han sido asumidos por el investigador.

1.5 Limitaciones

La presente investigación busca ser una propuesta técnica y guía de aplicación en proyectos de construcción y recrecimiento de presas de relaves, es decir servirá como un modelo para proyectos similares y poder garantizar un buen trabajo o éxito en el término del proyecto y satisfacción con las partes involucradas.

1.6 Objetivos

1.6.1 Objetivo general

Determinar la influencia de los métodos de crecimiento de depósito de relaves para la viabilidad en la construcción del depósito de relaves Chacchuille IV de Cía. Minera Caraveli S.A.C.

1.6.2 Objetivos específicos

- a. Determinar la influencia de los métodos de crecimiento de depósito de relaves en la estabilidad física del depósito de relaves Chacchuille IV.
- b. Evaluar los métodos de crecimiento del depósito de relaves Chacchuille IV, con la finalidad de determinar la factibilidad económica para su construcción.
- c. Determinar el método de crecimiento de depósito de relaves que genere menor impacto al medio ambiente.

CAPÍTULO II:

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes

2.1.1 Antecedentes nacionales

Estudio de ingeniería de detalle para el crecimiento de la presa de relaves “El Porvenir” a la cota 4,115 msnm de la Compañía Minera Milpo S.A.A. ubicado en el distrito de San Francisco de Asís de Yarusyacan, provincia y región de Pasco, (Vector, 2013). Comprende el recrecimiento del dique principal de la presa de relaves mediante el método de línea central y aguas abajo, cuyo relleno es de relaves con la “fracción gruesa”, relaves cicloneados, desde el nivel de dique existente cuya cota es 4,043 msnm, el cual fue construido con material de relleno de tierra y desmonte rocoso con determinadas especificaciones físicas y químicas. Según la información de campo, el desarrollo de los ensayos de laboratorio y su interpretación y los resultados de la geofísica, se realizaron análisis de infiltración y análisis de estabilidad de taludes, en condiciones estáticas, y con sismos para establecer la altura máxima de crecimiento, garantizando la estabilidad integral del dique principal. El estudio demandó que el talud de aguas abajo del dique sea en su parte superior de 2,5H:1V, mientras que la sección inferior este configurada con un talud global de 2,0H:1V estando conformados por relaves gruesos cicloneados los cuales debían ser compactados mediante rodillo liso vibratorio, hasta alcanzar un grado de compactación no menor al 85 % de la máxima densidad seca según el ensayo de compactación proctor estándar.

El crecimiento de la presa de relaves “El Porvenir” es por el método de línea central, relleno con material cicloneado.

Estudio de ingeniería denominado: Presa de Relaves A3 de Sociedad Minera Cerro Verde S.A.A., ubicado en el distrito de Uchumayo, provincia y región de Arequipa, (MWH Perú S.A., 2012). Según el concepto de diseño adoptado el depósito de relaves A3 consiste de una presa de arranque de enrocado zonificada y una elevación de línea central, una presa de arena gruesa, cicloneada compactada y un embalse de relaves. La presa de arranque tiene una altura de 160 m (en la línea central) y una elevación de 140 m de gruesos de relave compactado encima de la cresta de la presa de arranque.

La cresta de la presa de arranque tiene una elevación de 2,570 msnm y un ancho de 15 m, lo cual se considera apropiado para el acceso operativo y requerimientos de construcción

de los componentes de conducción de relaves. Existe un banco de 15 m aguas abajo a una elevación de 2,560 msnm. El talud aguas arriba de la presa de arranque es de 1.5H:1V y el talud aguas abajo es de 2H:1V por encima de la elevación 2,460 msnm y de 3.5H:1V debajo de la elevación 2,460 msnm. La presa de arranque tiene un núcleo en el centro, de material de baja permeabilidad con una excavación en el centro que penetra hasta llegar a roca competente. La construcción de la presa de arenas gruesas de relave cicloneado ha sido diseñada para empezar al inicio de las operaciones; aproximadamente el 50 % del relave producido en la planta será conducido a la estación de ciclones de dos fases ubicada en el estribo derecho de la presa. En la estación, se separará el relave en arena gruesa de relave con un máximo de 15 % de finos de relave (partículas menores a 75 micrones) y arena fina de relave. Los gruesos de relave se utilizarán para la construcción de la elevación de línea central de la presa, la cual continuará siendo elevada continuamente a lo largo de las operaciones de la instalación y los finos de relave se colocarán en el embalse.

El crecimiento de la presa de relaves A3 de sociedad Minera Cerro Verde S.A.A., es por el método line central, relleno con material cicloneado.

El diseño del proyecto inicial del depósito de relaves no. 3 Compañía Minera Casapalca S.A. fue realizado por INEPROSA en 1998. El diseño consideraba la construcción de un dique de contención de 50 metros de altura del tipo “aguas abajo” y la corona alcanzaba la elevación máxima de 4,668 msnm.

Para el proyecto, INEPROSA realizó investigaciones geotécnicas que comprendieron la ejecución de calicatas, sondajes, ensayos de penetración, líneas de refracción sísmica en el área del dique y el vaso y un programa de ensayos de mecánica de suelos. El dique principal se ubica sobre un extenso afloramiento de rocas volcánicas.

En abril de 2008, OM Ingeniería y Laboratorio S.R.L. desarrolló el proyecto de recrecimiento del depósito de relaves no. 3 hasta la cota 4,690 msnm, alcanzando una altura máxima de 72 metros.

El crecimiento de la presa de relaves no. 3 Compañía Minera Casapalca S.A., es por el método aguas abajo, relleno con material de préstamo.

2.1.2 Antecedentes Internacionales

Una breve revisión de la evolución del manejo de relaves a nivel mundial nos proporciona antecedentes útiles para comprender la tecnología actual. Aunque se sabe que el oro y la plata ya habían sido explotados por los Incas en tiempos pre-colombinos, la historia documentada de la minería en el Perú data de la conquista por Pizarro en 1535. A través del viejo y nuevo mundo en ese entonces, el oro era extraído por reducción directa (fundición) de minerales excepcionalmente ricos, pero principalmente por amalgamación con mercurio. La amalgamación de los minerales de oro como son descritos por agrícola en 1556 (y posteriormente extendida a la plata a fines del siglo XVI) empleaba molinos de mineral impulsados por caballos para moler el mineral en un patio circular o «arrastra», algunas veces en adición a molinos primitivos cuya energía era proporcionada por caídas de agua donde esta fuera disponible. Desde el punto de vista ambiental, la cantidad de roca chancada y de desmonte fue pequeña y se hicieron esfuerzos para recuperar y conservar el mercurio, el cual era casi tanpreciado como el mismo mineral. Sin embargo, grandes cantidades de mercurio permanecen distribuidas alrededor de la ubicación de las viejas minas de plata en el Perú y constituyen un serio riesgo ambiental, aún hoy en día.

Estos asuntos fueron litigados en muchos distritos mineros de Norteamérica y Europa entre 1900 - 1930, lo cual, en forma gradual, determinó el cese de la descarga descontrolada de relaves y dio paso a la construcción de algunas de las primeras presas para almacenar relaves. Muchas de estas presas originales sirvieron tanto para la captura de relaves en corrientes de agua como para almacenar agua para los procesos de flotación durante los períodos de sequía. Sin embargo, ellos fueron a menudo, construidos a través del cauce de los arroyos, con precauciones limitadas para soportar inundaciones, por lo cual muy pocas presas sobrevivieron por largo tiempo.

Sin el moderno equipo mecanizado de movimiento de tierra, era imposible la construcción de presas de tierra convencionales para almacenar relaves de cualquier operación minera de esta era. Como resultado, los mineros desarrollaron un procedimiento de construcción manual, conocido actualmente como el método «aguas arriba», donde un depósito con dique bajo era inicialmente llenado con relaves depositados hidráulicamente luego elevado paulatinamente mediante la construcción de bermas bajas encima y detrás del dique del nivel anterior.

Este procedimiento manual de construcción permanece en uso en muchas minas del Perú aún hoy día. A nivel mundial, el abandono de este método se produjo a raíz de la falla sísmica de la presa de relaves Barahona en Chile en 1928, la misma que fue reemplazada utilizando el método más estable de «aguas abajo» y que fue posible mediante el uso de «ciclones» para separar del flujo la fracción de tamaño grueso (arenas) para la construcción de la presa. Alrededor de 1940 la disponibilidad de equipo de movimiento de tierras de gran capacidad, especialmente en las minas de tajo abierto, hizo posible la construcción de presas de relaves de tierra, compactadas en una forma similar a la construcción convencional de represas de agua y con el correspondiente grado de seguridad. (Minem, 2015).

2.2 Marco conceptual

2.2.1 Depósito de relaves

Un depósito de relaves es una estructura que se construye para mantener la forma segura las altas concentraciones de desechos tóxicos, provenientes de una planta de beneficio de minerales.



Figura 1. Vista en planta de un depósito de relaves.

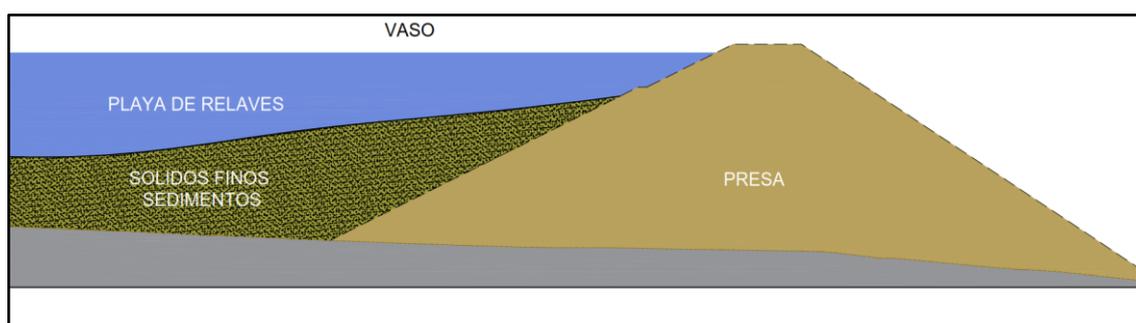


Figura 2. Vista en sección de un depósito de relaves.

2.2.2 Tipos de depósito de relaves

Presa de relave.- Depósito en el cual el muro es construido por la fracción más gruesa del relave compactado, proveniente de un hidrociclón (operación que separa sólidos gruesos de sólidos más finos, mediante impulsión por flujo de agua). La parte fina, denominada Lama, se deposita en la cubeta del depósito.

Embalse de relave.- Es aquel depósito donde el muro de contención está construido de material de empréstito (tierra y rocas aledañas) y se encuentra impermeabilizado en el coronamiento y en su talud interno. También se llaman embalses de relaves aquellos depósitos ubicados en alguna depresión del terreno en que no se requiere construcción de un muro de contención.

Relave espesado.- Depósitos en el que la superficie es previamente sometida a un proceso de sedimentación, en equipo denominado espesador, que favorece la sedimentación de los sólidos, con el objetivo de retirar parte importante del agua contenida, la que puede ser re-utilizada para reducir el consumo hídrico de fuentes de agua limpia. El depósito de relave espesado se construye de forma tal que impida que el relave fluya a otras áreas distintas a las del sitio autorizado, y contar con un sistema de piscinas de recuperación de agua remanente que pudiese fluir fuera del depósito.

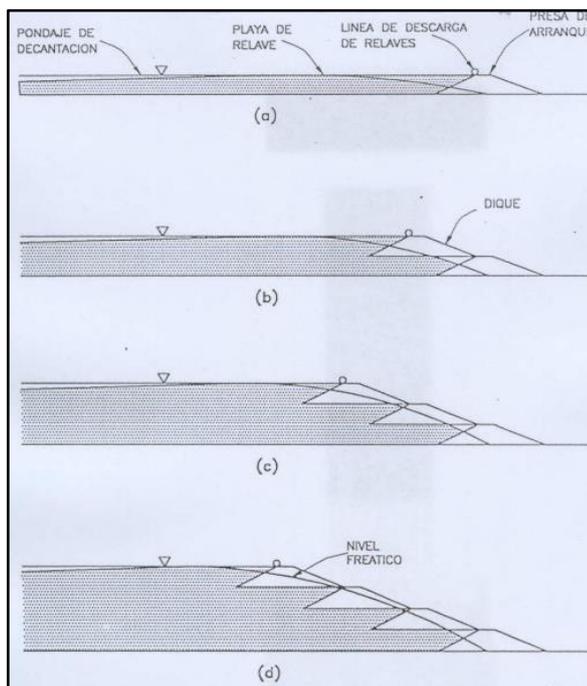
Relave filtrado.- Es un material que contiene menos agua, ya que pasa por un proceso de filtrado, para asegurar así una humedad menor a 20 %.

Relave en pasta.- Es un sólido que contiene partículas finas y bajo contenido de agua, de tal manera que la mezcla tenga consistencia espesa, similar a una pulpa de alta densidad.

2.2.3 Métodos de crecimiento de presas de relaves

Método aguas arriba.- En la figura 3 se muestra el método de crecimiento aguas arriba. 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 a. La playa formada viene a ser la fundación para un segundo dique perimetral como se muestra en la figura b. Este proceso continua 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.

Figura 3. Método aguas arriba

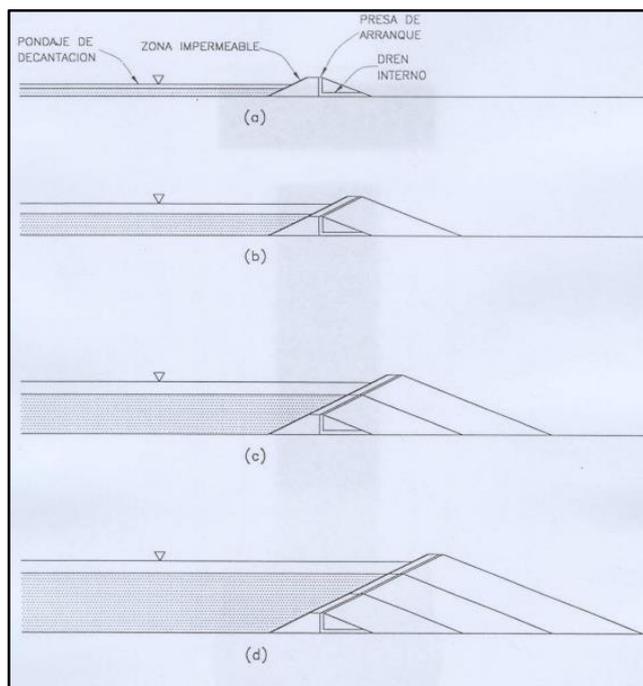


Fuente: (Nova, 2015)

Conforme lo dispuesto en el artículo 77° del Reglamento de Protección y Gestión Ambiental para las Actividades de Explotación, Beneficio, Labor General, Transporte y Almacenamiento Minero, aprobado por decreto supremo N° 040-2014-EM, está prohibida la construcción de presas de relave con el método aguas arriba, sin embargo existen otros métodos, tales como de línea central y método aguas abajo.

Métodos de aguas abajo.- En la figura 4 se observa el método de crecimiento Aguas Abajo. Inicialmente los relaves son descargados en el depósito formado por una presa de arranque, figura a. Las etapas de crecimiento que se observan en las figuras 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).

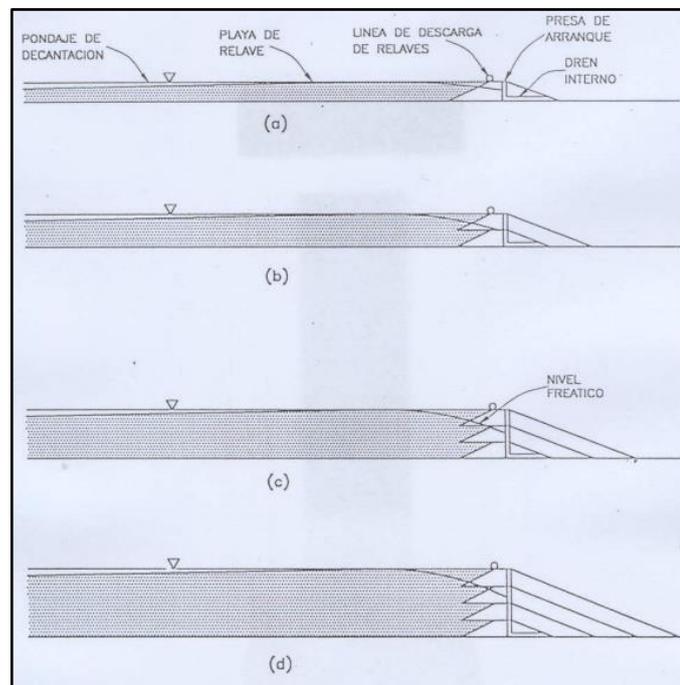
Figura 4. Método aguas abajo.



Fuente: (Nova, 2015)

Métodos 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 (ver figura 5), 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.

Figura 5. Método línea central.



Fuente: (Nova, 2015)

2.2.4 Componentes principales de un depósito de relaves

Vaso.- Es el área de almacenamiento donde se deposita los relaves finos (residuos tóxicos). Es la parte más importante en los depósitos de relaves.

Dique principal.- es el dique que delimita el vaso, contiene los relaves depositados y es el componente más importante en cuanto a la estabilidad física y seguridad del depósito.

Impermeabilización del vaso del depósito.- Se impermeabiliza el área del vaso del depósito para impedir filtraciones de aguas contaminadas y estos a su vez deben ser conducidas mediante drenes a una poza donde serán tratados o recircular a la planta.



Figura 6. Impermeabilización del vaso del depósito de relaves con geomembrana.

Borde libre.- Se designa así, a la distancia vertical entre de cota de la cresta del dique y la cota a la que se encuentran la altura máxima del relave fino y/o inundación del agua dentro del vaso.

Dique de arranque.- Es un muro que es construido al inicio o primera fase para la construcción de un depósito de relaves, el cual es impermeable ante filtraciones y debe ser construido con material de préstamo.

Sistema de drenaje.- El sistema de drenaje tiene el fin de captar la infiltración en el fondo de las arenas del depósito y dirigitas a la poza de colección de drenajes. El sistema de drenaje de infiltración minimiza la carga en la geomembrana.

Sistema de sub drenaje.- El sistema de sub drenaje de agua subterránea se instalará a fin de coleccionar flujos de filtraciones y de agua subterránea debajo del revestimiento del vaso del depósito.

Canal de coronación.- Son canales que se construyen en la parte superior, para captar aguas procedentes de las precipitaciones y escorrentía superficiales, siguiendo el perímetro del depósito y así impedir que ingresen a la presa de relaves.

2.2.5 Parámetros geotécnicos del depósito de relaves

Análisis granulométrico de suelos por tamizado.- Según se indica en la norma (ASTM-D-422 MTC E107-200) este ensayo tiene por objeto determinar los diferentes tamaños de las partículas de un suelo y obtener la cantidad expresada en tanto por ciento de éstas que pasan por los tamices de la serie empleada en el ensayo hasta el 0.08 mm (tamiz N° 200 ASTM).

En cuanto a la cantidad de muestra necesaria para efectuar este ensayo la norma establece la cantidad mínima de muestra a ensayar para que sea representativa en función del tamaño máximo de partícula de la misma estando comprendida entre 0.5 y 5 Kg.

Mediante este ensayo se va a obtener la curva granulométrica del material ensayado para lo cual se procede a pasar la muestra previamente cuarteada por una serie de tamices con una luz de malla que puede ir desde los 100 hasta los 0.08 mm.

Tras el correspondiente vibrado que puede ser manual o automático se pesa la cantidad de material retenido en cada uno de los tamices calculándose así su tanto por ciento. Por último se dibuja la curva acumulada de lo que pasa por cada tamiz considerado, dando lugar a la curva granulométrica.

Para las partículas que pasan por el tamiz de luz 0.08 mm, lo que se suele denominar “finos” o “pasa”, no tiene sentido usar tamices con luces inferiores debido a que hace falta mucho tiempo para separar las partículas y a las dificultades de fabricación y mantenimiento de tamices tan finos. (Terzaghi & Peck, 1975).

Límites de consistencia.- Se trata en realidad de dos ensayos de laboratorio, el de “Determinación del límite líquido de un suelo por el método del aparato de Casagrande ASTM-D-423 MTC E110-2000” y el de “Determinación del límite plástico de un suelo ASTM-D-424 MTC E111-2000”. Mediante estos dos ensayos se determinarán las propiedades plásticas del terreno permitiendo conocer su límite líquido, límite plástico e índice de plasticidad.

Estos ensayos se solicitan al laboratorio como uno solo bajo el nombre de “límites de consistencia” llevándose a cabo la realización de los dos. (Terzaghi & Peck, 1975).

Humedad natural.- La realización de este ensayo viene regulada por la norma ASTM-D-2216 MTC E108-2000 “Determinación de la humedad de un suelo mediante secado en estufa”, según la cual tiene por objeto la determinación de la humedad de un suelo mediante secado en una estufa. (Braja , 2006).

Sistema de Clasificación Unificada de Suelos (SUCS).- Esta es la clasificación utilizada para agrupar los suelos en todos los trabajos geotécnicos y se basa en la granulometría del material y en su plasticidad. Es decir que para clasificar cualquier suelo, según esta clasificación necesitaremos haber efectuado los ensayos de Análisis granulométrico y límites de consistencia para la clasificación del tipo suelo que se está ensayando.

La primera división que se realiza es la siguiente:

Suelos de grano grueso: cuando pasa menos del 50 % en peso por el tamiz 200 (0.074 mm).

Suelos de grano fino: cuando pasa más del 50 % en peso por el tamiz 200.

Suelos de estructura orgánica: identificables por el olor, el color negruzco y el tacto esponjoso. Son suelos altamente compresibles (Pt)

Los suelos de grano grueso se dividen en:

Gravas (G): cuando pasa menos del 50 % en peso por el tamiz N° 4 (5 mm).

Arenas (S): cuando pasa más del 50 % en peso por el tamiz N° 4.

Además, las gravas y las arenas se pueden subdividir en más clases en función del contenido de finos:

Cuando el porcentaje en peso que pasa por el tamiz 200 es inferior al 5 % serán gravas o arenas limpias designándose con la segunda letra W o P (a continuación de G o S) en función de si están bien gradadas (W) o no (P). Para distinguir si se tratan de GW, SW o GP, SP se calcularán los siguientes índices:

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

Si $C_u > 4$ y $1 < C_c < 3$ es GW o SW mientras que si no se cumple alguna de las dos condiciones será GP o SP.

Cuando el porcentaje en peso que pasa por el tamiz 200 es superior al 12 % serán gravas o arenas con finos, designándose con la segunda letra M o C (a continuación de G o S) en función de la plasticidad de estos finos. Si su representación en la carta de Casagrande se sitúa por encima de la línea A o su índice de plasticidad es mayor que 7 serán GC o SC. Mientras que si cae por debajo de la línea A o bien su índice de plasticidad es menor que 4 serán GM o SM.

En el caso de que el porcentaje en peso de muestra que pasa por el tamiz 200 este será comprendido entre 5 y 12, se requiriere doble símbolo sin posibilidad de definir entre uno u otro para su clasificación.

Para clasificar los suelos de grano fino se representan los resultados de la determinación de los límites de consistencia (Límite líquido e índice de plasticidad) en la carta de plasticidades de Casagrande. En dicho diagrama la muestra queda representada como un punto dentro de una de las zonas del diagrama. Estas zonas están identificadas por dos letras indicando la primera de ellas el tipo de material de que se trata:

- M: corresponde a limo inorgánico.
- C: corresponde a arcillas inorgánicas.
- O: corresponde a limos o arcillas de gran contenido orgánico.

La segunda letra hace referencia a su plasticidad de la siguiente manera:

- L: indica baja plasticidad cuando el límite líquido de la muestra es inferior a 50.
- H: indica alta plasticidad, cuando el límite líquido de la muestra es superior a 50.

Observando la carta de plasticidades de Casagrande, se puede observar una zona de indefinición entre los valores de índice de plasticidad 4 y 7, en los cuales se deja la nomenclatura doble CL-ML sin posibilidad de resolución. (Terzaghi & Peck, 1975).

Proctor modificado.- Actualmente existen muchos métodos para reproducir al menos teóricamente en laboratorio las condiciones dadas de compactación en terreno. Históricamente el primer método respecto a la técnica que se utiliza actualmente como prueba proctor estándar. El más empleado actualmente es la denominada prueba proctor

modificado en el que se aplica mayor energía de compactación que el estándar siendo el que está más de acuerdo con las sollicitaciones que las modernas estructuras imponen al suelo. También para algunas condiciones se utiliza el que se conoce como proctor de 15 golpes.

Con este procedimiento de compactación Proctor estudió la influencia que ejercía en el proceso el contenido inicial de agua de suelo. Observó que a contenidos de humedad crecientes a partir de valores bajos se obtenían más altos pesos específicos secos y por lo tanto mejores compactaciones de suelo, pero que esa tendencia no se mantenía indefinidamente, sino que al pasar la humedad de un cierto valor los pesos específicos secos obtenidos disminuían, resultando peores compactaciones en la muestra. Es decir que existe una humedad inicial denominada humedad óptima que produce el máximo peso específico seco que puede lograrse con este procedimiento de compactación y por consiguiente la mejor compactación del suelo. (Terzaghi & Peck, 1975).

Contenido de humedad y esfuerzo cortante de material granular húmedo.- Una materia granular húmedo comprende tres fases como son: sólido, líquido y vacíos. Según (Juárez B. & Rico R., 2005) La fase sólida está formada por las partículas minerales del suelo (incluyendo la capa sólida absorbida); la líquida por el agua (libre específicamente), aunque en los suelos pueden existir otros líquidos de menor significación; la fase gaseosa comprende sobre todo el aire. La capa viscosa del agua adsorbida que presenta propiedades intermedias entre la fase sólida y líquida, suele incluirse en ésta última, pues es susceptible a desaparecer cuando el suelo es sometido a una fuerte evaporación.

Influencia de la compactación sobre los esfuerzos del terreno.- La relación humedad - peso específico para un suelo determinado depende del grado y tipo de compactación. Cuanto mayor es la energía, mayor es el peso específico máximo y menor la humedad óptima. Además al aumentar la humedad de moldeo, la influencia de la energía de compactación en el peso específico tiende a disminuir. Los puntos de peso específico seco máximo y humedad óptima para las diversas energías de compactación tienden a ser situados según una línea que va en la misma dirección general que las líneas de grado de saturación constante, (Juárez B. & Rico R., 2005).

Influencia de la compactación sobre las propiedades mecánicas del suelo.- La naturaleza y magnitud de compactación en un suelo de grano fino tienen una influencia importante sobre el comportamiento ingenieril del suelo compactado. El aumento de la humedad de amasado da lugar a una reducción de la permeabilidad por el lado seco del óptimo y a un ligero aumento de la permeabilidad por el lado húmedo. El aumento de la energía de compactación reduce la permeabilidad, ya que aumenta el peso específico seco y, por lo tanto, disminuye los vacíos disponibles para el flujo de agua, aumentando la orinecían de las partículas. (Juáres B. & Rico R., 2005).

Permeabilidad.- La permeabilidad de un relave es un factor clave en su estabilidad física, debido a que evita la formación de nivel freático al interior del muro y se minimiza el riesgo de licuación de las arenas. Para lograr arenas permeables se requiere limitar su contenido de finos, preferiblemente $< 20\%$ y se requiere no alcanzar niveles elevados de compactación. Normalmente no se toma en cuenta la granulometría de las arenas, debido a que son muy similares en la mayoría de las presas y presentan una banda granulométrica muy estrecha.

El rango de permeabilidad que normalmente tienen las arenas de relaves varía entre 10^{-5} a 10^{-6} m/s. Valores de permeabilidad del muro resistente menores a 10^{-6} m/s en general no son recomendables. En el rango de 10 a 30 % de finos la variación de la permeabilidad suele ser de 2 a 5 veces para una misma densidad; sin embargo, para una variación de la densidad relativa de 50 a 60 % puede significar una disminución de la permeabilidad de 10 veces.

Ensayo de Lefranc.- El ensayo consiste en medir el caudal inyectado o bien la subida o bajada del nivel de agua que se produce en el taladro a lo largo de un tiempo determinado de observación. Dependiendo del método, el caudal debe regularse con precisión del 3 %, las medidas 1 a 2 mm y el tiempo con un segundo. Las medidas iniciales no son representativas y no deben considerarse. Las lecturas más continuas, durante el proceso de inyección y saturación de agua, son los más representativos en suelos y roca muy fracturada.

El ensayo Lefranc se utiliza para medir la permeabilidad de suelos y roca fracturada, bajo débil gradiente y en régimen permanente. También se puede efectuarse en régimen

transitorio, siendo su interpretación diferente. (Comité Nacional Español de grandes presas, 1999).

Cohesión.- Es la atracción entre partículas, originada por las fuerzas moleculares y las películas de agua. Por lo tanto la cohesión de un suelo variará si cambia su contenido de humedad. La cohesión se mide kg/cm^2 . Los suelos arcillosos tienen cohesión alta de $0,25 \text{ kg/cm}^2$ a 1.5 kg/cm^2 o más. Los suelos limosos tienen muy poca y en las arenas la cohesión es prácticamente nula. (Terzaghi K., 2002).

Fricción Interna.- Es la resistencia al deslizamiento causado por la fricción que hay entre las superficies de contacto de las partículas y de su densidad. Como los suelos granulares tienen superficies de contacto mayores y sus partículas, especialmente si son angulares presentan una buena trabazón tendrán fricciones internas altas. En cambio los suelos finos las tendrán bajas puesto que no tienen partículas angulares ni uniformes.

La fricción interna de un suelo está definida por el ángulo cuya tangente es la relación entre la fuerza que resiste el deslizamiento a lo largo de un plano y la fuerza normal "p" aplicada a dicho plano. Los valores de este ángulo llamada "ángulo de fricción interna" varían prácticamente de 0° para arcillas plásticas cuya consistencia este próxima a su límite líquido hasta 45° o más para gravas y arenas secas compactas y de partículas angulares. Generalmente el ángulo "f" para arenas es alrededor de 30° (Terzaghi K., 2002).

2.2.6 Material de construcción del depósito de relaves

El Suelo como Material de Construcción.- En el campo de mecánica de suelos es una ciencia responde las siguientes cuestiones:

1. Comportamiento del suelo cuando es sometido a una carga externa (resistencia del suelo) deformaciones que experimenta, distribución interna de las tensiones, etc.
2. Comportamiento y calidad del suelo para su uso como material de construcción (terraplenes en vías de comunicación, estructura de materiales sueltos, presas para retención de aguas, etc.)
3. Cálculo de las acciones que un suelo ejerce sobre una estructura (acciones sobre estructuras como muros de contención de tierras, pantallas, túneles, etc.)

4. Análisis de la estabilidad de taludes naturales o artificiales como los de presas de materiales sueltos.

Origen y Formación de un Suelo.- El suelo es la capa más superficial de la corteza terrestre, proveniente por fragmentos de roca de diferente tamaño. Esta capa puede tener hasta varios cientos de metros y se distinguen en capas: La capa más superficial presenta una intensa actividad biológica (contiene microorganismos, raíces, materia orgánica, etc.), los suelos son la desintegración de los diferentes tipos de rocas que existe en la corteza terrestre se puede mencionar las rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas.

Factores que Influyen en el Comportamiento del Suelo.- Existen tres factores que influyen en el comportamiento de un suelo:

1. **Naturaleza y Composición Mineralógica.-** Los silicatos son los minerales más abundantes y forman los minerales de las arcillas. Éstas tienen una estructura laminar en capas y presentan un déficit de carga negativa en su superficie que es compensado por cationes positivos absorbidos que compensan el déficit creando una doble capa difusa. Entre un mineral de arcilla y otro existe una fuerza de repulsión aunque también puede ser de atracción (fuerzas de Van der Waals). Se pueden producir unión borde-cara.

Algunos minerales de arcilla por su estructura laminar pueden absorber mucha cantidad de agua y tienen un poder de retención de la misma. Esta agua produce un incremento de volumen en el mineral que disminuye drásticamente cuando se seca (retracción). Se trata por tanto de suelos expansivos muy perjudiciales para la construcción porque los incrementos de volumen no se producen de manera uniforme es decir se originan empujes relativos de una zona a otra y los procesos de retracción producen importantes asientos.

De cualquier modo no todos los minerales de arcilla son igual de expansivos. Por otro lado cabe mencionar los sulfatos que son muy solubles pudiendo ser disueltos y arrastrados por los flujos de agua subterránea perdiéndose material y aumentando consecuentemente la porosidad. A veces se llega a formar oquedades pudiendo producir el colapso de una estructura. Los minerales laminares tenemos caolinita, esméctica y montmory llonita. (Sowers , 1972).

2. Textura.- Se trata de la distribución por tamaños de las partículas de un suelo. Siguiendo la clasificación propuesta por la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), este se clasificará dependiendo de su textura en arcilla, limo, arena, grava y cantos rodados. La textura afecta al comportamiento del suelo porque al aumentar el tamaño de las partículas también aumenta la resistencia de éste. La textura también influye en la conductividad hidráulica; los materiales finos tienen baja conductividad hidráulica. A la fracción de arenas, gravas y cantos rodados se le suele denominar fracción gruesa y a la fracción de limo y arcilla se le denomina fracción fina.

3. Estructura. Es la disposición relativa de unas partículas respecto a otras. En los suelos granulares la estructura viene determinada por la forma de las partículas, mientras que en los suelos de textura fina depende del tipo de fuerzas que predomina, la estructura de los suelos depende de la mineralogía de donde proviene, la estructura de los suelos depende del origen del tipo de roca (ígneas, sedimentaria y metamórfica), cada suelos desintegrado por diversos agentes de la naturaleza tiene diferente estructura. (Terzaghi K., 2002).

2.2.7 Prospección geofísica

Prospección geofísica determina indirectamente las condiciones geoelectricas del subsuelo (resistividad y espesor) de los diferentes horizontes litológicos identificados y distribuidos a lo largo de secciones y según ello diferenciar lo siguiente:

- Litología del subsuelo.
- Horizontes saturados de agua.
- Resistividad y espesor de las capas geoelectricas.
- Permeabilidad de los suelos en términos cualitativos.
- Profundidad del basamento impermeable.
- Identificación de cavernas, fallas geológicas, etc.

Método geofísico método geofísico de sondaje eléctrico vertical (SEV).- Los métodos eléctricos de corriente continua son los más utilizados en las investigaciones geotécnicas y de aguas subterráneas, asimismo constituyen un apoyo muy eficiente para el geólogo. El agua contenida en las capas del subsuelo tiene suficientes sales para asegurar la conducción de la corriente eléctrica aplicada al suelo; la medida de la resistividad eléctrica

refleja la aptitud de los terrenos al permitir el paso de la corriente en relación con la presencia del agua.

Hay tres factores principales que influyen directamente sobre la resistividad de un terreno:

- **La resistividad del agua:**

A menor resistividad del agua (más salada), menor resistividad de la roca.

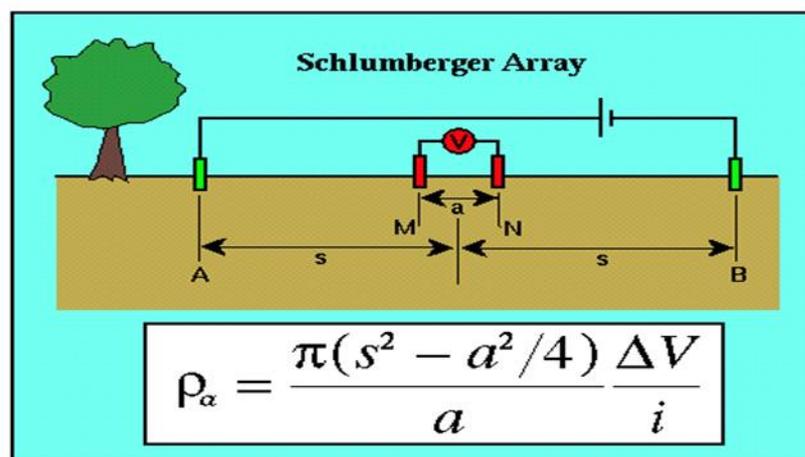
- **La arcillosidad del terreno:**

A mayor arcillosidad, menor resistividad.

El sondeo eléctrico vertical permite conocer la distribución de las diferentes capas geoelectricas. Es decir, permite determinar la resistividad del subsuelo con la profundidad, haciendo mediciones a lo largo de una línea dada en incrementos crecientes de distancia entre los electrodos de emisión o de corriente A y B, luego midiendo la diferencia de potencial producido por el campo eléctrico así formado, entre otro par de electrodos llamados electrodos de recepción o de potencial M y N.

La configuración de este método de medición se muestra en la siguiente figura.

Figura 7. Esquema del método de resistividad eléctrica.



Donde:

- Pa : Resistividad Aparente (ohmio-metro)
 ΔV : Diferencia de potencial (Voltio)
 I : Intensidad de corriente (Amperios)
 K : Coeficiente geométrico
 AB : Electrodos de corriente
 MN : Electrodos de potencial

Donde Pa se mide en ohmios-metros, la intensidad de corriente (I) en mili-amperios, la diferencia de voltaje (v) en mili-voltios y a es el factor de penetración que depende del espacio de los electrodos.

El equipo utilizado para la operación de campo fue el mismo que se empleó para la ejecución de los sondajes eléctricos

Resistividad de rocas y aguas.- En la siguiente tabla se muestra los rangos de resistividad de rocas y materiales.

Tabla 1: *Rango de resistividad de rocas y materiales*

Rocas ígneas	Resistividad en ohm-m
Basalto	200 - 20000
Granito	300 - 20000
Diabasa	200 - 20000
Diorita	50000 - 60000
Gabro	100 - 15000
Gneiss	200 - 34000
Lava	120 - 50000
Pórfido	100 - 150000
Cuarcita	100 - 2000
Esquisto	500 - 10000
Serpentina	200 - 3000
Gneiss grano alterado	100 - 1000
Gneiss grano sano	1000 - 10000
Rocas sedimentarias	Resistividad en ohm-m
Arcilla	2 - 15
Conglomerado	23 - 25000
Marga	20 - 100
Arena	50 - 150
Arenisca	70 - 3000
Aguas	Resistividad en ohm-m
Agua de mar	0.2 - 2
Acuíferos aluviales	10 - 30
Aguas de fuentes	50 - 100
Arenas y gravas con agua dulce	50 - 500
Arenas y gravas con agua salada	0.5 - 3

2.2.8 Análisis de estabilidad de taludes

Generalidades.- Para el análisis de estabilidad de taludes del dique se toma en cuenta los siguientes factores: geometría del talud, parámetros geológicos-geotécnicos, carga por acción del sismo, condiciones de flujo de agua, entre otros. Aunque no todos estos

factores se pueden cuantificar en un modelo matemático; el factor de seguridad calculado se ha obtenido asumiendo superficies probables de falla, el cual permite tener una idea del comportamiento real del talud.

En el análisis de estabilidad de taludes se utiliza el método de equilibrio límite que se basa en evaluar la resistencia al deslizamiento de un talud, tomando en cuenta ciertas hipótesis en relación al mecanismo de falla, condiciones de equilibrio, nivel freático, resistencia cortante, etc.

El método de equilibrio límite supone que en el caso de una superficie de falla las fuerzas actuantes y resistentes son iguales a lo largo de la superficie de falla, esta condición equivale a un factor de seguridad de 1.0; sin embargo, existen valores de factores de seguridad mínimos para considerar que un talud es estable, los cuales varían según las condiciones de análisis.

Metodología del equilibrio límite.- El análisis de estabilidad de taludes, se utiliza el programa de computo SLIDE (Rocscience, versión 6.0) Este es un programa permite desarrollar la geometría del talud interactivamente y la definición de los tipos y propiedades de los materiales.

El análisis para calcular el factor de seguridad se lleva a cabo de manera bidimensional usando el concepto de equilibrio límite, aproximadamente el problema a un estado de deformación plana. El programa tiene la opción de utilizar diferentes métodos de análisis de estabilidad de manera simultánea, sin embargo, el más recomendable se utiliza el Método Bishop empleando dovelas para el cálculo de superficies de falla.

La superficie de falla crítica es definida como aquella que proporciona el menor factor de seguridad, y fue encontrada en forma interactiva modificando las condiciones de búsqueda de la misma evaluándose superficies de falla tanto circulares, como en bloque.

Como hipótesis del análisis se considera que las propiedades de los materiales que conforman las diferentes estructuras analizadas, son homogéneas e isotrópicas y que el colapso se produciría como resultado de fallas simultáneas a lo largo de la superficie de deslizamiento. Cada material tiene sus propiedades y características físicas y mecánicas.

El análisis pseudo-estático somete una masa deslizable de dos dimensiones a una aceleración horizontal igual al coeficiente de un sismo multiplicado por la aceleración de la gravedad.

El método usado para los análisis pseudo-estáticos es el indicado por Hynes-Griffin y Franklin (1984), el cual requiere la reducción de los parámetros de resistencia cortante en un 20% para aquellos materiales sujetos a un incremento de la presión de poros durante condiciones cíclicas (terremotos).

Análisis seudoestático.- El método de equilibrio límite considera un análisis seudoestático, mediante la inclusión de los efectos del sismo considerando que las fuerzas inducidas por éste son incorporadas como fuerzas horizontales en el análisis. La magnitud de la fuerza horizontal - FH es tomada igual al peso de la masa que desliza, multiplicada por un coeficiente k_h que “representa” al sismo, transformándolo en un problema seudoestático. Aunque en la realidad el sismo impone fuerzas horizontales y verticales, diversos autores recomiendan no incluir estas últimas en el análisis.

El coeficiente sísmico k_h , es un valor empírico que depende entre otros factores, de la aceleración horizontal máxima de campo libre, las características del sismo (magnitud, profundidad, contenido de frecuencias, etc.), dimensiones de la obra (volumen potencial masa deslizante y condiciones de borde), existencia de poblados, instalaciones y equipos que puedan verse afectados.

Coefficiente de Seguridad.- El coeficiente de seguridad (también conocido como factor de seguridad) es el cociente entre el valor calculado de la capacidad máxima de un sistema y el valor del requerimiento esperado real a que se verá sometido. Por este motivo es un número mayor que uno que indica la capacidad en exceso que tiene el sistema por sobre sus requerimientos.

En este sentido, en ingeniería, arquitectura y otras ciencias aplicadas, es común y en algunos casos imprescindible que los cálculos de dimensionado de elementos o componentes de maquinaria, estructuras constructivas, instalaciones o dispositivos en general incluyen un coeficiente de seguridad que garantice que bajo desviaciones aleatorias de los requerimientos previstos exista un margen extra de prestaciones por encima de las mínimas estrictamente necesarias.

Los coeficientes de seguridad se aplican en todos los campos de la ingeniería tanto eléctrica como mecánica o civil, etc. (Bishop, 1995).

Factores de seguridad mínimos.- Los valores de seguridad mínimos considerados en este estudio son aquellos recomendados por la “Guía Ambiental para la Estabilidad de Taludes de Depósitos de Residuos Sólidos Provenientes de Actividades Mineras” del Ministerio de Energía y Minas (MEM) para la condición de cierre y para condiciones de operación se utilizó valores relativamente flexibles que cumplen con las normas internacionales de estabilidad de presas. Los valores mínimos se indican en la Tabla N° 02.

Tabla 2: *Valores mínimos permisibles del factor de seguridad*

Caso	Factor de Seguridad Mínimo Permissible
Análisis Estático para Cierre	1.5
Análisis Estático para Operación	1.3
Análisis Pseudo-Estático para Operación	1.0

2.2.9 Aspectos sísmicos del área

Generalidades.- El Perú está considerado como una de las regiones de más alta actividad sísmicas. Forma parte del cinturón circunpacífico, de esta forma es necesario considerar la influencia de los sismos sobre la estabilidad del talud de la relavera.

Zonificación Sísmica.- Dentro del territorio peruano se ha establecido diversas zonas sísmicas, las cuales presentan diferentes características de acuerdo a la mayor o menor ocurrencia de los sismos. Según el mapa de zonificación sísmica propuesto por la nueva norma de diseño sismorresistente E-030 del reglamento nacional de construcciones (1997), presentado en la Figura 8, el área de estudio se encuentra comprendida en la zona 3 clasificada como zona de mediana sismicidad.

Intensidad.- Según el análisis sismo tectónico, existen en el mundo dos zonas muy importantes de actividad sísmica conocidas como el Circulo Alpino Himalayo y el Circulo Circumpacifico. En esta última, donde se localiza el Perú, han ocurrido el 80 % de los eventos sísmicos en el mundo. Por lo tanto, nuestro país está comprendido entre una de las regiones de más alta actividad sísmica.

Evaluación probabilística de peligro sísmico.- Se han realizado varias evaluaciones probabilística de peligro sísmico utilizando el método de Cornell McGuire (1976), los sismos son modelados ya sea como áreas de fuerte sísmica o como zonas de fuerte lineal (fallas). Los sismos son tratados como eventos independientes ubicados en fuentes puntuales aleatorias. La relación magnitud-recurrencia y magnitud máxima para cada zona son estimadas a partir de la sismicidad registrada dentro de cada zona de fuente.

La selección del movimiento sísmico de diseño depende del tipo de obra. Para las estructuras consideradas en el proyecto se consideran periodos de retorno de 475 años para el sismo de diseño, que corresponde a estructuras con una vida útil de 50 años y un nivel de excedencia del valor de aceleración propuesto de 10%.

El peligro sísmico anual se presenta en el eje de las ordenadas de dichas figuras como la inversa del período de retorno. En la Tabla N° 2.1 muestra las máximas aceleraciones esperadas en la zona del proyecto de la concesión de beneficio Chacchulle, para períodos de retorno de 50, 100, 150, 200, 400, 500 y 1000 años.

Tabla 3: *Aceleraciones máximas esperadas (% g)*

Coordenadas-Geográficas	Periodo de retorno (Años)						
	50	100	150	200	400	500	1000
-74.06, -15.64	0.22	0.31	0.37	0.42	0.49	0.52	0.60

La selección del movimiento sísmico depende del tipo de obra. Para el proyecto, se considera un período de retorno de 500 años para el sismo de diseño que corresponde a estructuras con vida útil de 50 años y un nivel de excedencia del valor de aceleración propuesto de 10%, mostrando que la aceleración máxima pico instrumental esperada para el presente estudio es de 0.52g y de 0.60g para periodo de retorno mayores de 500 años y 1000 años respectivamente.

Coefficiente sísmico.- Es aceptada internacionalmente, que el coeficiente sísmico a ser considerado en el análisis de condiciones pseudo-estáticas de diseño de taludes, sea obtenido como una fracción que varía entre 1/2 a 1/3 de la máxima aceleración esperada. Esta recomendación es consistente con las recomendaciones del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (U.S. Army Corps of Engineers).

El estudio probabilístico modela las fuentes sismogénicas como áreas, ya que no existen datos suficientes para modelar como fuentes lineales. Para el sismo extremo de las obras principales se ha determinado una aceleración máxima de 0.37g. considerando un periodo de retorno de 150 años esto es para periodos de operación de la planta. Una aceleración de 0.52g para un periodo de retorno de 500 años, siendo para planes de cierre.

En consecuencia, para el caso del análisis pseudo-estático de estabilidad del depósito de relaves de Chacchuille IV, se considera un valor de aceleración de diseño horizontal de 50% de aceleración pico para operación, es decir, con un periodo de retorno de 150 la aceleración de diseño resulta 0.18g y para condiciones de cierre (largo plazo), se considera un coeficiente de 0.21g equivalente al 40% del PGA para un sismo de 500 años de periodo de retorno.

En caso de considerar la influencia del componente vertical, de acuerdo a la norma de diseño sismorresistente E 030 (DS N° 003-2016-Vivienda) del Reglamento Nacional de Edificaciones, ésta deberá estimarse como los 2/3 del valor de la aceleración horizontal máxima.



Figura 8. Zonificación sísmica del Perú

(E.030 RNE 2016)

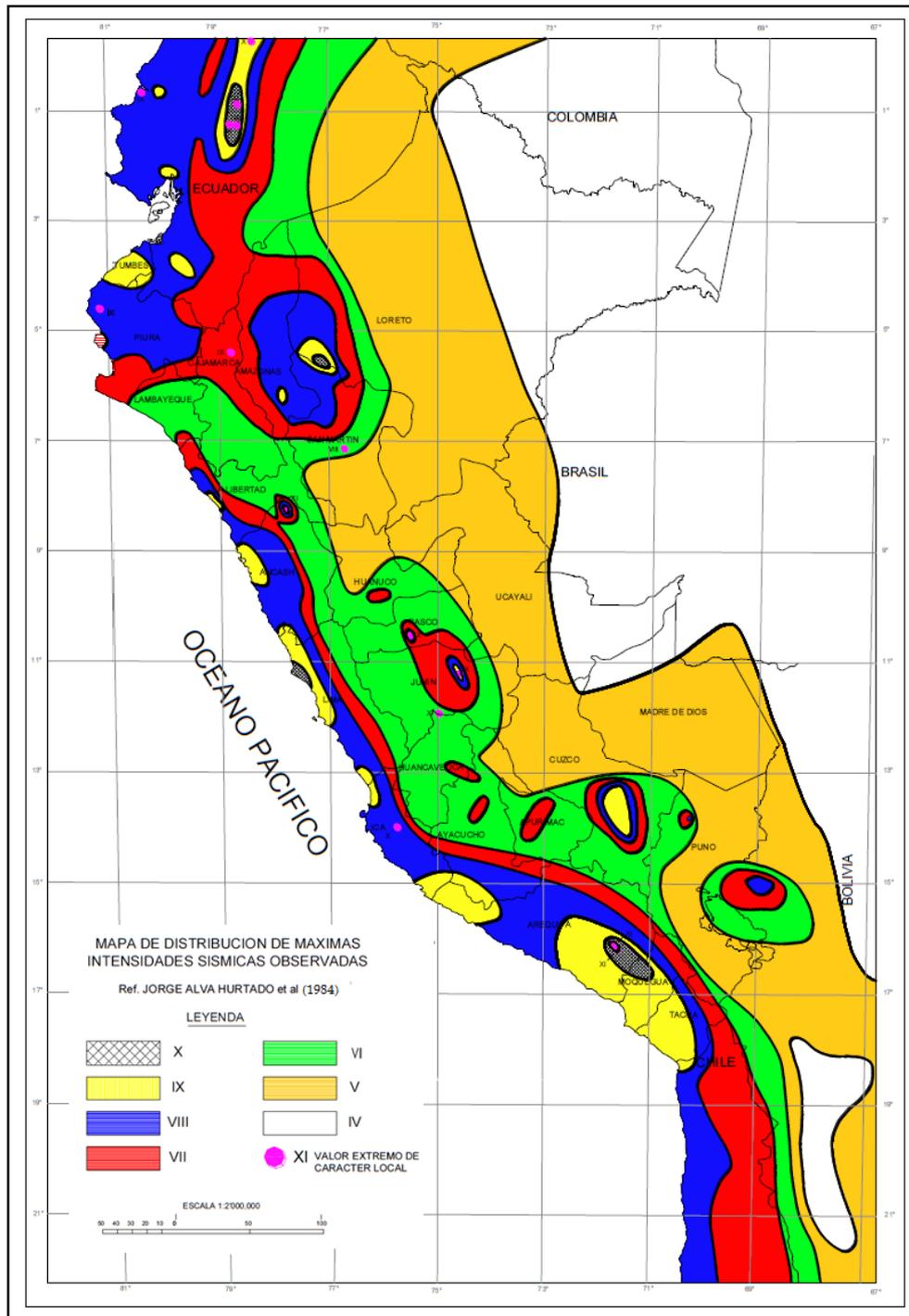


Figura 9. Mapa de distribución de máxima intensidad sísmica

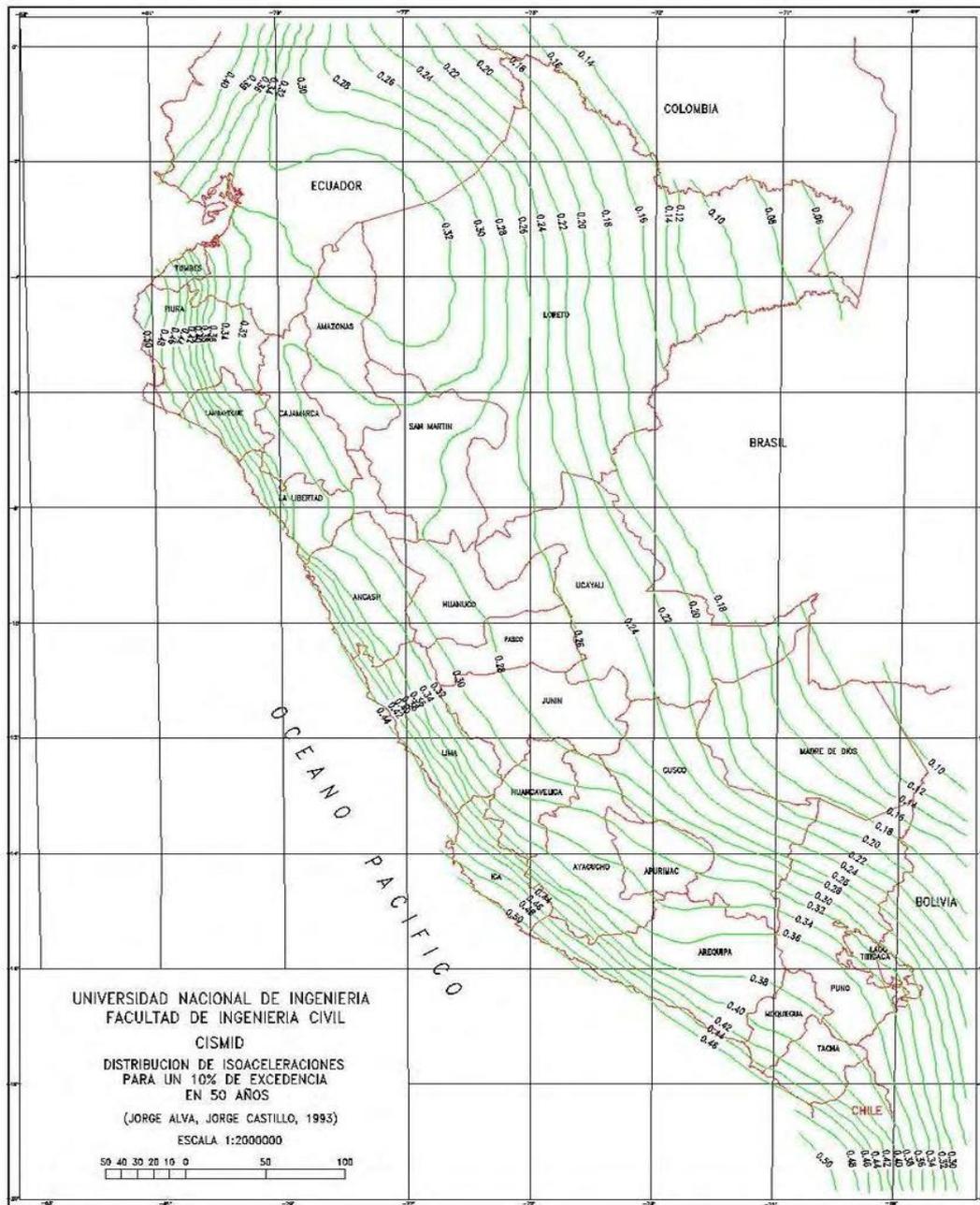


Figura 10. Mapa isoaceleraciones para 475 años de periodo de retorno

2.2.10 Software

Slide (Rocscience, versión 6.0).- Es un software de análisis de estabilidad de taludes en 2D que utiliza métodos de equilibrio límite para el cálculo de la estabilidad.

Incluye análisis de agua subterránea por elementos finitos en estado estacionario, e integra capacidades de análisis de sensibilidad, probabilísticos y análisis retrospectivos.

Su ámbito de aplicación en minería, estabilidad de presas, botaderos, desmonteras, pad de lixiviación, rellenos sanitarios, canteras, tajos y pozas.

Obra civiles, estabilidad para carreteras, edificaciones, represas, laderas, muros de contención.

Es una ayuda lo cual permite evaluar problemas geotécnicos tanto efectos externos, internos, sísmicas, etc.

AutoCAD Civil 3D.- Es una herramienta muy útil para realizar diseños y calculos en diferentes campos de la ingeniería, construcción de carreteras, diseño urbanístico, puentes, represas, canales, pozas, plataformas, depósitos de relaves, botaderos, etc.

La principal característica es que está diseñado por Autodesk para que todos los componentes del diseño estén relacionados, los objetos al ser modificados automáticamente regeneran el diseño y recalculan la información en tablas y perfiles, todo esto nos ayudará a la hora de hacer cambios en nuestra propuesta sin tener que rehacer todo el proyecto de nuevo.

2.3 Definición de términos

Viabilidad.- La viabilidad es el estudio de un proyecto de éxito, lo cual debería ser técnicamente factible, rentable, necesidad de mercado, económicamente justificable y protección al medio ambiente.

Presa: Es un muro o barrera, que puede ser construido por piedras, hormigón, material de suelo, estos se construye para contener agua, relaves y etc.

Estabilidad: estabilidad es cuando un cuerpo permanece en equilibrio, en el mismo lugar por mucho tiempo, sin sufrir deformaciones o movimientos.

Relaves: Son desechos tóxicos, mezcla de mineral molido y otros compuestos que alteran al medio ambiente y estos son depositados en presas mediante tuberías o canaletas.

Geotecnia: Es rama de la geología, recibe aportes de la ingeniería civil que se ocupa del estudio de la interacción entre el terreno y las construcciones.

Presupuesto de un proyecto: El presupuesto es el costo de un proyecto que cubre gastos para producir un bien. El fin es controlar los ingresos y gastos de un proyecto aprobado y lograr las metas deseadas del proyecto.

2.4 Hipótesis

2.4.1 Hipótesis general

Los métodos de crecimiento de depósito de relaves influyen en la viabilidad para la construcción del depósito de relaves Chacchuille IV de CIA Minera Caraveli S.A.C.

2.4.2 Hipótesis específicas

- a. Los métodos de crecimiento de depósito de relaves influyen en la estabilidad física depósito de relaves Chacchuille IV.
- b. Los métodos de crecimiento de depósito de relaves influyen en la factibilidad económica para la construcción del depósito de relaves Chacchuille IV.
- c. Los métodos de crecimiento del depósito de relaves Chacchuille IV, generan impactos al medio ambiente.

2.5 Variables

2.5.1 Definición conceptual de la variable

Los métodos crecimiento de la presa son generalmente tres: 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.

Estudiar la viabilidad de un proyecto nos permite saber que se lleve a cabo un proyecto y garantizar su rentabilidad.

2.5.2 Definición operacional de la variable

Variable Independiente (X): Métodos de crecimiento del depósito de relaves. Características geométricas de la presa de relaves el cual interviene directamente en la estabilidad física de la estructura.

Variable Dependiente (Y): Viabilidad en la construcción del depósito de relaves Chacchuille IV.

Construcción de la presa de relaves con el método de crecimiento seleccionado.

2.5.3 Operacionalización de la variable

Es un proceso de metodología que consiste en separar deductivamente las variables que comprenden el problema a investigar, iniciando de lo más general a lo específico; dividiéndose en dimensiones, indicadores, según el cuadro de cada variable.

$$Y=F(X)$$

Tabla 4: Operacionalización de Variables e indicadores

TIPO DE VARIABLE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DIMENSIONES	INDICADORES	UNIDAD DE MEDIDA
V1: X Métodos de crecimiento de depósito de relaves	Los métodos crecimiento de la presa son generalmente tres: aguas arriba, aguas abajo y línea central.	Características geométricas de la presa de relaves el cual interviene directamente en la estabilidad física de la estructura.	D2: Métodos aguas abajo	I1: Configuración geométrico	metros
				I2: Material del dique	Análisis de laboratorio
			D3: Método línea central	I1: Configuración geométrico	metros
				I2: Material del dique	Análisis de laboratorio
V2: Y Viabilidad para la construcción del depósito de relaves Chacchulle IV	Estudiar la viabilidad de un proyecto nos permite saber que se lleve a cabo un proyecto y garantizar su rentabilidad.	Construcción de la presa de relaves con el método de crecimiento seleccionado.	D1: Estabilidad física	I1: Parámetros geotécnicos	Análisis de laboratorio
			D2: Presupuesto	I1: Metrados	Análisis de partidas
				I2: Precios unitarios	Análisis de precio
D3: Impacto ambiental	I1: Guías ambientales	normas			

(Elaboración propia)

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA

4.1 Método de investigación

El método de investigación es el método científico con un enfoque cuantitativo.

4.2 Tipo de investigación

El tipo de investigación es de tipo aplicada, con un enfoque cuantitativo.

Aplicada: Porque se basa en la aplicación de conocimientos teóricos, práctico y es aplicado en el campo de la investigación.

Cuantitativo: Porque se obtiene valores de los parámetros geotécnicos de los materiales, factores de seguridad del análisis de estabilidad física y costos, para la construcción del depósito de relaves Chacchuille IV.

4.3 Nivel de investigación

El nivel de investigación es explicativo, porque nos permite obtener datos reales y aceptables para el diseño geotécnico, esto nos lleva a seguir la secuencia de normas, cálculos demostrados y confiables para llevar a cabo la construcción del depósito de relaves Chacchuille IV.

4.4 Diseño de la investigación

El diseño de investigación es cuasi-experimental, porque existe una exposición, una respuesta y una hipótesis para contrastar, la investigación no es aleatoria, aunque el factor de exposición es manipulado por el investigador.

4.5 Población y muestra

4.5.1 Población.-

La población está constituido por los depósitos de relaves construidos con métodos de crecimiento aguas abajo y línea central, existentes en la concesión de beneficio “Chacchuille” de la Cía. Minera Caraveli S.A.C. y de otras empresas mineras.

4.5.2 Muestra.-

El tipo de muestra es no probabilístico o dirigido, y la muestra es el depósito de relaves Chacchuille IV de Cía. Minera Caraveli S.A.C.

4.6 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

- Levantamiento topográfico
- Investigación de canteras
- Calicatas
- Sondeos geofísicos
- Mapeo geológico-geotécnico
- Ensayos de Campo y Muestreo.
- Se empleó la observación in situ a través de registros de observación

4.7 Procesamiento de la información

- Evaluación de los métodos de crecimiento del depósito de relaves
- Determinar el presupuesto.
- Determinar el análisis de la estabilidad del depósito de relaves.
- Evaluación del impacto ambiental.

4.8 Técnicas y análisis de datos

4.8.1 Geomorfología y caracterización geológica

Geomorfología.-En el área del proyecto se han observado, una cadena de cumbres (cerros) de relieves agrestes, y superficies erosionadas. En las zonas bajas, algunos de estos cerros se presentan con rasgos topográficos característicos de pendientes moderadas a empinadas.

El área donde se ubica el depósito de relaves Chacchulle IV está constituida íntegramente por depósitos de “conos aluviales”, formado esencialmente por sedimentación hidrodinámica (aluvial), cuyas acumulaciones sedimentarias están constituidas por un conjunto de materiales heterogéneos como: Bolonería, guijarros, fanglomerados, gravas en una matriz de arena-limosa y limolita.

Geología regional.- En el área del proyecto y alrededores, las unidades litoestratigráficas están conformados por los afloramientos rocosos de diversos ambientes de formación, los cuales se diferencian por el rango cronológico de ocurrencia en las siguientes formaciones: Depósitos aluviales; rocas intrusivas, conformadas por dioritas y microdioritas; rocas hipabisales, conformada por el complejo Bella Unión, que son rocas sub volcánicas de composición litológica muy variada.

Geología local.- El proyecto se emplazará sobre acumulaciones sedimentarias en forma de cono aluvial, que se caracterizan en una mezcla heterogénea de sedimentos sin estratificación y con distribución aleatoria de los materiales; siendo estos los guijarros angulosos, gravas gruesas, gravas con arena de naturaleza de rocas intrusivas y volcánicas; estos sedimentos están englobados dentro de una matriz arena-limosa.

El afloramiento del basamento rocoso Intrusivo y sub volcánico se encuentra infrayaciendo al aluvial.

En el tramo continuo de afloramientos, las rocas intrusivas consisten en Diorita/Microdiorita de composición cuarcífera, de grano fanerítico y textura granítica a hipidiomórfica; con minerales esenciales: Plagioclasa, de composición andesina labradorita. Además de la diorita se deriva en forma gradacional la micro diorita al producirse en profundidad un cambio termodinámico y así variando en su litofacies original.

Estas rocas se presentan con numerosas diaclasas irregulares. La roca, en algunos tramos, está bien fracturada; presentando así a los sistemas de fracturas en “shatteredzones”. Estas rocas intrusivas del basamento pertenecen al batolito de la costa, que corresponde a la super unidad Tiabaya del segmento Arequipa.

El macizo rocoso, con abertura cuyo espacio entre bloques adyacentes que está ocupado por roca descompuesta. El relleno está constituido por las sales (sulfatos, cloruros, calcio y sodio) material que se conoce como “caliche”. Grado de alteración al intemperismo; hay una decoloración moderada a intensa, lo cual indica un intemperismo de grado IV.

La roca diorita común se muestra muy fracturada y alterada, por lo tanto su comportamiento será inestable para las obras de ingeniería.



Figura 11. Mapeo geológico superficial, zona del depósito de relaves IV proyectado y el cerro muerto.



Figura 12 Mapeo geológico superficial, zona superior del depósito de relaves IV proyectado

4.8.2 Programa de investigaciones geotécnicas de campo

Trabajos de campo.- Como parte de los estudios de Ingeniería del Depósito de Relaves Chacchulle IV, en el mes de marzo de 2018, en coordinación con Compañía Minera Caraveli S.A.C., se llevó a cabo un programa de investigación geotécnica que incluyó sondeos geofísicos, mapeo geológico, sondeos geotécnicos en el emplazamiento del depósito proyectado. Los reportes de las investigaciones geotécnicas se muestran en los Anexos. Las siguientes secciones detallan las investigaciones en el emplazamiento.



Figura 13 Vista panorámica y trabajos realizados en campo del depósito de relaves Chacchuille IV proyectado

Calicatas.- El programa de exploración de campo comprendió la excavación quince (15) calicatas, denominadas CC-1 al CC-12 y EN-1, EN-6 y CN-1. Las calicatas se excavaron con retroexcavadora. Las calicatas fueron excavadas hasta alcanzar profundidades que varió entre 1.3 y 5.1 m. Las calicatas se registraron a partir del material excavado y del material expuesto en las paredes laterales y el fondo. Las profundidades se registraron a partir de mediciones tomadas en la superficie del terreno. Se recolectaron muestras alteradas, pequeñas y grandes para ensayos de laboratorio, como se observa en los registros de las calicatas y se realizaron ensayos índices de laboratorio en muestras seleccionadas.

La Tabla 3 muestra un resumen de las calicatas excavadas. El registro de las calicatas se muestra en el Anexo N° 2. Al completar las calicatas, éstas se rellenaron con el material excavado colocado en capas delgadas y compactadas con la cuchara de excavadora. En el plano 2018-IG-101 se muestra la ubicación de las calicatas.

Tabla 5: Resumen de las calicatas excavadas

Calicata	Profundidad de muestreo (m)	Coordenadas		
		Este	Norte	Cota superficial (msnm)
CC-1	4.00	598,770	8'270,002	1,061
CC-2	4.00	598,694	8'269,903	1,055
CC-3	4.00	598,635	8'269.804	1,049
CC-4	4.00	598,572	8'269,707	1,044
CC-5	4.00	598,477	8'269,594	1,031
CC-6	4.00	598,678	8'269,977	1,053
CC-7	4.00	598,599	8'269,866	1,044
CC-8	4.00	598,525	8'269,777	1,038
CC-9	4.00	598,396	8'269,643	1,025
CC-10	5.10	598,467	8'269,540	1,034
CC-11	1.30	598,436	8'269,535	1,033
CC-12	4.00	598,530	8'269,562	1,039
CN-1	0.60	598,844	8'269,764	2,174
EN-1	2.30	598,722	8'269,318	1,084
EN-2	2.90	598,916	8'269,616	1,086

(Elaboración propia)



Figura 14. Excavación de calicatas CC-02 con maquinaria dentro del dique del depósito de relaves proyectado



Figura 15 Excavación de calicatas de cantera dentro del vaso del depósito de relaves proyectado

Ensayos de densidad in situ.- En diferentes calicatas excavadas se ejecutaron ensayos de densidad in situ para cada muestra, mediante el método del cono y la arena (ASTM D1556). Los resultados de los ensayos ejecutados se indican en la Tabla N° 02.



Figura 16. Sondeo de densidad de campo de la muestra en cada una de las calicatas

Sondeo geofísico.- De acuerdo a lo dispuesto el trabajo de campo consistió en la ejecución de dieciséis (16) sondajes eléctricos verticales, cuya distribución y ubicación se muestran en la Tabla 4.

Tabla 6: *Coordenadas de ubicación de los sondajes eléctricos en el área del Depósito de Relaves Chacchuille IV*

N° de SEV	Este	Norte	Cota
SEV 01	0598985	8269989	1086
SEV 02	0598905	8270009	1080
SEV 03	0598823	8270024	1077
SEV 04	0598743	8270037	1062
SEV 05	0598660	8270055	1048
SEV 06	0598805	8270074	1075
SEV 07	0598713	8269922	1064
SEV 08	0598622	8269803	1052
SEV 09	0598569	8269715	1052
SEV 10	0598511	8269640	1043
SEV 11	0598458	8269568	1038
SEV 12	0598540	8269597	1043
SEV 13	0598474	8269693	1040
SEV 14	0598727	8269666	1079
SEV 15	0598691	8269740	1043
SEV 16	0598556	8269868	1052

(Elaboración propia)

4.8.3 Ensayos de laboratorio de mecánica de suelos.-

Con el propósito de determinar la clasificación y características de los materiales muestreados ya sean físicas o mecánicas, se le realizara un programa de ensayos en el laboratorio de mecánica de suelos de la Pontificia Universidad Católica del Perú - PUCP. Los ensayos que se ejecutaron se indican a continuación:

Análisis granulométrico por tamizado (ASTM D-422)

Límites de Atterberg (ASTM D-4318)

Contenido natural de humedad (ASTM D-2216)

Ensayo de compresión triaxial CU, con medición de presión de poros (ASTM D-4767)

Ensayo de proctor modificado (ASTM D-1557)

4.8.4 Configuración geométrica del dique del depósito de relaves.-

Se ha proyectado ubicar el depósito de relaves Chacchuille IV, en el sector Sur del depósito de relaves Chacchuille I (en operación) y del depósito de relaves Chacchuille II

(en construcción). El dique del depósito de relaves proyectado se conectará con el dique del depósito de relaves Chacchuille I, el mismo que se construirá progresivamente en tres (3) Fases, utilizando el método constructivo factible (aguas abajo y línea central). El dique recrecerá desde la cota promedio 1,045 msnm hasta alcanzar la cota 1,075 msnm, lo cual corresponde a una altura máxima de 30 m, con taludes aguas arriba de 2:1 (H:V) y aguas abajo de 1.5:1 (H:V) y un ancho de cresta de 8m.



Figura 17. Vista el área del proyecto del depósito de relaves chacchuille IV por el lado este



Figura 18. Vista el área del proyecto del depósito de relaves chacchuille IV por el lado oeste

Asimismo, en la Tabla 5 se detallan los parámetros de diseño del depósito de relaves Chacchuille IV para las tres (3) Fases de Construcción.

Tabla 7: *Parámetros de diseño depósito de relaves Chacchuille IV. (Línea central)*

Descripción	Unidad	Fase 1	Fase 2	Fase 3
Cota de la cresta del dique	msnm	1,065	1,070	1,075
Ancho de la cresta del dique	m	8	8	8
Talud aguas abajo del dique	(H:V)	1.5:1	1.5:1	1.5:1
Talud aguas arriba del dique (*)	(H:V)	2:1	2:1	2:1
Borde libre	m	1	1	1

(*) Mayor detalle, ver plano 2018-DC-207 (Elaboración propia)

Tabla 8: *Parámetros de diseño depósito de relaves Chacchuille IV. (Aguas abajo)*

Descripción	Unidad	Fase 1	Fase 2	Fase 3
Cota de la cresta del dique	msnm	1,065	1,070	1,075
Ancho de la cresta del dique	m	8	8	8
Talud aguas abajo del dique	(H:V)	1.5:1	1.5:1	1.5:1
Talud aguas arriba del dique	(H:V)	2:1	2:1	2:1
Borde libre	m	1	1	1

(*) Mayor detalle, ver plano 2018-DC-211 (Elaboración propia)

En el diseño del dique se ha considerado los siguientes aspectos:

- Se ha considerado material de préstamo para la conformación del cuerpo del dique, debido a que éstas tienen buenas propiedades, como: resistencia a erosión, resistencia a eventos sísmicos y disponibilidad de materiales de construcción en la zona; el cual influye considerablemente en la estabilidad física del depósito de relaves Chacchuille IV.
- Se ha considerado impermeabilizar el vaso del depósito de relaves, para el control de filtraciones.

Material de construcción del dique.- Las tres (3) fases de construcción del dique para ambos métodos serán conformadas con material de préstamo proveniente de la excavación de las canteras adyacentes al depósito de relaves proyectado, el mismo que será transportado y rellenado utilizando equipo pesado. Según las investigaciones geotécnicas el tipo de suelo característico del material de préstamo se clasifica como una grava arcillosa (GC).

El relleno del dique deberá ser conformado y compactado en capas horizontales sin exceder los 30 cm de espesor después de la compactación y se acondicionará la humedad que compactará el material en cada capa hasta un mínimo de 95% de la densidad máxima seca del ensayo de Proctor Modificado. El contenido de humedad durante la compactación se mantendrá dentro de los límites sobre el contenido óptimo de humedad y el cálculo del volumen de préstamo de material ver plano 2018-DC-212.

CAPITULO IV: RESULTADOS

4.1 Resultado de ensayos

4.1.1 Ensayos de densidad in situ

Los resultados de los ensayos ejecutados se indican en la Tabla 7, los reportes de los ensayos se incluyen en el Anexo N° 3.

Tabla 9: *Ensayos de densidad in situ*

Calicata	Profundidad (m)	Densidad Natural <3/4" (gr/cm ³)	Humedad %	Densidad Seca <3/4" (gr/cm ³)	Densidad Seca Global (gr/cm ³)
CC-1	1.8	1.93	2.24 %	1.89	2.00
CC-2	2.0	1.78	2.73 %	1.73	1.86
CC-3	2.2	1.87	2.21 %	1.63	1.90
CC-4	2.5	1.85	3.76 %	1.78	1.91
CC-6	2.2	1.68	2.65 %	1.64	1.86
CC-7	2.2	1.80	3.48 %	1.74	1.85
CC-8	2.5	2.10	2.41 %	2.05	2.09
CC-9	2.5	2.01	3.08 %	1.95	1.98

(Elaboración propia)

4.1.2 Ensayos índices de mecánica de suelos

Se llevó a cabo ensayos estándar con fines de identificación y clasificación según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos – SUCS, de las muestras extraídas del material de relave. Se determinaron las siguientes propiedades:

Análisis Granulométrico por Tamizado (ASTM D-422)

Límites de Atterberg (ASTM D-4318)

Contenido de Humedad (ASTM D-2216)

Los resultados de los ensayos se indican en la Tabla 8, los reportes de los ensayos se incluyen en el Anexo N° 4.

Tabla 10: Resumen de ensayo de clasificación de suelos

Calicata	Prof. (m)	Clasif. SUCS	D. granulométrica			Límites de Atterberg	
			Grava (%)	Arena (%)	Finos (%)	LL	IP
Cantera CC-01 M2	0.50 – 4.00	GP-GC	51.1	38.4	10.5	23	7
CC-03 M2	0.70 – 4.00	GC	53.6	34.3	12.1	21	8
CC-04 M1	0.90 – 4.00	GC	27.5	50.4	22.1	25	9
CC-05 M1	1.00 – 4.00	GC-GM	17.5	69.8	12.7	21	6
CC-07 M1	--	GC-GM	28.2	46.1	25.7	23	7
EN-01	--	SM	0	70.4	29.6	NP	--
M-1(cantera N°1)*	0-2.5	GC-GM	51.1	27.2	21.7	26	7
M-1(cantera)*	-	GP-GC	47.9	40.7	11.4	23	9
C-03, M-03**	0.00 – 3.00	GM	42.4	35.5	22.1	21	--

(Elaboración propia)

4.1.3 Ensayo de compactación

Se llevaron a cabo ensayos Proctor Estándar (ASTM D 698) en una muestra representativa de material el cual será utilizado para el relleno del dique. Para brindar mayores detalles se incluye el resultado del ensayo; los resultados del ensayo de compactación se incluyen en el anexo N° 4 y se resumen en la Tabla 9.

Tabla 11: Resumen del ensayo de compactación estándar

Calicata/Muestra	SUCS	MDD (gr/m3)	OMC (%)
CC-1, M2	GP-GC	1.98	12.60
M-1(cantera N° 1)*	GC-GM	1.99	9.30
M-1(cantera)*	GP-GC	2.16	7.20
C-03, M-03**	GM	2.13	8.00

(Elaboración propia)

4.1.4 Ensayo de resistencia cortante Triaxial Consolidado No Drenado – CU (ASTM D-4767)

Se ejecutó dos (02) ensayos de Corte Triaxial Consolidado No Drenado - CU con medición de presión de poros de las muestras remoldeadas extraídas de las calicatas. Las muestras se comprimieron con valores de esfuerzo (σ_c) de 1.5, 2.0 y 4.0 kg/cm².

Los ensayos se realizaron en el Laboratorio de Mecánica de Suelos de la Pontificia Universidad Católica del Perú - PUCP. Se debe indicar que el ensayo CU es uno de los métodos más confiables para determinar los parámetros de resistencia cortante.

Los reportes de los ensayos se presentan en el Anexo N°4, en tanto que un resumen de los ensayos se muestra en la Tabla 10.

Tabla 12: *Resumen de los ensayos se muestra*

Muestra	SUCS	Densidad seca (gr/cm ³)	Contenido humedad (%)	Esf. totales		Esf. efectivos	
				Cohesión (kg/cm ²)	Ángulo de fricción (°)	Cohesión (kg/cm ²)	Ángulo de fricción (°)
CC-1, M2	GP-GC	1.89	11.50	0.36	17	0.20	32
CC-3, M2	GC	1.83	11.60	0.40	14	0.30	27
M-1(cantera N° 1)*	GC-GM	1.89	9.30	0.00	27	0.00	36
M-1(cantera)*	GP-GC	2.05	7.20	1.45	37	0.00	43
C-03, M-03**	GM	1.98	8.80	0.80	33	0.00	42

(Elaboración propia)

Llevar a resultados

Aguas subterráneas.- En vista que el nivel freático de la zona del proyecto está relativamente deprimido y se cuenta con la construcción de una cobertura impermeable (Uso de geosintéticos) a lo largo de todo el vaso del depósito, se prevé que no existirán aportes de agua subterránea.

Filtraciones.- El vaso del depósito de relaves estará impermeabilizado con una capa geosintética impermeable, el cual evitará la infiltraciones de fluidos de relave hacia la base o cimentación.

4.2 Sondeo geofísico

4.2.1 Tabla de resultados

Los resultados producto de la interpretación cuantitativa de los sondajes eléctricos se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 13: Resultados de los sondeos eléctricos

Sondaje	Horiz.	H 1	H2	H3	H4	H 5
SEV-01	$\rho(\Omega\text{-m})$	100	--	70	286	
	E (m)	2.0	--	40.0	x	
	Σ (m)	2.0	--	42.0	--	
SEV-02	$\rho(\Omega\text{-m})$	288	24	95	16	284
	E (m)	5.0	21.0	34.0	73.0	x
	Σ (m)	5.0	26.0	60.0	133.0	--
SEV-03	$\rho(\Omega\text{-m})$	400	18.0	134	53	583
	E (m)	3.0	10.0	16.0	66.0	x
	Σ (m)	3.0	13.0	29.0	95.0	- -
SEV-04	$\rho(\Omega\text{-m})$	220	20	160	36	280
	E (m)	2.0	6.0	24.0	80	x
	Σ (m)	2.0	8.0	32.0	112.0	--
SEV-05	$\rho(\Omega\text{-m})$	234	660	184	68	364
	E (m)	3.0	7.0	21.0	92.0	x
	Σ (m)	3.0	10.0	31.0	123.0	--
SEV-06	$\rho(\Omega\text{-m})$	50	160	60	484	
	E (m)	3.0	6.0	85.0	x	
	Σ (m)	3.0	9.0	94.0	--	
SEV-07	$\rho(\Omega\text{-m})$	85	150	38	320	
	E (m)	3.0	32.0	33.0	x	
	Σ (m)	3.0	35.0	68.0	--	
SEV-08	$\rho(\Omega\text{-m})$	3300	130	17	390	
	E (m)	3.0	20.0	76.0	x	
	Σ (m)	3.0	23.0	99.0	--	
SEV-09	$\rho(\Omega\text{-m})$	55	148	36	310	
	E (m)	3.0	25.0	52.0	x	
	Σ (m)	3.0	28.0	80.0	--	
SEV-10	$\rho(\Omega\text{-m})$	70	380	48	460	
	E (m)	3.0	22.0	55.0	x	
	Σ (m)	3.0	25.0	80.0	--	
SEV-11	$\rho(\Omega\text{-m})$	3000	--	16	340	
	E (m)	5.0	--	36.0	x	
	Σ (m)	5.0	--	41.0	--	
SEV-12	$\rho(\Omega\text{-m})$	180	460	17	630	
	E (m)	5.0	8.0	25.0	x	
	Σ (m)	5.0	13.0	38.0	--	
SEV-13	$\rho(\Omega\text{-m})$	210	22	160	52	340
	E (m)	3.0	6.0	24.0	100.0	x
	Σ (m)	3.0	9.0	33.0	133.0	--
SEV-14	$\rho(\Omega\text{-m})$	1700	180	15	288	
	E (m)	3.0	14.0	46.0	x	
	Σ (m)	3.0	17.0	63.0	--	
SEV-15	$\rho(\Omega\text{-m})$	310	178	18	234	
	E (m)	8.0	16.0	65.0	x	
	Σ (m)	8.0	24.0	89.0.0	--	
SEV-16	$\rho(\Omega\text{-m})$	2650	148	52	330	
	E (m)	3.0	15.0	80.0	x	
	Σ (m)	3.0	18.0	96.0	--	

Donde:

- ρ : Resistividad eléctrica en ohmio-metro.
 E : Espesor del horizonte geoelectrico en metros.
 R : Horizonte geoelectrico en metros.

4.2.2 Tabla de descripción de sondajes eléctricos:

En las siguientes tablas se muestra la relación entre resistividad y potencia con su correspondiente composición litológica:

Tabla 14: *Sondaje 01*

Capa	Potencia (m)	Resistividad (Ω m)	Descripción
1	2.0	100	Suelo suelto de cobertura aluvial en estado seco.
2	40.0	70	Material compuesto por arena, grava con canto rodado e intercalaciones de limo y arcilla.
3	>50	286	Substrato rocoso.

(Elaboración propia)

Tabla 15: *Sondaje 02*

Capa	Potencia (m)	Resistividad (Ω m)	Descripción
1	5.0	288	Suelo de origen aluvial en estado seco.
2	21.0	24	Material arenoso con intercalaciones de sub-capas de arcilla y limo.
3	34.0	95	Canto rodado, grava, arena con limo en estado seco a húmedo.
4	73.0	16	Material arcillo-limo-arenoso con saturación de agua.
5	>50	284	Substrato rocoso.

(Elaboración propia)

Tabla 16: *Sondaje 03*

Capa	Potencia (m)	Resistividad (Ω m)	Descripción
1	5.0	400	Suelo de origen aluvial en estado seco.
2	10.0	18	Material arenoso con intercalaciones de sub-capas de arcilla y limo.
3	16.0	134	Canto rodado, grava, arena con limo en estado seco a húmedo.
4	66.0	53	Acuífero compuesto por arena, gravilla, limo y canto rodado de permeabilidad media.
5	>50	583	Substrato rocoso.

(Elaboración propia)

Tabla 17: *Sondaje 04*

Capa	Potencia (m)	Resistividad (Ω m)	Descripción
1	2.0	220	Suelo de origen aluvial en estado seco.
2	6.0	20	Material arenoso con intercalaciones de sub-capas de arcilla y limo.
3	24.0	160	Canto rodado, grava, arena con limo en estado seco a húmedo.
4	80.0	36	Acuífero compuesto por arena, gravilla, limo de permeabilidad media a baja.
5	>50	280	Substrato rocoso.

*(Elaboración propia)*Tabla 18: *Sondaje 05*

Capa	Potencia (m)	Resistividad (Ω m)	Descripción
1	3.0	234	Suelo de origen aluvial en estado seco.
2	7.0	660	Material areno-limo-arcilloso en estado seco.
3	21.0	184	Canto rodado, grava, arena con limo en estado seco a húmedo.
4	92.0	48	Acuífero medianamente permeable compuesto por arena, gravilla, canto rodado con limo y arcilla.
5	>50	364	Substrato rocoso.

*(Elaboración propia)*Tabla 19: *Sondaje 06*

Capa	Potencia (m)	Resistividad (Ω m)	Descripción
1	3.0	50	Suelo de cultivo en estado seco.
2	6.0	160	Canto rodado, grava y arena en estado seco.
3	85.0	60	Material compuesto por arena, grava con canto rodado e intercalaciones de limo y arcilla.
4	>50	484	Substrato rocoso.

*(Elaboración propia)*Tabla 20: *Sondaje 07*

Capa	Potencia (m)	Resistividad (Ω m)	Descripción
1	3.0	85	Suelo suelto en estado seco.
2	32.0	150	Canto rodado, grava y arena en estado seco.
3	33.0	38	Acuífero compuesto por arena, gavilla, canto rodado con limo y arcilla.
4	>50	320	Substrato rocoso.

(Elaboración propia)

Tabla 21: *Sondaje 08*

Capa	Potencia (m)	Resistividad (Ω m)	Descripción
1	3.0	3300	Suelo suelto en estado seco.
2	20.0	130	Canto rodado, grava y arena en estado seco.
3	76.0	17	Material principalmente arcilloso.
4	>50	290	Substrato rocoso.

*(Elaboración propia)*Tabla 22: *Sondaje 09*

Capa	Potencia (m)	Resistividad (Ω m)	Descripción
1	3.0	55	Suelo de cultivo en estado seco.
2	25.0	148	Canto rodado, grava y arena en estado seco.
3	52.0	36	Acuífero compuesto arena, gravilla, canto rodado, limo, con saturación de agua.
4	>50	310	Substrato rocoso.

*(Elaboración propia)*Tabla 23: *Sondaje 10*

Capa	Potencia (m)	Resistividad (Ω m)	Descripción
1	3.0	70	Suelo suelto en estado seco.
2	22.0	380	Canto rodado, grava y arena en estado seco.
3	55.0	48	Acuífero compuesto arena, gravilla, canto rodado, limo, arcilla y con saturación de agua.
4	>50	460	Substrato rocoso.

*(Elaboración propia)*Tabla 24: *Sondaje 11*

Capa	Potencia (m)	Resistividad (Ω m)	Descripción
1	5.0	3000	Suelo suelto de origen coluvio-aluvial en estado seco.
2	36.0	16	Material arenoso con intercalaciones de sub-capas de arcilla y limo.
4	>50	340	Substrato rocoso.

(Elaboración propia)

Tabla 25: Sondaje 12

Capa	Potencia (m)	Resistividad (Ωm)	Descripción
1	5.0	180	Suelo suelto de origen coluvio-aluvial en estado seco.
2	8.0	460	Canto rodado, grava y arena en estado seco.
3	25.0	17	Material arenoso con intercalaciones de sub-capas de arcilla y limo.
4	>50	630	Substrato rocoso.

(Elaboración propia)

Tabla 26: Sondaje 13

Capa	Potencia (m)	Resistividad (Ωm)	Descripción
1	3.0	210	Suelo de origen aluvial en estado seco.
2	6.0	22	Material areno-limo-arcilloso en estado seco.
3	24.0	160	Canto rodado, grava, arena con limo en estado seco a húmedo.
4	100.0	52	Acuífero compuesto por arena, gravilla, limo y canto rodado de permeabilidad media.
5	>50	340	Substrato rocoso.

(Elaboración propia)

Tabla 27: Sondaje 14

Capa	Potencia (m)	Resistividad (Ωm)	Descripción
1	3.0	1700	Suelo de origen coluvio-aluvial en estado seco.
2	14.0	180	Material arcillo-limo-arenoso en estado seco.
3	46.0	15	Material arenoso con intercalaciones de sub-capas de arcilla y limo.
4	>50	288	Substrato rocoso.

(Elaboración propia)

Tabla 28: Sondaje 15

Capa	Potencia (m)	Resistividad (Ωm)	Descripción
1	8.0	310	Suelo de origen aluvial en estado seco.
2	16.0	178	Material arcillo-limo-arenoso en estado seco.
3	65.0	18	Material arenoso con intercalaciones de sub-capas de arcilla y limo.
4	>50	234	Substrato rocoso.

(Elaboración propia)

Tabla 29: *Sondaje 16*

Capa	Potencia (m)	Resistividad (Ωm)	Descripción
1	3.0	2650	Suelo de origen aluvial en estado seco.
2	15.0	148	Material arcillo-limo-arenoso en estado seco.
3	80.0	52	Depósito acuífero compuesto por materiales de grano grueso, medio y fino.
4	>50	330	Substrato rocoso.

(Elaboración propia)

4.2.3 Descripción de secciones geoelectricas

Se ha constituido cuatro secciones en sentido longitudinal y transversal al valle. Ver planos 2018-IG-101 y 2018-IG-103.

Sección A-A (2018-IG-103 Secciones – sondeo geofísico)

Construida en sentido longitudinal al valle y al eje de la relavera proyectada. Está compuesta con los sondajes N° 03, 06, 07, 08, 09, 10 y 11.

En la sección se observa que el horizonte geoelectrico H3, constituiría una estructura acuifera tipo paleo-cauce, compuesta por materiales permeables de origen aluvial, tal como se ve a la altura del sondaje 07 y entre los sondajes 09 y 10. Su espesor oscila entre 33 m. (SEV-07) y 55 m. (SEV-10).

A la altura de los sondajes N° 08 y 11 se ve un depósito con valores bajos de resistividad (16 y 17 ohm-m) que se asocia a la ocurrencia de materiales de grano fino, compuesto por arena con intercalaciones de sub-capas de limo y arcilla. Hacia el extremo derecho de la sección en el sondaje 06 a partir de 9 m. de profundidad se identificó una antigua terraza que estaría compuesta por materiales de grano medio y fino con concentración de humedad.

El horizonte H4 se presenta valores resistivos, constituyendo la base estructural de los materiales aluviales no consolidados.

Sección B-B (2018-IG-103 Secciones – sondeo geofísico)

Sección con orientación de Oeste a Este y en sentido transversal al valle. Compuesta con los sondajes N° 01, 02, 03, 04 y 05.

En este sentido se observa que entre los sondajes 02, 03, 04 y 05 la tercera coloreada de azul instituye un depósito acuífero con resistividad de 36 ohm-m, 48 ohm-m y 53 ohm-m relacionado a materiales como: arena, grava, gravilla canto rodado y sub-capa de limo y arcilla.

Su espesor oscila entre 66 m. (SEV- 03) y 92 m. SEV- 05). Su base impermeable estaría compuesto por roca.

Sección C-C (2018-IG-103 Secciones – sondeo geofísico)

Construida también en sentido transversal al valle y compuesta con los sondajes 08, 14, 15 y 16. En la sección se observa que a la altura del sondaje 16 un depósito acuífero con resistividad de 52 ohm-m y con espesor de 80 m. Lateralmente hacia el extremo derecho de la sección se observa valores bajos de resistividad que se relaciona a materiales poco permeables y con concentración de humedad. Su espesor oscila entre 46 m. y 76 m.

Sección D-D (2018-IG-103 Secciones – sondeo geofísico)

Compuesta con los sondajes 10, 12 y 13.

La sección presenta características prospectivas similares a las secciones ya descritas, con cuatro horizontes geoeléctricos, donde los dos primeros están compuestos por materiales de origen aluvial de grano grueso en estado seco, seguido de un paleo- cauce identificado entre los sondajes 10 y 13, presentando su mayor espesor (100 m. aproximadamente) a la altura del sondaje 13.

4.3 Caracterización geotécnica de los materiales

A continuación se describe detalles de las propiedades físicas y de resistencia al corte de los materiales utilizados en el análisis de estabilidad. Los parámetros de resistencia se asignaron de manera conservadora.

Suelo de fundación.- La interpretación de las condiciones superficiales del área del depósito de relaves Chacchulle IV que se presentan en este informe se basan en las conclusiones del mapeo de campo geológico y superficial, excavaciones de calicatas y ensayos de laboratorio realizados.

El depósito de relaves se empleará sobre acumulaciones sedimentarias en forma de cono aluvial, que se caracterizan como mezclas heterogéneas de sedimentos sin estratificación y con distribución aleatoria de los materiales; siendo estos los guijarros angulosos, gravas gruesas, gravas con arena de naturaleza de rocas intrusivas y volcánicas; estos sedimentos están englobados dentro de una matriz arena-limosa.

El macizo rocoso en el área está dispuesto por intrusivo y sub volcánico que se encuentra infrayaciendo al aluvial.

Las rocas intrusivas consisten en diorita/microdiorita de composición cuarcífera, de grano fanerítico y textura granítica a hipidiomórfica; con minerales esenciales: Plagioclasa, de composición andesina labradorita. Además de la diorita se deriva en forma gradacional la microdiorita al producirse en profundidad un cambio termodinámico y así variando en su litofacies original.

Se ha observado como intrusiones menores, a plutones en forma de stocks y/o diques irregulares, de andesita intrusiva gris verdosa, de textura porfírica de origen sub volcánico. La característica de los plutones es que intruyen al complejo Bella Unión. Estas rocas se presentan en forma consolidada, compacta y dura; con pocas dióclases irregulares.

Según los registros de calicatas, se encontró estratos de grava con arenas y arcilla, semidensos con contenidos de partículas angulares y subangulares de hasta 7" de diámetro, los espesores de estos suelos están comprendidos entre 0.7 y 1.6 m. Subyaciendo a este estrato se localizan suelos tipo, grava con arena y limos y en algunas zonas, arena con limos de compacidad medianamente densa a densa, existen gravas subangulosos cuyo tamaño máximo varía de 5" a 7" de diámetro.

Las muestras de material aluvial extraídas de la fundación del dique proyectado se clasificaron como GC y GC-GM según el sistema SUSCS. Las pruebas de límites de Atterberg y de contenido de humedad natural dieron como resultado un índice de plasticidad de entre 6 y 9, y contenidos de humedad natural de entre 2.21 y 3.76%.

La resistencia al corte del suelo fue evaluada mediante el ensayo de Corte Triaxial tipo CU, a la muestra M-2 extraída de la calicata CC-3 y remodelada. El resultado indica que el ángulo de fricción efectiva es 27° y la cohesión es 0.3 kg/cm^2 .

Tomando en cuenta las características del material aluvial, no será removido debajo del dique proyectado.

Relave.- Según información alcanzada sobre las características del relave que se depositará en el depósito de relaves, la muestra del material de relave tiene una granulometría de aproximadamente 78.1 % en peso de arena fina y 21.9 % de finos (que pasan la malla No. 200), incluye partículas del tamaño de limo y arcilla. El relave presenta plasticidad de cero. El límite líquido para la muestra es 20.

Estos resultados indican que los relaves pasan rápidamente de un estado semisólido plástico a un estado líquido. Según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos – SUSCS el material de relave, es una arena limosa de baja plasticidad (SM). La densidad real estimada es 14.2 KN/m³; sin embargo, para el presente diseño se ha considerado conservadoramente una densidad de 14.0kN/m³.

Los parámetros de resistencia cortante para el relave son: ángulo de fricción de 10° y la cohesión de 5 KN/cm².

Materiales de préstamo.- Se ha previsto que el material de préstamo para la construcción de dique del depósito de relaves será el material obtenido de la excavación en el área del vaso del depósito, Cantera A (zona Noroeste del depósito de relaves Chacchuille IV) y cantera B (zona Sur del depósito de relaves Chacchuille IV). Estos depósitos son de espesor variable y están compuestos por guijarros angulosos, gravas gruesas, gravas con arena de naturaleza de rocas intrusivas y volcánicas. Las clasificaciones, según SUSCS incluyen GP-GC, GC-GM y GM. Se encontró que el contenido de finos (porcentaje que pasa la malla No. 200) varía entre 11.4 % a 22.1 %.

La prueba de proctor estándar (ASTM D 698) en la muestra CC-1, M2 cuya clasificación es GP-GC, dio como resultado un valor máximo de peso seco unitario de 19.8 KN/m³ y un óptimo contenido de humedad de 12.60 %.

Según información alcanzada por Minera Caraveli, las pruebas del ensayo proctor modificado (ASTM D 1557) en muestras clasificadas como GC-GM, GP-GC y GM dieron como resultado valores máximos de peso seco unitario que varían de 19.9 a 21.6 kN/m³ y valores óptimos de contenido de humedad que varían de 7.2 a 9.3 %.

La resistencia al corte del suelo tipo GP-GC fue evaluada mediante el ensayo de corte triaxial tipo CU, remoldeada a densidades secas iguales al 95% de la máxima densidad seca evaluada con la prueba de proctor estándar. El resultado indica que el ángulo de fricción efectiva es 32 grados y la cohesión es 20 KN/cm².

Asimismo, según la información alcanzada por Compañía Minera Caraveli S.A.C., las pruebas de resistencia al corte del Ensayo Triaxial tipo CU para las muestras fueron remoldeadas a densidades secas iguales al 95% de la máxima densidad seca evaluada con la prueba de Proctor Modificado. Los ángulos de fricción de esfuerzo efectivo resultaron 36 y 43 grados (sin intersección de cohesión).

Se seleccionó un ángulo de fricción de esfuerzo efectivo de 35° y una cohesión de 10 KN/cm² para representar la resistencia estática del material de construcción del dique de las tres (3) Fases.

4.4 Propiedades físicas y parámetros de resistencia cortante

Teniendo en cuenta las investigaciones geotécnicas de campo, los resultados de ensayos de laboratorio recientes, ejecutados en la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP) se presentan en el Anexo N° 4, ensayos de laboratorio existentes, literatura disponible.

Se ha estimado de manera conservadora el valor de los parámetros físicos y mecánicos más representativos de los materiales que conforman el modelo geotécnico del análisis de estabilidad de taludes, los mismos que se indican en la Tabla 28.

Tabla 30: *Propiedades físicas y parámetros de resistencia cortante de los materiales*

	Material	Peso Unitario (kN/m³)	Ángulo de Fricción Interna (grados)	Cohesión (kPa)
1	Relave almacenado (SM), muy blando a blando	14.00	10	5
2	Dique con material de préstamo	21.00	35	10
3	Suelo de cimentación	18.00	27	30
4	Roca intrusiva	21.00	30	150

(Elaboración propia)

4.5 Configuración geométrica del depósito de relaves Chacchuille IV

4.5.1 Método línea central

Calculo del volumen de dique.- Se ha proyectado diseñar el depósito de relaves Chacchuille IV, el mismo que se construirá progresivamente en tres (3) Fases, utilizando

el método constructivo línea central se presentan en el Anexo N° 5. Ver plano 2018-DC-202, 2018-DC-203, 2018-DC-204, 2018-DC-205, 2018-DC-206 y 2018-DC-207.

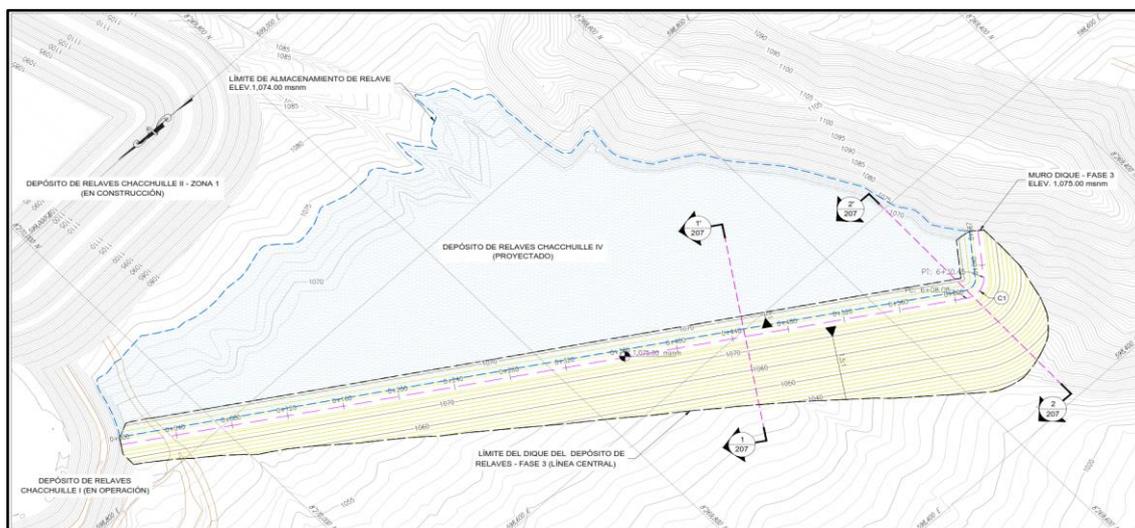


Figura 19. Vista en planta del DR Chacchuille IV por el método línea central

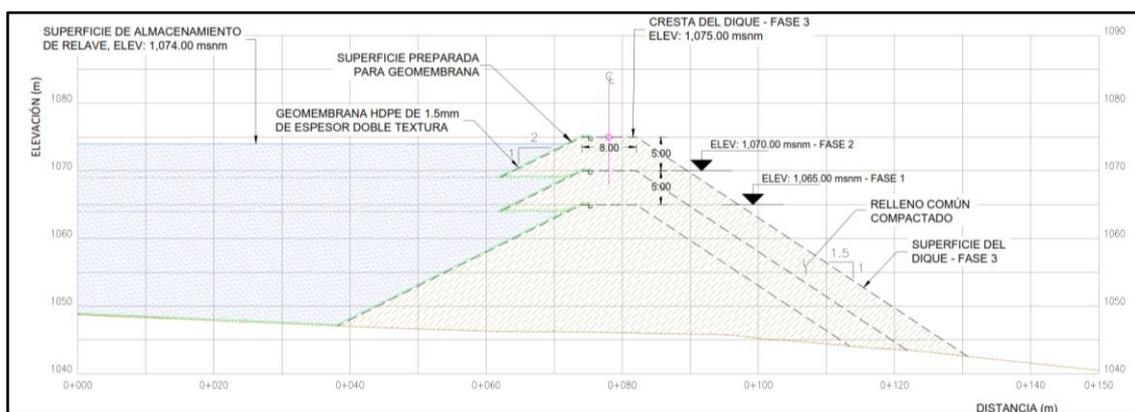


Figura 20. Vista en sección del DR Chacchuille IV por el método línea central

Tabla 31: Nivel de cresta del dique y volumen requerido para la conformación del dique método línea central.

Fases de construcción del depósito de relaves	Nivel de cresta del dique (msnm)	Volumen de conformación del dique (m ³)	Volumen acumulado (m ³)
Fase 1	1,065	312,050.57	312,050.57
Fase 2	1,070	136,008.36	448,058.93
Fase 3	1,075	166,681.30	614,740.23

(Elaboración propia)

Calculo del volumen de almacenamiento del depósito de relaves.- La capacidad de almacenamiento del depósito de relaves en sus tres (3) Fases, se ha estimado en función al ratio de producción de relaves de la planta metalúrgica el cual se consideró 800 TMD;

así como, a la configuración geométrica del depósito de relaves y a la densidad del material de relave almacenado 1.40 tn/m^3 .

En la siguiente tabla se detalla el nivel de la cresta del dique y capacidad de almacenamiento de del depósito de relaves, estimado para las tres (3) Fases de construcción.

Tabla 32: Nivel de cresta del dique y capacidad de almacenamiento del depósito de relaves Chacchuille IV método línea central

Fases de construcción del depósito de relaves	Nivel de cresta del dique (msnm)	Volumen de almacenamiento de relaves (m^3)	Capacidad de almacenamiento de relaves (TM)
Fase 1	1,065	298,857.96	418,401.14
Fase 2	1,070	244,087.17	341,722.04
Fase 3	1,075	298,351.89	417,692.65

(Elaboración propia)

4.5.2 Método Aguas abajo

Calculo del volumen de dique.- Se ha proyectado diseñar el depósito de relaves Chacchuille IV, el mismo que se construirá progresivamente en tres (3) Fases, utilizando el método constructivo aguas abajo se presentan en el Anexo N° 5. Ver planos 2018-DC-202, 2018-DC-203, 2018-DC-208, 2018-DC-209, 2018-DC-210 y 2018-DC-211.

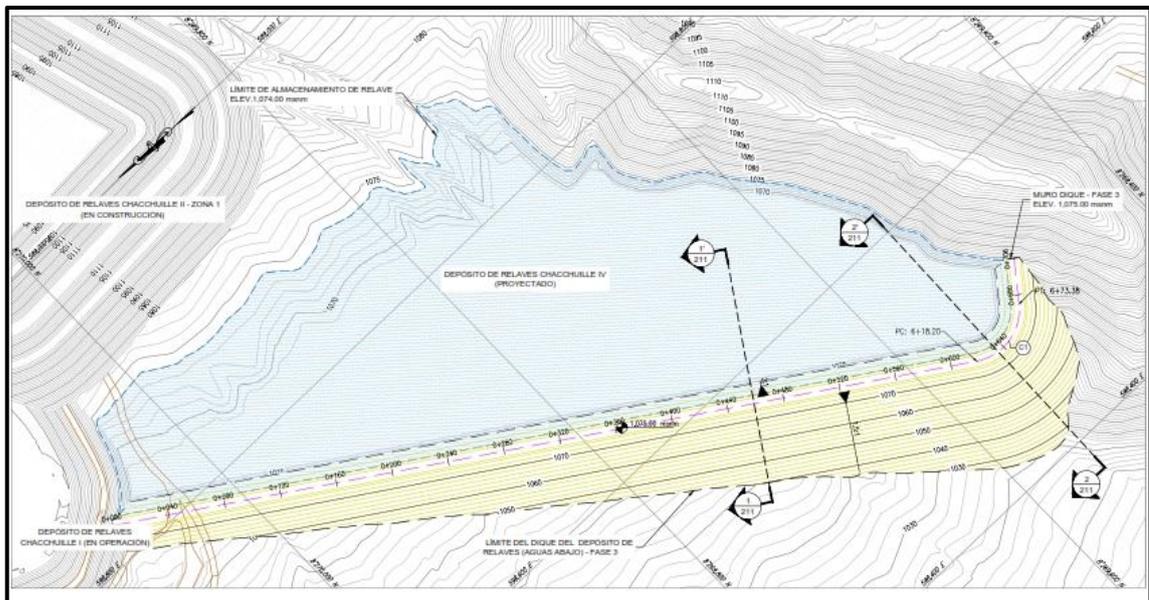


Figura 21. Vista en sección del DR Chacchuille IV por el método aguas abajo

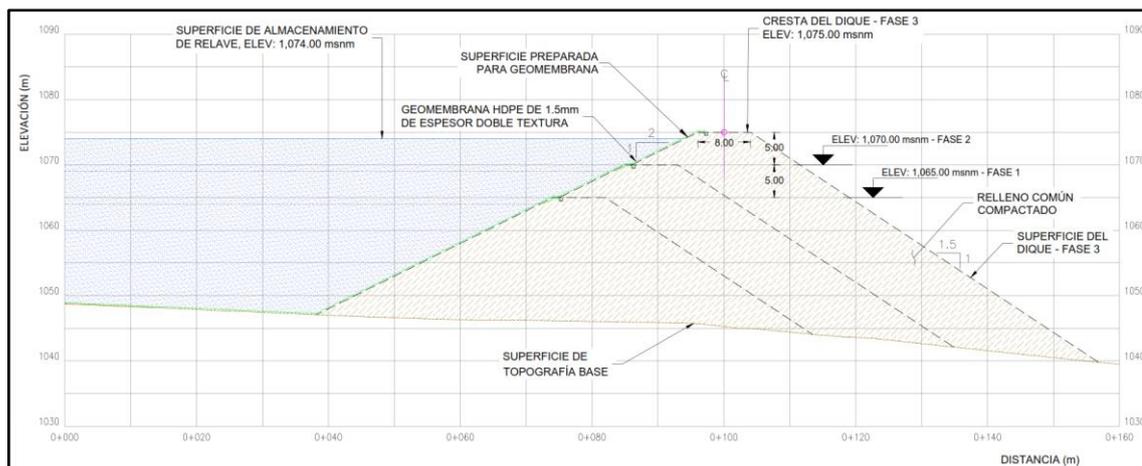


Figura 22. Vista en sección del DR Chacchulle IV por el método aguas abajo

Tabla 33: Nivel de cresta del dique y volumen requerido para la conformación del dique método aguas abajo

Fases de construcción del depósito de relaves	Nivel de cresta del dique (msnm)	Volumen de conformación del dique (m ³)	Volumen acumulado (m ³)
Fase 1	1,065	312,050.57	312,050.57
Fase 2	1,070	254,721.41	566,771.98
Fase 3	1,075	354,362.80	921,134.78

(Elaboración propia)

Calculo del volumen de almacenamiento del depósito de relaves.- La capacidad de almacenamiento del depósito de relaves en sus tres (3) Fases, se ha estimado en función al ratio de producción de relaves de la planta metalúrgica el cual se consideró 800 TMD; así como, a la configuración geométrica del depósito de relaves y a la densidad del material de relave almacenado 1.40 tn/m³.

En la siguiente tabla se detalla el nivel de la cresta del dique y capacidad de almacenamiento de del depósito de relaves, estimado para las tres (3) Fases de construcción.

Tabla 34: Nivel de cresta del dique y capacidad de almacenamiento del depósito de relaves Chacchuille IV método aguas abajo

Fases de construcción del depósito de relaves	Nivel de cresta del dique (msnm)	Volumen de almacenamiento de relaves (m ³)	Capacidad de almacenamiento de relaves (TM)
Fase 1	1,065	298,857.96	418,401.14
Fase 2	1,070	267459.31	374,443.03
Fase 3	1,075	410234.65	574,328.51

(Elaboración propia)

4.6 Análisis de Estabilidad de Talud del Depósito de Relaves Chacchuille IV

4.6.1 Aceleración sísmica de diseño

En base al informe de peligro sísmico se ha considerado coeficientes sísmicos para condiciones a corto y largo plazo. Para la condición a corto plazo o de operación del dique del depósito de relaves Chacchuille IV, se consideró un coeficiente sísmico de 0,18 equivalente al 50% del PGA para un sismo de 150 años de periodo de retorno y 10% de probabilidad de excedencia.

Para los taludes del dique del depósito de relaves en condiciones de largo plazo, se consideró un coeficiente de 0.21 equivalente al 40% del PGA para un sismo de 500 años de periodo de retorno.

4.6.2 Análisis de estabilidad de taludes

4.6.2.1 Métodos línea central

Los factores de seguridad obtenidos para los taludes de la máxima altura del dique, son mayores que los mínimos recomendados para el análisis de la estabilidad global en las condiciones estáticas y pseudo-estáticas analizadas.

Los resultados del análisis de estabilidad de taludes método línea central, se muestran en los siguientes gráficos y un resumen de los mismos se presenta en la Tabla 33.

Gráfico 1. Análisis Estático - Falla circular - Sección de Análisis 1-1'

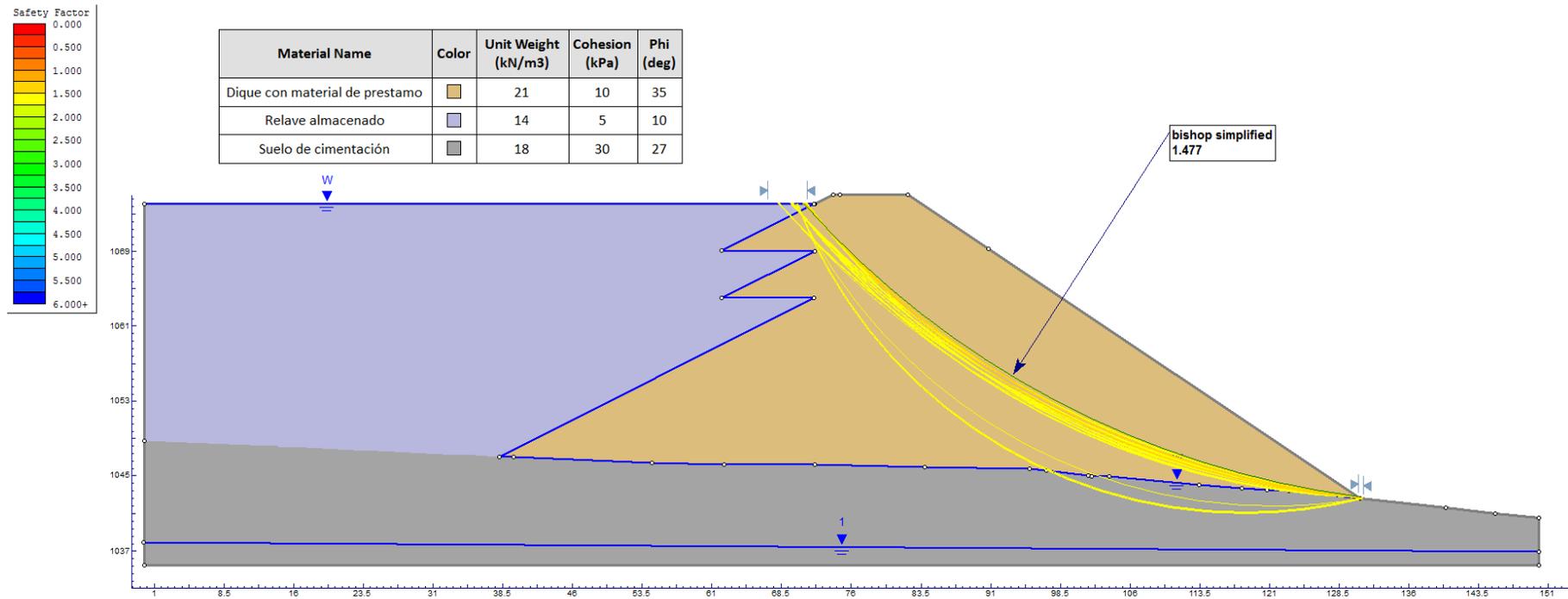


Gráfico 2. Análisis Pseudo-estático - Falla circular Corto Plazo - Sección de Análisis 1-1'

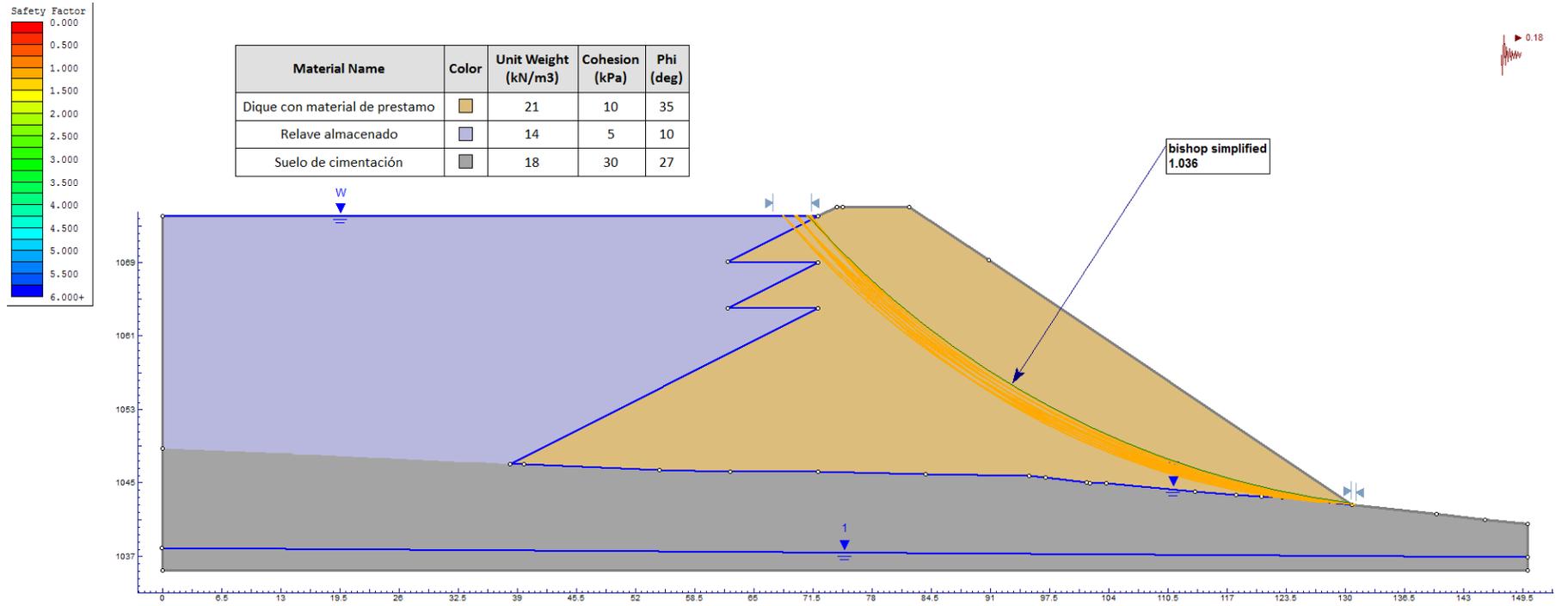


Gráfico 3. Análisis Pseudo-estático - Falla circular a Largo Plazo - Sección de Análisis 1-1'

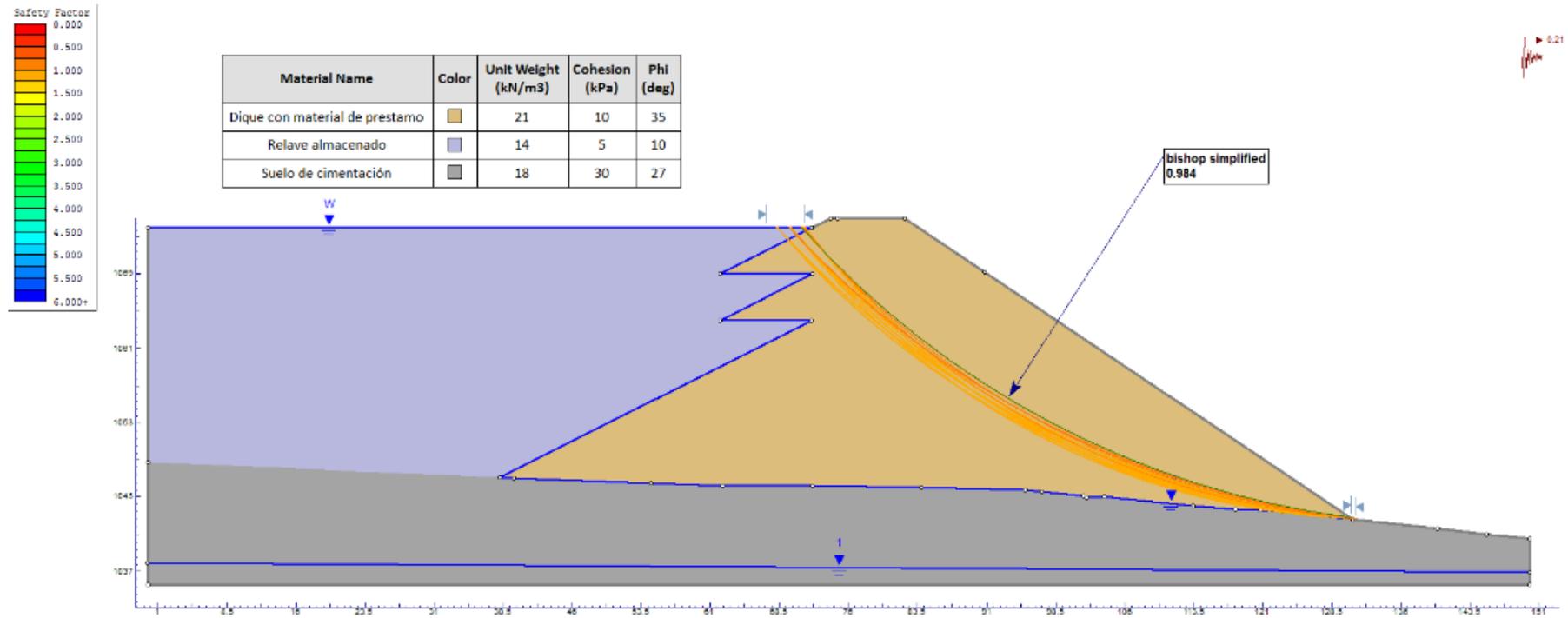


Gráfico 4. Análisis Estático - Falla circular - Sección de Análisis 2-2'

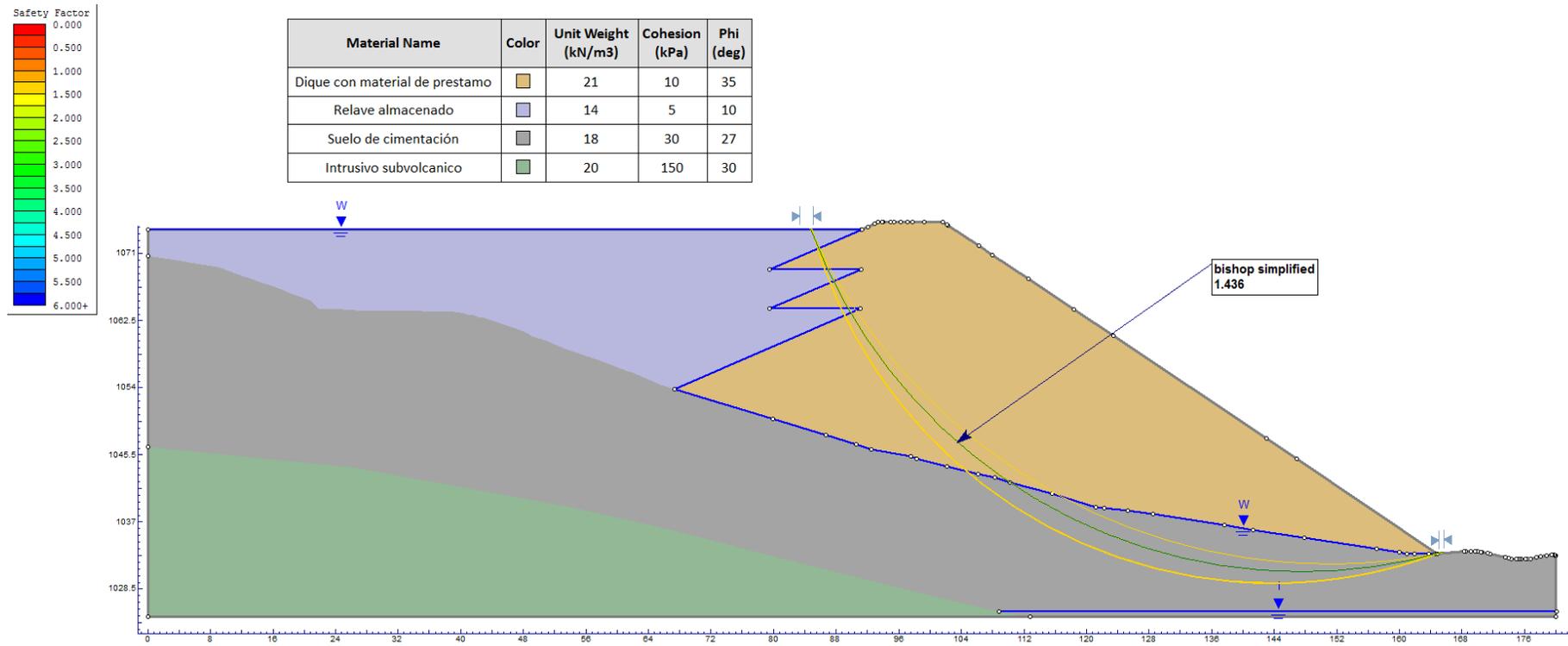


Gráfico 5. Análisis Pseudo-estático - Falla circular a Corto Plazo - Sección de Análisis 2-2'

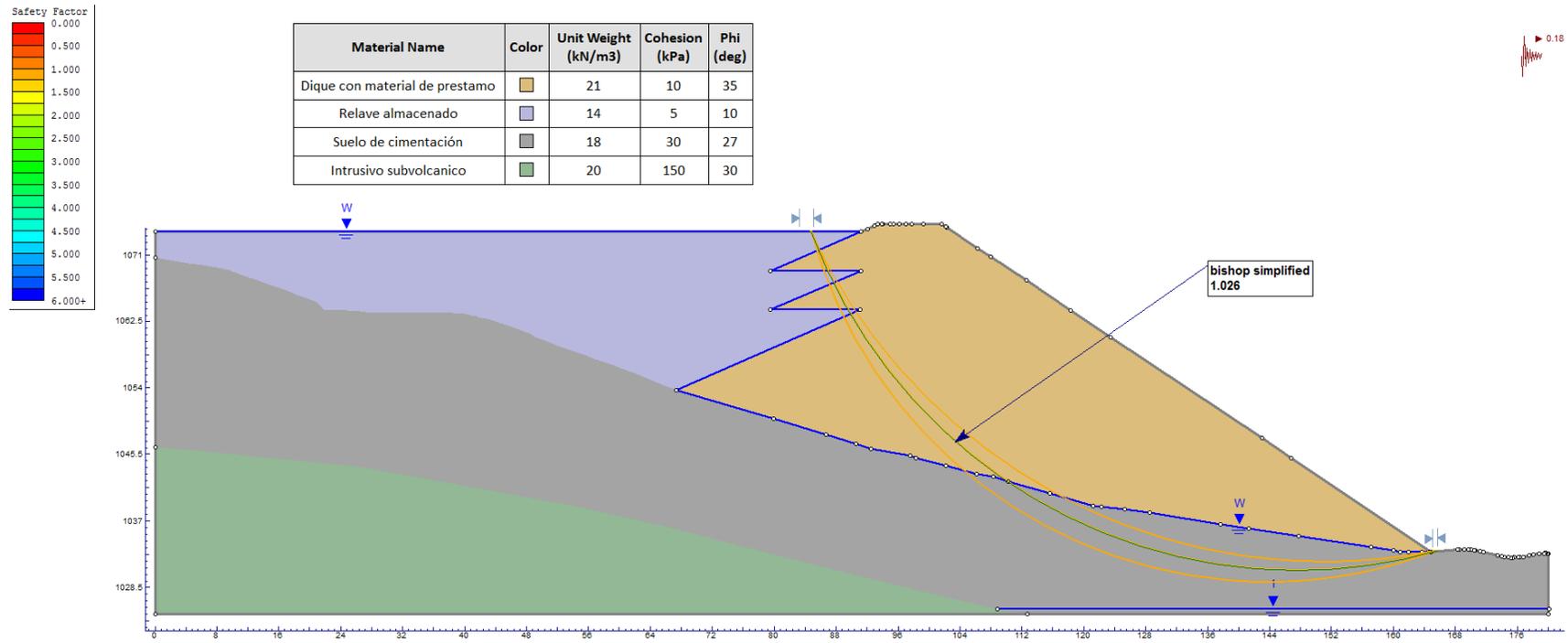


Gráfico 6. Análisis Pseudo-estático - Falla circular a Largo Plazo - Sección de Análisis 2-2'

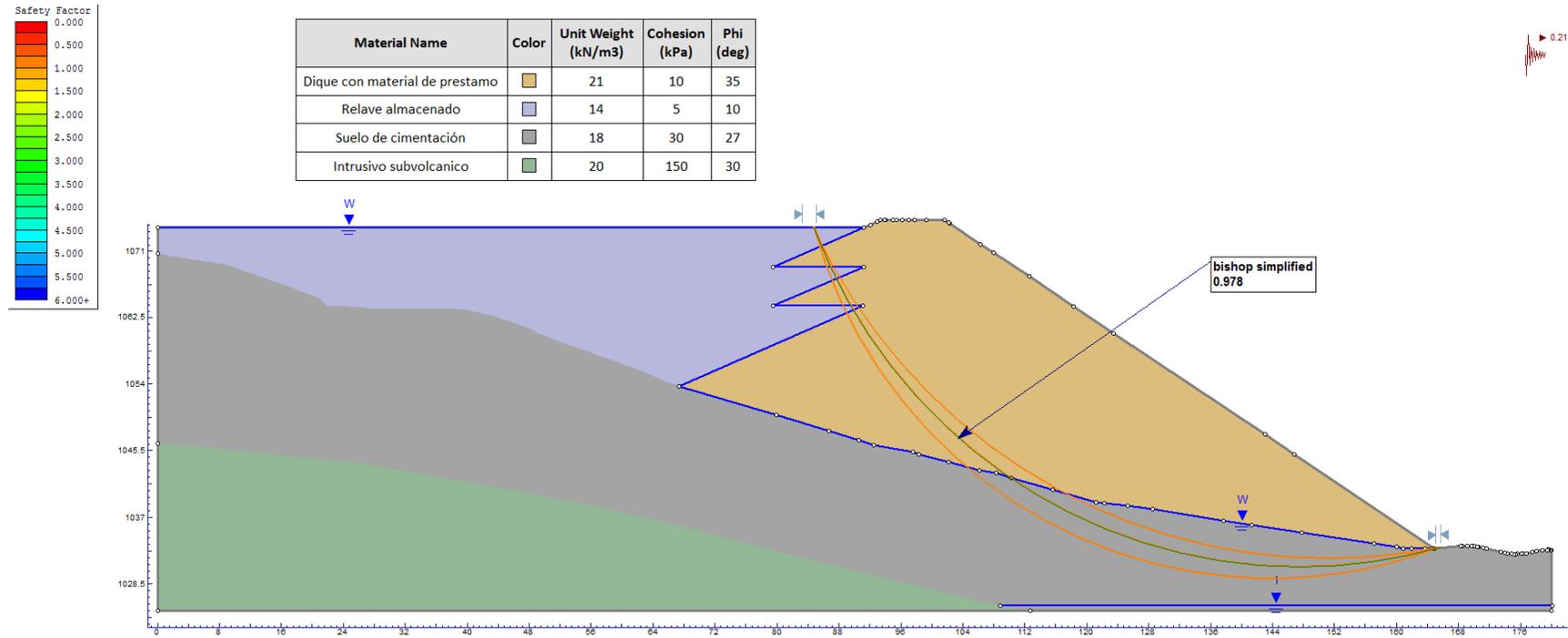


Tabla 35: Resumen de resultados de factores de seguridad método línea central

Sección	Estático	Factores de Seguridad	
		Pseudo – Estático Corto plazo	Pseudo – Estático Largo plazo
1-1'	1.477	1.036	0.984
2-2'	1.436	1.026	0.978

(Elaboración propia)

4.6.2.2 Análisis de estabilidad Métodos aguas abajo

Los factores de seguridad obtenidos para los taludes de la máxima altura del dique, son mayores que los mínimos recomendados para el análisis de la estabilidad global en las condiciones estáticas y pseudo-estáticas analizadas.

Los resultados del análisis de estabilidad de taludes método aguas abajo, se muestran en los siguientes gráficos y un resumen de los mismos se presenta en la Tabla 34.

Gráfico 7. Análisis Estático - Falla circular - Sección de Análisis 1-1'

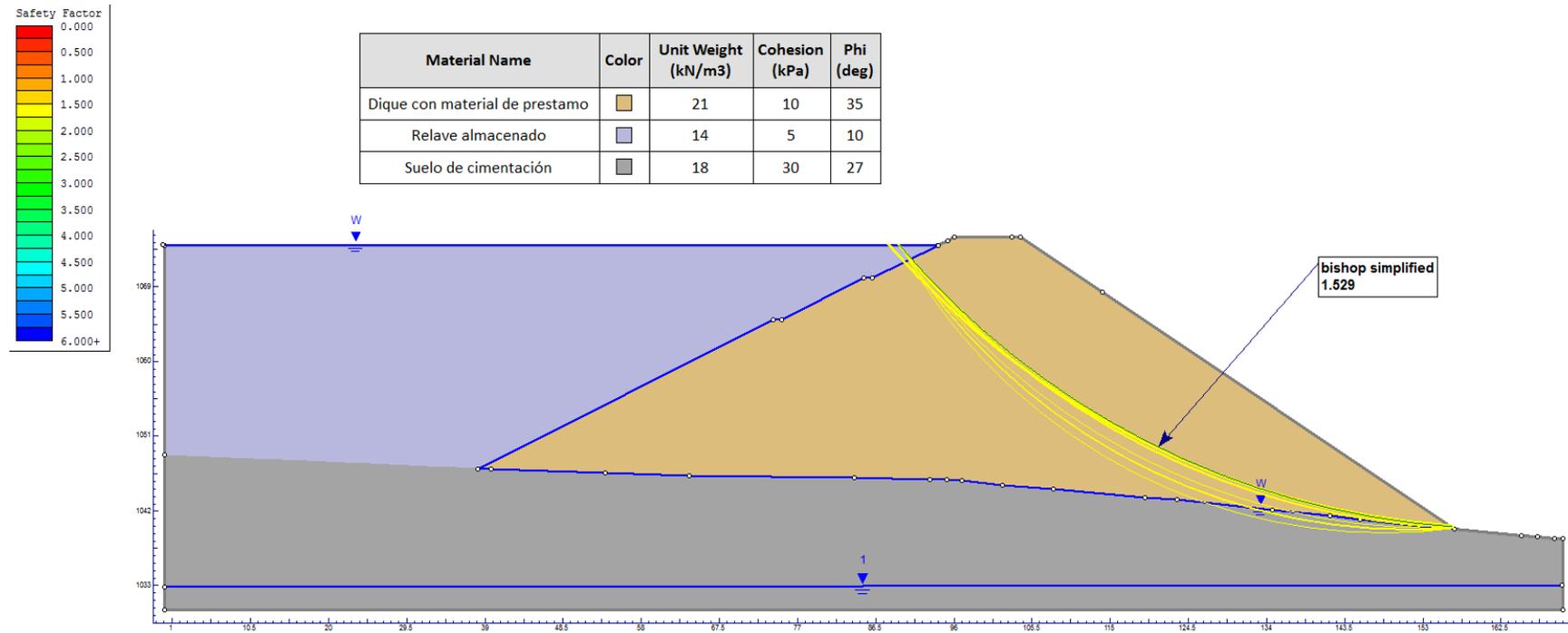


Gráfico 8. Análisis Pseudo-estático - Falla circular Corto Plazo - Sección de Análisis 1-1'

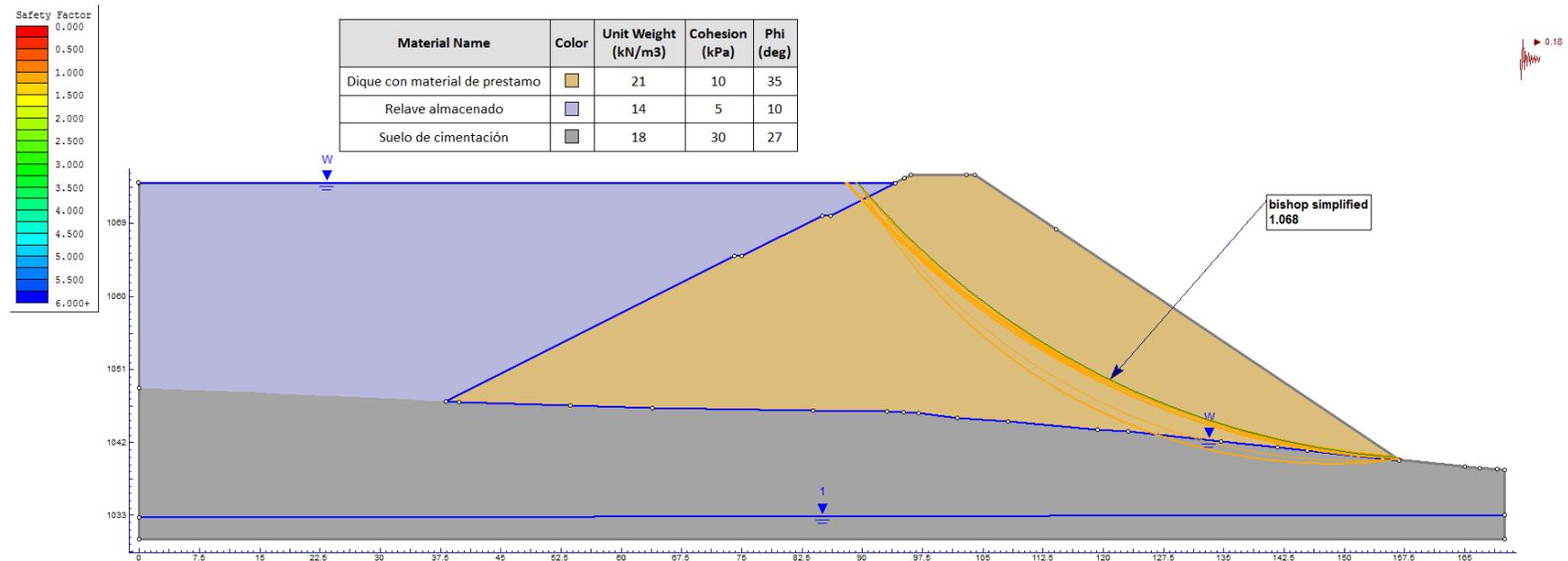


Gráfico 9. Análisis Pseudo-estático - Falla circular a Largo Plazo - Sección de Análisis 1-1'

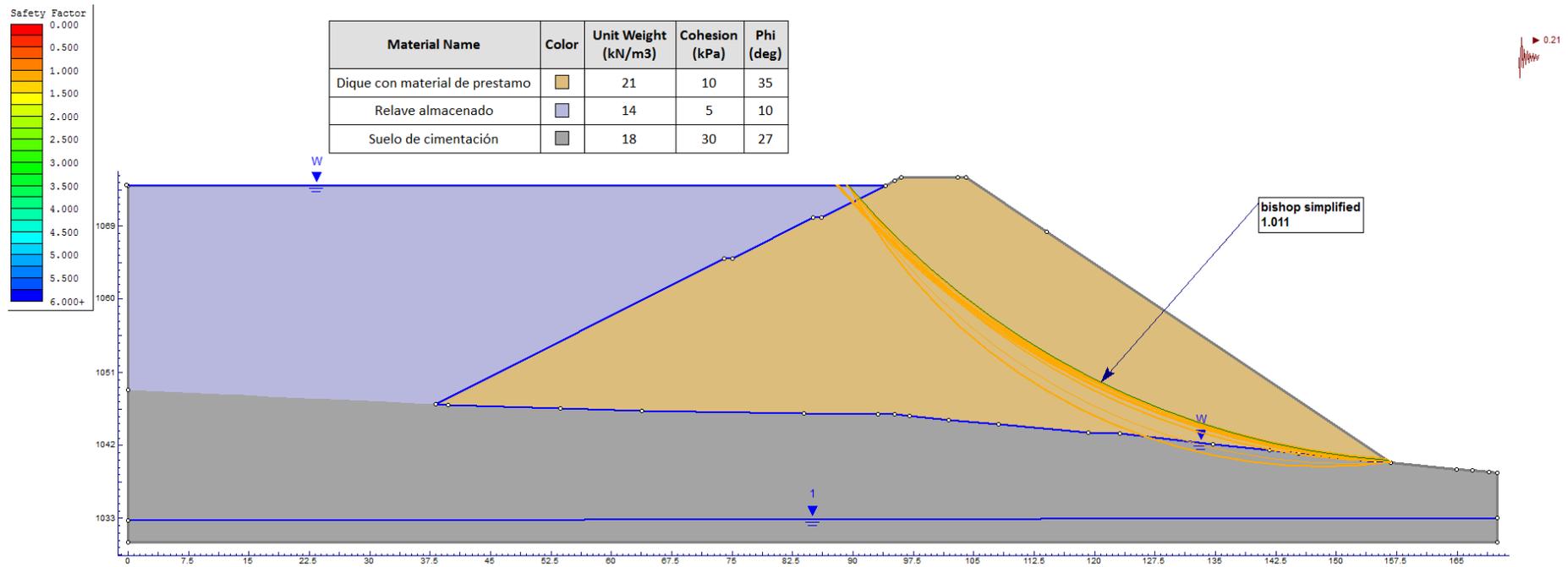


Gráfico 10. Análisis Estático - Falla circular - Sección de Análisis 2-2'

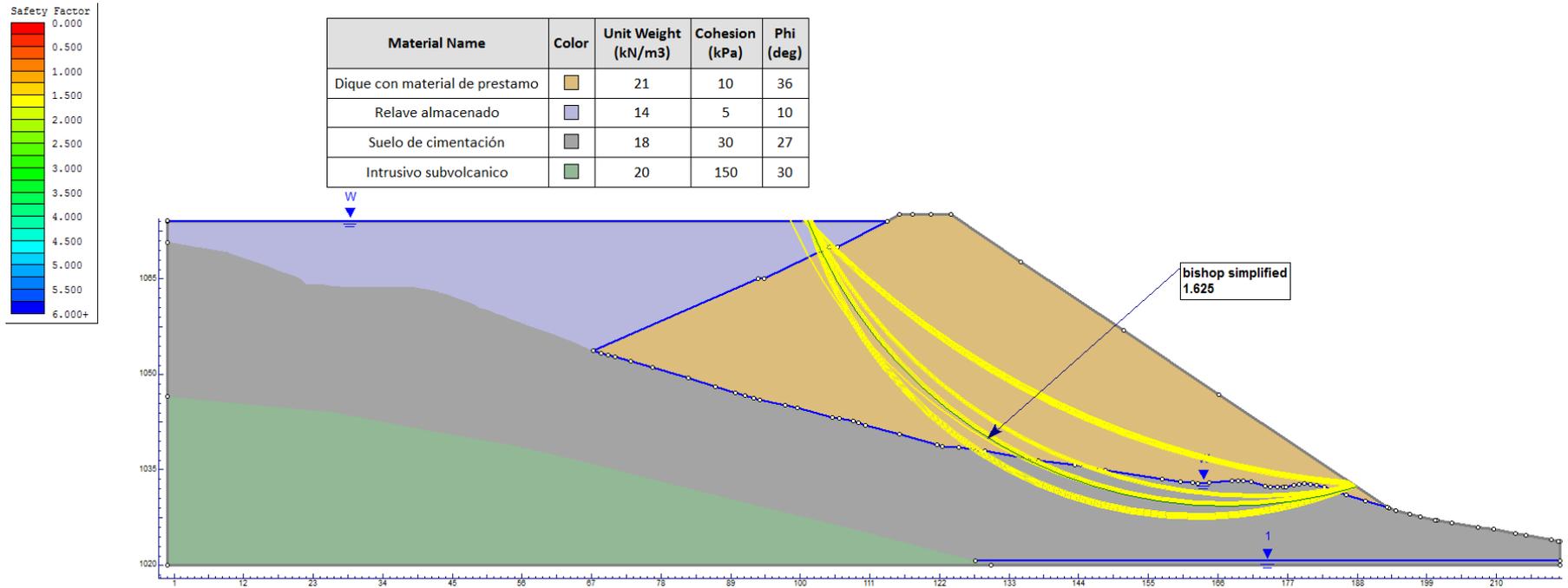


Gráfico 11. Análisis Pseudo-estático - Falla circular a Corto Plazo - Sección de Análisis 2-2'

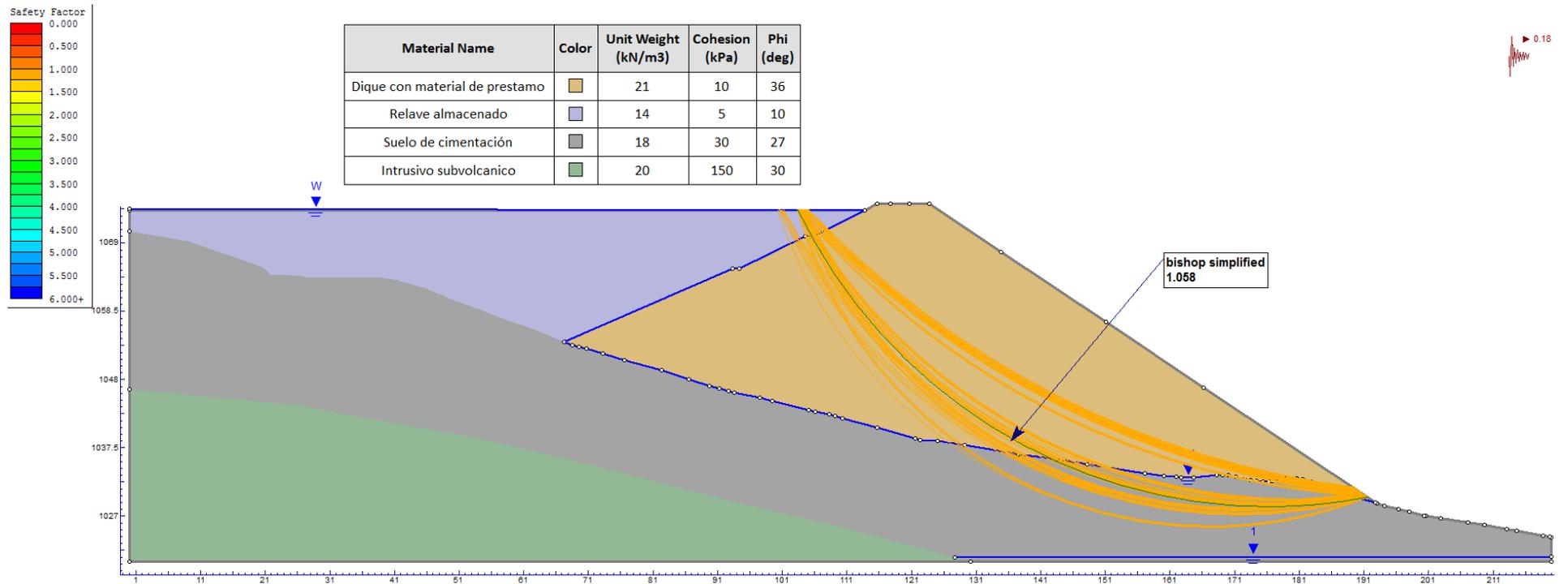


Gráfico 12. Análisis Pseudo-estático - Falla circular a Largo Plazo - Sección de Análisis 2-2

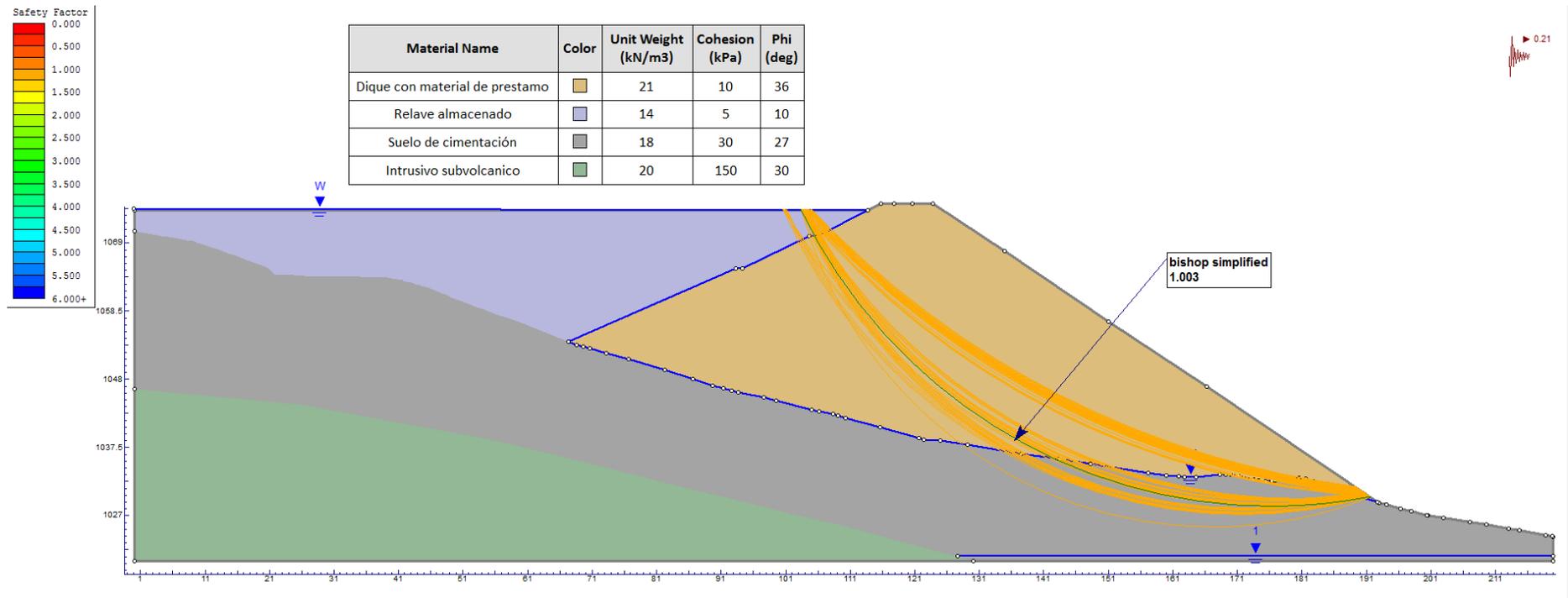


Tabla 36: Resumen de resultados de factores de seguridad método aguas abajo

Sección	Estático	Factores de Seguridad	
		Pseudo – Estático Corto plazo	Pseudo – Estático Largo plazo
1-1'	1.529	1.068	1.011
2-2'	1.625	1.058	1.003

(Elaboración propia)

4.7 Instalaciones auxiliares en la construcción del depósito de relaves Chacchulle IV

Las instalaciones auxiliares se indican en el plano 2018-DC-201:

Sistema de revestimiento del vaso del depósito de relaves.- El diseño considera la impermeabilización total del vaso del depósito con material de geomembrana. Las superficies tanto del dique y de las zonas de corte requerirán ser preparadas para la instalación de la geomembrana. En general, la preparación de las superficies consistirá en remover todas las partículas mayores a 2" y suavizar con rodillo liso la superficie. El tipo de geomembrana a instalar es simple texturada de 1.5 mm de espesor (60 mil), que será instalada sobre geotextil no tejido de 300 gr/m², para superficies con taludes, y sobre material de baja permeabilidad, para plataformas (piso) del depósito.

Sistema de sub drenaje.- El sistema de sub drenaje de agua subterránea se instalará a fin de coleccionar flujos de filtraciones y de agua subterránea debajo del revestimiento del vaso del depósito.

La infiltración coleccionada por el sistema de sub drenaje del depósito de relaves se transportará por debajo del dique hasta la poza de Emergencia.

Pozas de emergencia (control de fugas).- Esta poza se ubicará aguas abajo del dique final, almacenará posibles fugas y flujos de infiltración recolectados por el sistema de sub drenaje.

Disposición de la pulpa de relave.- El relave se depositará a través de una serie de tuberías de descarga instaladas en el dique del depósito proyectado en las diferentes Fases de construcción; las tuberías de descarga serán espaciadas según las necesidades de disposición de la pulpa de relave desde las tuberías de descarga, formando playas.

Los puntos de disposición activa rotarán frecuentemente alrededor del perímetro de los depósitos a fin de distribuir uniformemente las arenas de relave y mantener la poza de agua superficial en la ubicación deseada. Esto debe producir capas relativamente delgadas de relave que se drenarán y consolidarán durante la operación. Las tuberías de descarga se extenderán desde las tuberías de distribución hasta la playa activa, de manera que el relave en pulpa se pueda entregar en la cara interior e inferior del dique.

Sistema de agua recuperada.- El material de relave se depositará usando puntos de descarga con rotación frecuente alrededor del dique perimetral, para construir playas duras y drenadas contra los taludes interiores y para desplazar la poza de agua superficial hacia la zona Noreste. El sistema de recuperación de agua sobrenadante del vaso del depósito comprende los siguientes sectores: recuperación desde el agua sobrenadante mediante una balsa donde se instalará una bomba a fin de bombear el flujo y transportar mediante una tubería, hasta la Poza de Distribución ubicada en la parte alta del “Cerro Muerto”, aguas arriba del depósito de relaves proyectado, desde este lugar se enviará el flujo a través de una tubería a la poza de colección existente, ubicada al pie de talud del dique del depósito de relaves Chacchuille I (en operación), finalmente desde esta poza se enviará a la Planta Concentradora existente.

Sistema de transporte de relaves.- El sistema de conducción de relaves, consiste en una línea de tubería, desde la Planta Concentradora hasta el depósito de relaves Chacchuille IV mediante los puntos de distribución de relave ubicados en la cresta del dique proyectado. El primer tramo de la tubería se instalará sobre un canal revestido con geomembrana. En tanto que el segundo tramo de la tubería corresponde a la instalación con la berma de seguridad, ubicada a lo largo de la cresta del dique.

Canal de coronación.- Con la finalidad de captar las aguas de escorrentía superficial de la zona “aguas arriba” del depósito de relaves Chacchuille IV, se ha previsto la construcción de un canal de coronación.

Accesos.- Se ha proyectado construir dos (2) accesos para respaldar las actividades de construcción del depósito de relaves Chacchuille IV e instalaciones auxiliares. Los caminos generalmente se desarrollan en corte, pero pueden tener áreas localizadas de relleno para mantener la continuidad de la nivelación.

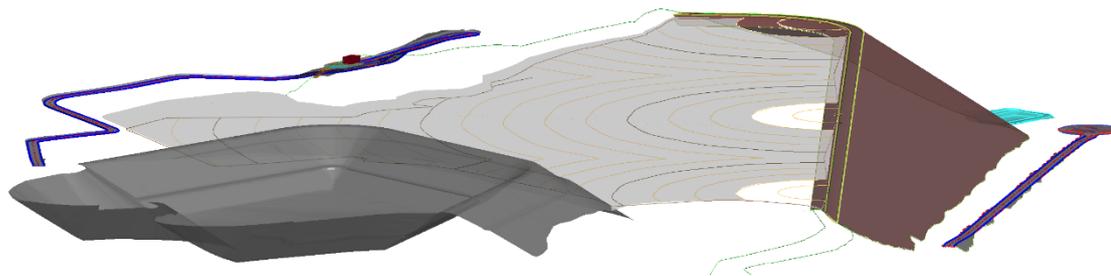


Figura 23 Vista isométrica del depósito de relaves chacchuille IV

4.8 Presupuesto

4.8.1 Presupuesto método línea central

PRESUPUESTO			
Título:	Métodos de crecimiento para la viabilidad en la construcción del depósito de relaves Chacchuille IV		
Ubicación:	Distrito de Huanuhuanu, provincia de Caraveli, región Arequipa		
Método:	Línea central		
Fecha:	Mayo 2018		
ITEM	DESCRIPCIÓN	C. PARCIAL (US \$)	TOTAL (US \$)
1	fase 1		2,978,972.21
01.01	Construcción de dique elev. 1,065.00 msnm		1,993,592.00
01.02	sistema de impermeabilización		985,380.21
01.02.01	movimiento de tierras	266,068.57	
01.02.02	materiales geosinteticos	719,311.64	
2	fase 2		2,154,510.04
02.01	Construcción de dique elev. 1,070.00 msnm		871,106.89
02.02	sistema de impermeabilización		1,283,403.16
02.02.01	movimiento de tierras	995,298.79	
02.02.02	materiales geosinteticos	288,104.37	
3	fase 3		2,274,994.21
03.01	Construcción de dique elev. 1,075.00 msnm		1,066,727.45
03.02	sistema de impermeabilización		1,208,266.76
03.02.01	movimiento de tierras	1,006,396.73	
03.02.02	materiales geosinteticos	201,870.03	
	COSTO DIRECTO (US \$):		7,408,476.47

4.8.2 Presupuesto método aguas abajo

PRESUPUESTO			
Título:	Métodos de crecimiento para la viabilidad en la construcción del depósito de relaves Chacchuille IV		
Ubicación:	Distrito de Huanuhuanu, provincia de Caraveli, región Arequipa		
Método:	Aguas abajo		
Fecha:	Mayo 2018		
ITEM	DESCRIPCIÓN	C. PARCIAL (US \$)	TOTAL (US \$)

1	fase 1		2,978,972.21
01.01	Construcción de dique elev. 1,065.00 msnm		1,993,592.00
01.02	sistema de impermeabilización		985,380.21
01.02.01	movimiento de tierras	266,068.57	
01.02.02	materiales geosinteticos	719,311.64	
2	fase 2		1,881,611.26
02.01	Construcción de dique elev. 1,070.00 msnm		1,628,007.95
02.02	sistema de impermeabilización		253,603.31
02.02.01	movimiento de tierras	46,161.67	
02.02.02	materiales geosinteticos	207,441.64	
3	fase 3		2,514,560.50
03.01	Construcción de dique elev. 1,075.00 msnm		2,263,438.74
03.02	sistema de impermeabilización		251,121.76
03.02.01	movimiento de tierras	49,251.73	
03.02.02	materiales geosinteticos	201,870.03	
		COSTO DIRECTO (US \$):	7,375,143.97

Los metrados y presupuestos calculados para ambos métodos se presentaran en el Anexo N° 6

4.9 Evaluación ambiental

4.9.1 Impactos identificados durante la etapa de construcción:

- En términos de alteración, el relieve antes del inicio del proyecto ha sido modificado por actividades humanas, el porcentaje de alteración antes del proyecto es de 24 %.
- Actualmente el uso del suelo del área donde se ubicará el proyecto minero es está comprendida sobre un área donde desembocan varias quebradas tributarias distribuidas en drenaje subparalela, en las márgenes de estas quebradas se han formado depósitos de acumulación en abanico, que se denomina “Cono Aluvial”. El cuál con el desarrollo del proyecto se generará cambio hacia suelo.
- La utilización de explosivos para la explotación de canteras y accesos generará ruido, material particulado y vibraciones.
- Movimiento de tierras para el perfilado del terreno, construcción de estructuras, habilitación de accesos, construcción del dique de arranque, carga y descarga del material y el acarreo generará ruido por el funcionamiento de equipos, generación de material particulado (PM₁₀, PM_{2.5}, Ar, Pb), gases (SO₂, NO₂, H₂S, CO₀₃) y por el consumo de combustibles emitirá gases de combustión.
- Dado que laborarán personas durante la etapa de construcción generarán aguas residuales domésticas

- Debido al desarrollo de las labores subterráneas, generarán efluentes de mineros.
- El mantenimiento de equipos utilizados durante la construcción, generará residuos sólidos y líquidos.
- La circulación de vehículos dentro del área de construcción de los componentes generará polvos.
- Generación de residuos domésticos e industriales (peligrosos y no peligrosos), durante la etapa de construcción del proyecto.

4.9.2 Impactos identificados durante la etapa de operación

- Las labores subterráneas y la explotación de canteras generarán gases de voladuras, material particulado y ruidos.
- El material de relave se depositará usando puntos de descarga con rotación frecuente alrededor del dique perimetral, para construir playas duras y drenadas contra los taludes interiores y para desplazar la poza de agua superficial hacia la zona Noreste.
- Recuperación del agua sobrenadante mediante una balsa donde se instalará una bomba a fin de bombear el flujo y transportar mediante una tubería hasta la Poza de Distribución ubicada en la parte alta del “Cerro Muerto”, aguas arriba del depósito de relaves proyectado, desde este lugar se enviará el flujo a través de una tubería a la poza de colección existente, ubicada al pie de talud del dique del depósito de relaves Chacchulle I (en operación), finalmente desde esta poza se enviará a la Planta Concentradora existente.
- Efluentes domésticos generados en los campamentos y oficinas
- Efluentes industriales generados en el proceso, principalmente las aguas que se generan por las filtraciones en las labores subterráneas o aguas de mina, agua clarificada o excedente del depósito de relaves.
- Residuos sólidos domésticos generados durante la operación del proyecto.
- Residuos industriales peligrosos y no peligrosos generados durante la etapa de operación.
- Incremento de material particulado (polvos) por el tránsito de vehículos pesados y livianos dentro del área de operación y vías de accesos.
- El mantenimiento de equipos e infraestructuras de la unidad minera generará residuos sólidos.

- El movimiento de tierras, la explotación de mina y canteras generarán material particulado y alteración del ruido.
- Un potencial de impacto al suelo puede presentarse por derrames de sustancias tóxicas, como relaves, hidrocarburos, entre otros.
- Alteración de la calidad de suelo debido a la emisión de polvo fugitiva por la erosión eólica alrededor de las áreas de actividad minera. Otros efectos graves son si el polvo en el suelo tiene contenidos metálicos.
- Generación de efluentes industriales producto del agua excedente que proviene de las labores mineras, del depósito de relaves, asimismo, del mantenimiento de equipos e instalaciones que genera agua con contenidos de hidrocarburos.
- Alteración debido a la extracción del agua subterránea y posible alteración debido a las actividades de minado, perforación y voladuras en el proceso de explotación.
- Impacto a los hábitats faunísticos, debido al desplazamiento de la fauna, por el tránsito de vehículos, emisión de ruidos.
- Alteración de la calidad paisajística, debido a la explotación de las canteras, disposición de desmonte y disposición de relaves.

4.9.3 Impactos identificados durante la etapa de cierre

- En el cierre temporal se suspenderán los trabajos de explotación y/o beneficio lo cual involucrará un mantenimiento a las instalaciones para su reinicio de actividades lo que generará residuos (peligrosos y no peligrosos).
- En el cierre progresivo o final demolerán estructuras construidas que no serán utilizadas en el futuro, lo que generará desmonte y emisión de ruido.
- En el cierre final el desmantelamiento de equipos y maquinarias tanto de mina como de planta de beneficio generará residuos.
- Movimiento de tierra para la estabilización de los depósitos y para la cobertura de áreas disturbadas.
- Revegetación de áreas, para recuperar la cobertura vegetal a un estado similar antes de la intervención, dado que implementará la revegetación de las áreas en cierre.
- Generación de residuos domésticos, que serán dispuestos en un relleno sanitario.
- Perturbación de la fauna, debido a la demolición de las estructuras de concreto, todos los cuales emiten ruido.

- Incremento de la cantidad de residuos industriales, por las actividades de desmantelamiento y posibles impactos al suelo.
- Alteración de cursos de agua por obras hidráulicas complementarias de cierre.

Durante la evaluación de impactos ambientales no se han identificado impactos potenciales o que puedan ser ocasionados debido a un funcionamiento anormal del proyecto, por ello también se identifican y analizan los riesgos ambientales más significativos que puedan ocurrir durante el proceso del proyecto en sus diferentes etapas. Los riesgos identificados y considerados como moderados están ligados a los potenciales derrames accidentales cuyo impacto principal sería en agua y suelo dado al contenido de hidrocarburos o sustancias peligrosas para la etapa de operación el derrame de relaves.

CAPITULO V: DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1 Discusión de resultados

Para el método línea central, efectuando el análisis de estabilidad global condiciones estáticas y pseudo-estáticas, los factores obtenidos son menores que los mínimos recomendados y adoptados como criterio de diseño. Por lo tanto el dique del depósito de relaves no presentara niveles de estabilidad geotécnica lo cual es inapropiada para la construcción y operación. Ver tabla 33

Para el método aguas abajo, efectuando el análisis de estabilidad global condiciones estáticas y pseudo-estáticas, los factores obtenidos son mayores que los mínimos recomendados y adoptados como criterio de diseño. Por lo tanto el dique del depósito de relaves presentara niveles de estabilidad geotécnica apropiados en la etapa final de crecimiento y para la condición de abandono. Ver tabla 34

El resultado obtenido del análisis económico es la siguiente:

- El método línea central el presupuesto es de 7,408,476.47 (US \$)
- El método aguas abajo el presupuesto es de 7,375,143.97 (US \$)

Mediante los cálculos ejecutados, la capacidad de almacenamiento de relaves es:

- El método aguas abajo tiene una capacidad de 1367172.78 TM.
- El método línea central tiene una capacidad de 1177815.83 TM.

La construcción del depósito de relaves con el método línea central conlleva a tener un mayor riesgo en la seguridad de las personas y equipos, ya que para el crecimiento de las fases del dique, se realizara un tratamiento del relave almacenado en el vaso del depósito.

El impacto ambiental por la construcción del depósito de relaves con el método aguas abajo será superior en comparación con el método de línea central, ya que habrá mayor área disturbada, generación de polvo y ruido.

CONCLUSIONES

1. En el estudio realizado, se concluye que el método de crecimiento aguas abajo presenta mejores alternativas de diseño y construcción del depósito de relaves Chacchuille IV.
2. Los resultados del factor de seguridad obtenidos para el método aguas abajo son mayores a los mínimos recomendados y adoptados como criterios de diseño; ocurre lo contrario para el método línea central. Es decir, haciendo la comparación de los resultados obtenidos, se concluye que el método aguas abajo presentará niveles de estabilidad geotécnica apropiados en la etapa final de crecimiento y condición de abandono.
3. El resultado del análisis económico efectuado para el método línea central asciende a US\$ 7'408,476.47 el cual es superior a US\$ 7'375,143.97 para el método aguas abajo. Por lo tanto se concluye que el método aguas abajo presenta una propuesta rentable y viable.
4. la construcción del depósito de relaves con el método línea central conlleva a tener un mayor riesgo en la seguridad de las personas y equipos, respecto al método aguas abajo. Sin embargo, para este último, habrá mayor área disturbada, generación de polvo y ruido.

RECOMENDACIONES

1. Las tres (3) fases de construcción del dique del depósito de relaves Chacchuille IV, deben ser conformadas con material de préstamo proveniente de la excavación de la zona del vaso y de canteras adyacentes al depósito de relaves proyectado, los mismos que deben ser transportado y conformados (relleno) utilizando equipo pesado.
2. El material de construcción del dique, debe ser compactado al 95% del proctor modificado.
3. La impermeabilización total del vaso del depósito debe ser con material de geomembrana (HDPE). Las superficies tanto del dique y de las zonas de corte deben estar previamente preparadas para la instalación de la geomembrana. En general, la preparación de las superficies consistirá en remover todas las partículas mayores a 2" y suavizar con rodillo liso la superficie.
4. El borde libre debe ser de 1 m de altura como mínimo y esta debe estar ubicado en la zona este del dique del depósito de relaves, se recomienda mantener alejado el espejo de agua respecto al dique.
5. Para futuros recrecimientos del dique del depósito de relaves Chacchuille IV, se debe efectuar los estudios geotécnicos correspondientes.
6. Para la ejecución del proyecto, implementar todas las medidas de seguridad, prevención, mitigación, contingencia y compensación para disminuir al mínimo los impactos ambientales que puedan generarse.
7. Se debe efectuar el monitoreo permanente de la instrumentación geotécnica dispuesta en área del depósito de relaves, el cual está comprendido por piezómetros, inclinómetro e hitos topográficos.
8. Implementar un manual de operación e inspecciones geotécnicas y definir los niveles de altura de los niveles piezométricos para cada etapa de crecimiento.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Alva Hurtado , J. E. (s.f.). *Diseño sísmico de presas de relaves*. Universidad Nacional de Ingeniería.
2. Alva Hurtado, J. E. (s.f.). *Exploración Geotécnica*. Peru: Universidad Nacional de Ingeniería.
3. Bishop. (1995). Coeficiente de Seguridad. En *Vol. 2* (págs. 132-236).
4. Braja , M. (2006). *Fundamentos de ingeniería geotécnica*.
5. Comité Nacional Español de grandes presas. (1999). Madrid España.
6. E.030 RNE 2016. (s.f.). *LA norma tecnica E.030 Diseño sismorresistente* .
7. Juárez B., E., & Rico R., A. (2005). *Mecánica de Suelos (Tomo I, II Y III)*. México: Limusa, S.A.C.
8. Minem. (2015). *Guía Ambiental Para el Manejo de Relaves Mineros*. Perú: Ministerio de Energía y Minas del Perú.
9. Nova, L. (2015). *Métodos de disposición de relaves - Estructuras y tipo de presas*. España: WWW.MAQUINARIAS PESADAS.ORG.
10. Ordoñez, A. (1984). *Canchas de relaves de concentradoras mineras. Análisis de estabilidad de presas*. .
11. Ramírez Moradé, N. A. (2007). *Guía Técnica de Operación y Control de Depósitos de Relaves*. Chile: Servicio Nacional de Geología y Minería.
12. Serio, L. M. (1998). Arcadis Geotécnica.
13. Sociedad Nacional de Minería. (2003). *Construcción y operación de tranques de relaves*. Chile: Sociedad Nacional de Minería.
14. Sowers , G. (1972). *Introducción a la Mecánica de Suelos y Cimentaciones*. México: Limusa-Wiley S. A.
15. Terzaghi , K., & Peck, R. (1975). *La Mecanica de Suelos en la Ingeniería Practica*. Barcelona: Ateneo.
16. Terzaghi K. (2002). *Ingeniería y Geología Diccionario Esencial de las Ciencias*. Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales.
17. Vector. (2013). *Estudio de ingeniería de detalle para el crecimiento de la presa de relaves "EL Porvenir" a la cota 4,115 msnm*.

ANEXOS

ANEXO N° 01. Matriz de consistencia.

ANEXO N° 02. Perfil estratigráfico.

ANEXO N° 03. Ensayos de densidad de campo.

ANEXO N° 04. Ensayos de laboratorio.

ANEXO N° 05. Planos.

ANEXO N° 06. Metrado y presupuesto.

ANEXO N° 01. Matriz de consistencia.

TÍTULO: “MÉTODOS DE CRECIMIENTO PARA LA VIABILIDAD EN LA CONSTRUCCIÓN DEL DEPÓSITO DE RELAVES CHACCHUILLE IV”

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLE	DIMENSIONES	INDICADORES	METODOLOGÍAS	
PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPÓTESIS GENERAL	V1: Métodos de crecimiento de depósito de relaves	D1: Métodos aguas abajo	I1: Configuración geométrico	<p>Método: Científico</p> <p>Tipo: Aplicada y cuantitativo</p> <p>Nivel: Explicativo</p> <p>Diseño: Cuasi-experimental</p> <p>Población: Está constituido por los depósitos de relaves construidos con métodos de crecimiento aguas abajo y línea central, existentes en la concesión de beneficio “Chacchuille” de la Cía. Minera Caraveli S.A.C. y de otras empresas mineras.</p> <p>Muestra: Depósito de relaves Chacchuille IV de Cía. Minera Caraveli S.A.C.</p> <p>Muestreo: No probabilístico o dirigido</p>	
¿En qué medida, influyen los métodos de crecimiento para la construcción del depósito de relaves Chacchuille IV de CIA Minera Caraveli S.A.C.?	Determinar la influencia de los métodos de crecimiento para la construcción del depósito de relaves Chacchuille IV de CIA Minera Caraveli S.A.C.	Los métodos de crecimiento influyen en la viabilidad para la construcción del depósito de relaves Chacchuille IV de CIA Minera Caraveli S.A.C.		D2: Método línea central	I1: Configuración geométrico		
PROBLEMAS ESPECÍFICOS	OBJETIVOS ESPECIFICOS	HIPÓTESIS ESPECIFICAS		V2: Viabilidad para la construcción del depósito de relaves Chacchuille IV	D1: Estabilidad física		I1: Parámetros geotécnicos
¿De qué manera influyen los métodos de crecimiento en la estabilidad física del depósito de relaves Chacchuille IV?	Determinar la influencia de los métodos de crecimiento en la estabilidad física del depósito de relaves Chacchuille IV.	Los métodos de crecimiento influyen en la estabilidad física del depósito de relaves Chacchuille IV.			D2: Presupuesto		I1: Medrado
¿Qué método de crecimiento es económicamente factible para la construcción del depósito de relaves Chacchuille IV?	Evaluar los métodos de crecimiento del depósito de relaves Chacchuille IV, con la finalidad de determinar la factibilidad económica para su construcción.	Los métodos de crecimiento influyen en la factibilidad económica para la construcción del depósito de relaves Chacchuille IV.			I2: Precios unitarios		
¿En qué medida influyen los métodos de crecimiento del depósito de relaves Chacchuille IV al impacto del medio ambiente?	Determinar el método de crecimiento que genere menor impacto al medio ambiente.	Los métodos de crecimiento del depósito de relaves Chacchuille IV, generan impactos al medio ambiente.	D3: Impacto ambiental		I1: Guías ambientales		

