

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA Y
METALÚRGICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA



**“EVALUACIÓN GEOTÉCNICA PARA LA
CONSTRUCCIÓN DE LA PRESA HUANZO”**

TESIS

PRESENTADA POR:

MARCIAL ALBERTO NINA BARRAZUETA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO GEÓLOGO

PUNO – PERÚ

2017

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA Y
METALÚRGICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA

TESIS

**“EVALUACIÓN GEOTÉCNICA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA
PRESA HUANZO”**

PRESENTADO POR:

MARCIAL ALBERTO NINA BARRAZUETA

PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE

INGENIERO GEÓLOGO



APROBADO POR EL JURADO REVISOR, CONFORMADO POR:

PRESIDENTE

.....
M. Sc. HECTOR R. MACHACA CONDORI

PRIMER MIEMBRO

.....
M. Sc. ROGER GONZALES ALIAGA

SEGUNDO MIEMBRO

.....
Ing. MAURICIO PERALTA MOLINA

DIRECTOR DE TESIS

.....
M. Sc. LEONEL PALOMINO ASCENCIO

ÁREA: Geotécnia

TEMA: Evaluación geotécnica para la construcción de presa

PUNO – PERÚ

2017

DEDICATORIA

A mis queridos padres Ricardo y Juana, por brindarme su apoyo incondicional aún más en momentos difíciles pasado en mi vida y a seguir este camino arduo.

A mis queridos hermanos Billy, Adrián, Verónica, Yovana, Javier y Karina; por ese aliento y apoyo incondicional día a día hasta llegar a este momento.

A mis queridos sobrinos Rossy, Gary, Fabricio, Ariana, Rodarick, Lenny, Gabriela y Javier, por brindarme muchos momentos lindos y encaminarlos a un futuro profesional.

A mi novia Maribel Mamani Quispe, por ese aliento, apoyo y amor incondicional.

AGRADECIMIENTO

- A Jehová mi Dios, por brindarme esta vida, guiarme por el buen camino.
- A mí querida madre, mi querido padre y mis queridos hermanos, por sus sabios consejos, aliento, no perder la fe en mí; aun en momentos difíciles durante mi formación profesional.
- A la empresa AGUA Y AGRO ASESORES ASOCIADOS S.A.C. Por darme la oportunidad de realizar esta investigación.
- A la Universidad Nacional del Altiplano-Puno, por ser mi alma mater y mentora en mí proceso de desarrollo personal y profesional.
- Al M.Sc. Leonel Palomino Ascencio, por aceptar ser mi guía y tutor en este trabajo de investigación.
- A los docentes de la escuela profesional de Ingeniería Geológica UNA-PUNO, por haberme transmitido sus conocimientos, consejos y experiencia para desenvolverme en mi vida profesional.
- Finalmente agradezco a todos las personal que influyeron en mí y apoyaron durante esta ardua labor de preparación profesional.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO	IV
ÍNDICE GENERAL	V
INDICE DE FIGURAS	IX
INDICE DE TABLAS	XI
INDICE DE CUADROS.....	XII
INDICE DE ACRÓNIMOS	XIII
RESUMEN	XV
ABSTRACT.....	XVI

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 JUSTIFICACION DEL PROYECTO.....	2
1.2 HIPÓTESIS.....	3
1.3 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	3
1.3.1 Objetivo General	3
1.3.2 Objetivos Específicos.....	3
1.4 ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN.....	4

CAPITULO II

REVISION DE LITERATURA

2.1 CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS DE LOS MATERIALES	5
2.1.1 Granulometría	5
2.1.2 Graduación	7
2.1.3 Forma	7
2.1.4 Plasticidad	8
2.1.5 Estructura	9
2.1.6 Límite Líquido (LL).....	10
2.1.7 Límite Plástico (LP)	10
2.1.8 Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).....	11
2.1.8.1 Suelos Gruesos.....	11
2.1.8.2 Suelos Finos.	11
2.2 ENSAYOS DE PERMEABILIDAD.....	12

2.2.1	Tipo Lefranc.....	13
2.2.1.1	Lefranc a Nivel Variable.....	13
2.2.1.2	Lefranc a Nivel Constante.....	14
2.3	ENSAYOS DE LABORATORIO.....	15
2.3.1	Ensayo de Corte Directo	15
2.3.2	Análisis Granulométrico	16
2.3.3	Determinación de los Límites de Atterberg	16
2.3.4	Contenido de Humedad.....	16
2.4	SONDEO ELECTRICO VERTICAL	17
2.4.1	Dispositivo Electrónico Schlumberger	17
2.4.2	Valores Típicos de Resistividad.....	18
2.5	FENOMENO DE FILTRACION EN LA CIMENTACIÓN DE PRESAS	19
2.5.1	Flujos de Filtración en Suelos y Rocas	19
2.5.2	Velocidad de Descarga y Filtración Real.....	20
2.5.2.1	Velocidad de Descarga.....	20
2.5.2.2	Velocidad de Filtración (v_1).....	20
2.5.3	Número de Reynolds.....	20
2.5.4	Ley de Darcy	21
2.5.5	Ecuaciones Hidrodinámicas que Gobiernan el Flujo de Agua a Través de Suelos	22
2.5.5.1	Ecuación de Laplace	22
2.5.5.2	Ecuación de Continuidad	23
2.5.6	Líneas de Corriente y Líneas Equipotenciales	25
2.5.7	Red de Flujos	26
2.6	FACTORES QUE FAVORECEN LA FILTRACIÓN.....	28
2.7	EFFECTOS DE LAS FILTRACIONES.....	28
2.8	GENERALIDADES SOBRE PRESAS DE TIERRA.....	29
2.8.1	Demanda.	30
2.8.2	Volumen Útil de Almacenamiento.	30
2.8.3	Volumen de Sedimentos.	30
2.8.4	Estructuras de Captación.....	31
2.8.5	Vertimiento de Excesos.	31
2.9	DEPÓSITOS GLACIARES.....	31
2.10	DEPOSITOS ALUVIALES	32

2.11	GEOTECNIA.....	32
2.11.1	Métodos de Aplicación en Geotecnia	33

CAPITULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1	MATERIALES	34
3.2	MÉTODOS	34
3.2.1	Actividad de Gabinete Inicial	35
3.2.2	Actividades de Campo	35
3.2.2.1	Mapeo Geológico.....	35
3.2.2.2	Prospección Geofísica.....	36
3.2.2.3	Excavación a Cielo Abierto	36
3.2.2.4	Perforaciones Diamantinas	36
3.2.2.5	Ensayo de Permeabilidad Tipo Lefranc	37
3.2.3	Actividades de Laboratorio	38
3.2.4	Actividades de Gabinete Final	38
3.2.4.1	Elaboración de Planos.....	38
3.2.4.2	Evaluación de la Estabilidad de Taludes.....	39
3.2.4.3	Análisis de Filtración	40
3.2.4.4	Redacción del Informe Final.....	41

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1	CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	42
4.1.1	Ubicación	42
4.1.2	Accesos	42
4.1.2.1	Via terrestre.....	42
4.1.2.2	Vía Aérea	43
4.1.3	Clima.....	43
4.1.4	Fauna y Flora	44
4.1.5	Geología Local.....	45
4.1.5.1	Litología.....	45
4.1.5.2	Geomorfología Local	47
4.1.5.3	Geodinámica Interna	48
4.1.6	Investigaciones Geotécnicas	52
4.1.6.1	Sondeo Eléctrico Vertical	52

4.1.6.2	Excavaciones a Cielo Abierto	55
4.1.6.3	Perforaciones Diamantinas	58
4.1.6.4	Ensayos Realizados Insitu	59
4.1.6.5	Ensayos de Laboratorio.....	60
4.1.6.6	Análisis de Estabilidad de Taludes	61
4.2	CARACTERIZACIÓN DE LA PRESA	62
4.2.1	Características de la Presa.....	62
4.2.2	Estabilidad de Talud en Presa	62
4.2.3	Capacidad Portante del Suelo	70
4.2.4	Análisis de Infiltración.....	72
4.2.4.1	Parámetros Geotécnicos del Suelo de Cimentación.....	72
4.2.4.2	Calculo de Infiltración en Presa	73
4.2.5	Sistema de Impermeabilización.....	80
4.2.5.1	Inyecciones con Lechada de Cemento	81
4.2.5.2	Pantalla Impermeable.....	83
4.2.5.3	Separación de los Taladros de Inyección	83
	CONCLUSIONES	85
	RECOMENDACIONES	86
	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	87
	ANEXOS	
	ANEXO I : PLANOS	
A.	Plano de Ubicación y Accesos	
B.	Plano Geológico Local	
C.	Perfil Estratigráfico	
D.	Plano de Ubicación de Cantera	
E.	Plano de SEV-Planta	
F.	Perfil Estratigráfico-SEV	
	ANEXO II : INVESTIGACIÓN GEOTÉCNICA	
A.	Perforaciones Diamantinas	
B.	Calicatas	
	ANEXO III : ENSAYOS DE LABORATORIO	
1.1	Terreno de Fundación	
1.2	Cantera	
	ANEXO IV : ENSAYOS DE PERMEABILIDAD	

INDICE DE FIGURAS

N°	DESCRIPCIÓN	PÁG.
Figura N° 1:	Ejemplo de curva granulométrica.	7
Figura N° 2:	Formas de partículas de suelo.	8
Figura N° 3:	Tipos de estructuras en suelos.	9
Figura N° 4:	Carta de plasticidad de A. Casagrande.	10
Figura N° 5:	Esquema del ensayo Lefranc a nivel variable.....	14
Figura N° 6:	Esquema del ensayo Lefranc a nivel contante	15
Figura N° 7:	Dispositivo Electrónico Schlumberger lineal simétrico	18
Figura N° 8:	Un fluido en movimiento con las líneas de corriente	23
Figura N° 9:	Diagrama de líneas de corriente y líneas equipotenciales	25
Figura N° 10:	Red de flujos.	26
Figura N° 11:	Perfil tipo de depósitos glaciares	32
Figura N° 12:	Ejemplo de Modelación en ingeniería geológica.....	33
Figura N° 13:	Ejemplo de análisis de estabilidad de talud con el programa Slope/w. ...	40
Figura N° 14:	Ubicación de la zona de estudio.	43
Figura N° 15:	Vista panorámica de la laguna Huanzo.....	44
Figura N° 16:	Flora y fauna laguna Huanzo	44
Figura N° 17:	Columna estratigráfica a nivel local.	45
Figura N° 18:	Fotografía de identificación de los diferentes depósitos dominantes en la zona de investigación.	46
Figura N° 19:	Esquema de la zona de subducción en el Perú.....	49
Figura N° 20:	Mapa de zonificación para el diseño sismo resistente.	50
Figura N° 21:	Mapa de distribución de isoaceleraciones para un 10% de excedencia en 50 años.....	51
Figura N° 22:	Plano de ubicación de los puntos SEV.	52
Figura N° 23:	Fotografía de la calicata 01.....	56
Figura N° 24:	Fotografía de la calicata 02.....	57
Figura N° 25:	Fotografía de la calicata 03).....	57
Figura N° 26:	Ubicación de Calicatas.....	58
Figura N° 27:	Ubicación de las perforaciones diamantinas.....	59
Figura N° 28:	Ensayos de permeabilidad tipo Lefranc.....	60

Figura N° 29: Diagrama de los componentes del análisis de estabilidad de taludes con embalsamiento).	64
Figura N° 30: Análisis de estabilidad pseudoestático con embalsamiento, talud aguas abajo.	65
Figura N° 31: Diagrama de los componentes del análisis de estabilidad de taludes con embalsamiento.	66
Figura N° 32: Análisis de estabilidad pseudoestático con embalsamiento, talud aguas arriba.	67
Figura N° 33: Diagrama de los componentes del análisis de estabilidad de taludes con desembalse rápido.	68
Figura N° 34: Análisis de estabilidad pseudoestático con desembalsamiento rápido, talud aguas arriba.	69
Figura N° 35: Análisis de infiltración sin protección de talud ni cimentación.	74
Figura N° 36: Análisis de infiltración sin protección de talud ni cimentación – Resultados.	75
Figura N° 37: Análisis de infiltración con Geo membrana en la pantalla.	76
Figura N° 38: Análisis de infiltración con Geomembrana en el talud – Resultados.	77
Figura N° 39: Análisis de infiltración con Geomembrana en el talud e inyecciones de cemento.	78
Figura N° 40: Análisis de infiltración con Geomembrana en el talud e inyecciones de cemento – Resultados.	79
Figura N° 41: Esquema de las inyecciones de cemento en la Presa Huanzo.	82
Figura N° 42: Esquema de Las líneas de inyección Primarias, Secundarias y Terciarias	84

INDICE DE TABLAS

N°	DESCRIPCIÓN	PÁG.
	Tabla 1: Aberturas de mallas de la serie Americana.	6
	Tabla 2: Clasificación de suelos S.U.C.S.	12
	Tabla 3; Valores típicos de resistividad de geo materiales	19
	Tabla 4: Parámetros utilizados en el análisis en otra fuente.	63
	Tabla 5: Factores de seguridad recomendados.	63
	Tabla 6: Resultados del análisis de estabilidad de otra fuente.....	70
	Tabla 7: Capacidad de inyección con respecto a las permeabilidades.	81

INDICE DE CUADROS

N°	DESCRIPCIÓN	PÁG.
	Cuadro 1: Resumen de las calicatas realizadas.....	36
	Cuadro 2: Resumen de perforaciones diamantinas realizada.	37
	Cuadro 3: Parámetros geotécnicos obtenidos de los ensayos de laboratorio.....	40
	Cuadro 4: Parámetros utilizados en el análisis	41
	Cuadro 5 Recorrido de Lima-laguna Huanzo.	43
	Cuadro 6: Ubicación de Puntos SEV.	52
	Cuadro 7: Resultado de los sondajes Eléctricos Verticales.	53
	Cuadro 8: Resultado de los Sondajes Eléctricos Verticales-Sección Geo eléctrica A – A'	53
	Cuadro 9: Resultado de los Sondajes Eléctricos Verticales-Sección Geo eléctrica B - B'	54
	Cuadro 10: Resultado de los Sondajes Eléctricos Verticales-Sección Geo eléctrica C - C'	55
	Cuadro 11: Resumen de las calicatas realizadas.....	55
	Cuadro 12: Resumen de perforaciones diamantinas realizada.	58
	Cuadro 13: Resumen de los ensayos de permeabilidad en los sondeos.....	59
	Cuadro 14: Resultado de los ensayos de laboratorio CISMID-UNI.....	61
	Cuadro 15: Parámetros geotécnicos utilizados en el análisis.	63
	Cuadro 16: Resultados del análisis de estabilidad.	70
	Cuadro 17: Valores utilizados para la capacidad portante.....	71
	Cuadro 18: Parámetros geotécnicos del suelo de cimentación.	72
	Cuadro 19: Materiales empleados en el análisis.	73
	Cuadro 20: Resultados del análisis de infiltración.....	80

INDICE DE ACRÓNIMOS

A.A.S.H.T.O.:	American Association of State Highway and Transportation Officials o Asociación Americana de Autoridades Estatales de Carreteras y Transporte.
AP.:	Apurímac.
A.S.T.M.:	American Society for Testing and Materials (Sociedad Americana para Pruebas y Materiales).
A.S.T.M. D 1140:	Sociedad Americana para Pruebas y Materiales más finos que la malla N° 200).
°C:	Grados centígrados.
CISMID:	Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres.
C.N.E.G.P.:	Comité Nacional Español De Grandes Presas.
cm.:	Centímetros.
Cz., Ort. y Plg.:	Cuarzo, ortoclasas y plagioclasas.
d:	Diámetro.
E-030:	Manual de diseño sismo resistente.
Fm.:	Formación.
GC:	Grava Arcillosa.
GM:	Grava Limosa.
GPS:	Sistema de posicionamiento global.
Gr.:	Grupo.
h:	Altura.
Has.:	Hectáreas.
H.D.P.E.:	High Density Polyethylene (polietileno de alta densidad).
HQ y NQ:	Líneas de perforación diamantina.
INGEMMET:	Instituto Geológico Minero y Metalúrgico.
I.P.:	Índice de plasticidad.
K:	Coefficiente de permeabilidad.
Km.:	Kilómetros.
L.L.:	Límite líquido.
L.P.:	Límite plástico.
m.:	Metros.

mm.:	Milímetros.
m.s.n.m.:	Metros sobre el nivel del mar.
MTC:	Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú.
MMC:	Millones de metros cúbicos.
Nº:	Número.
N.F.:	Nivel freático.
σ':	Esfuerzo efectivo.
PGA:	Peak ground acceleration ó Aceleración máxima de terreno.
Pulg.:	Pulgadas.
Q:	Caudal.
S.E.V.:	Sondeo Eléctrico Vertical
S.U.C.S.:	Sistema unificado de clasificación de suelos.
μ:	Presión de poros.
U.T.M.:	Universal Translate Mercator. (Sistema de coordenadas universal transversal de Mercato)
WGS'84:	World Geodetic System 84(Sistema Geodésico Mundial 1984).
Δh:	Altura del agua sobre el nivel inicial.

RESUMEN

Esta investigación trata de la evaluación geotécnica de la zona de emplazamiento y material de préstamo para una presa de tierra cuyo almacenamiento es con fines de irrigación y con una capacidad de almacenamiento de $13'000,000 \text{ m}^3$. El área de estudio se localiza en el distrito de Santiago de Lucanamarca, provincia de Huancasancos, departamento de Ayacucho. Los objetivos de la investigación son: caracterizar los parámetros geotécnicos, análisis de estabilidad de talud de la presa, infiltración en el cuerpo y lugar de desplante de presa, en los cuales se realizaron trabajos de exploración geotécnica tales como mapeo geológico local, prospección geofísica, perforaciones diamantinas, excavación de calicatas, ensayos in situ de permeabilidad, ensayos de laboratorio y determinar el diseño de la geometría apropiado para la construcción de la presa. La metodología empleada es el cuantitativo, además de descriptivo, las técnicas de estudio conciernen a actividades de campo, laboratorio y gabinete con el fin de cuantificar los parámetros geotécnicos. Geológicamente el área presenta terrenos morrénicos (arenas limosas con bloques y material aluvial). Geomorfológicamente presenta relieves de pendiente suave a poco empinados. Los parámetros geotécnicos del cuerpo de presa corresponden a una clasificación SUCS arena limosa con gravas (SM-GM), su resistencia corresponde a un ángulo de fricción 42.4° , cohesión 0.36 kg/cm^2 y una permeabilidad promedio de $4.44 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$. Para el presente caso, el diseño de presa es: 12 m. de altura, 5 m. de coronación, taludes 1V/2H aguas arriba, 1V/1.8H aguas abajo, con un filtro horizontal de 15 m. Los parámetros geotécnicos para el lugar de cimentación son: clasificación SUCS arena limosa (SM), la resistencia corresponde a una cohesión de 0.34 Kg/cm^2 , ángulo de fricción 33.7° y una permeabilidad de $7.96 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$. Se hará un tratamiento con geosintético en la pantalla aguas arriba y tres líneas de inyecciones de cemento en el pie del talud aguas arriba. Se obtuvieron parámetros geotécnicos apropiados para su construcción, por lo cual la presa es estable debido a los factores de seguridad obtenidos; aguas arriba 2.181, aguas abajo 1.713 y para un desembalse rápido 1.416, utilizando el coeficiente sísmico 0.22 g. La infiltración obtenida con el tratamiento en la sección del eje de presa se redujo de $0.38 \text{ m}^3/\text{hora}$ a $0.11 \text{ m}^3/\text{hora}$, en la zona del pie de talud aguas arriba se redujo de $0.43 \text{ m}^3/\text{hora}$ a $0.15 \text{ m}^3/\text{hora}$.

Palabras Clave: Cimentación, estabilidad de talud, infiltración, parámetro geotécnico permeabilidad, relieve, talud.

ABSTRACT

This research deals with the geotechnical assessment of the site and lending material for an earth dam whose storage is for irrigation purposes and with a storage capacity of 13'000,000 m³. The study area is located in the district of Santiago de Lucanamarca, province of Huancasancos, department of Ayacucho. The objectives of the research are: to characterize the geotechnical parameters, analysis of dam slope stability, infiltration in the body and place of barrage dam, in which geotechnical exploration works such as local geological mapping, geophysical prospecting, diamond drilling, cavity excavation, in situ permeability testing, laboratory testing and design of appropriate geometry for dam construction. The methodology used is the quantitative, in addition to descriptive, the study techniques concern field, laboratory and office activities in order to quantify the geotechnical parameters. Geologically the area presents morainic grounds (silt sandy with blocks and alluvial material). Geomorphologically it presents soft slopes to little or no steep. The geotechnical parameters of the dam body correspond to a classification SUCS silt sandy with gravel (SM-GM), its resistance corresponds to a friction angle of 42.4°, cohesion 0.36 kg / cm² and an average permeability of 4.44xE-5 cm / s. For the present case, the dam design is: 12 m. of height, 5 m. of coronation, slopes 1V / 2H upstream, 1V / 1.8H downstream, with a horizontal filter of 15 m. The geotechnical parameters for the foundation site are: classification SUCS silt sandy (SM), the resistance corresponds to a cohesion of 0.34 kg / cm², friction angle 33.7 ° and a permeability of 7.96E-05 cm / s. A geosynthetic treatment will be performed on the upstream screen and three lines of cement injections in the foot of the upstream slope. Appropriate geotechnical parameters were obtained for its construction, reason why the dam is stable due to the safety factors obtained; upstream 2,181, downstream 1,713 and for a rapid unloading 1,416, using the seismic coefficient 0.22 g. The infiltration obtained with the treatment in the section of the dam axis was reduced from 0.38 m³ / hour to 0.11 m³ / hour, in the area of the foot of slope upstream was reduced from 0.43 m³ / hour to 0.15 m³ / hour.

Keywords: Foundation, slope stability, infiltration, geotechnical parameter permeability, relief, slope.

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

La intención principal de una presa es el estancamiento y almacenamiento de agua de manera segura. En la actualidad como en la historia las presas de tierra continúan siendo más comunes, principalmente porque en su construcción se utilizan materiales en estado natural o con un mínimo de tratamiento, sin embargo las presas emplazadas en terrenos aluviales o material no compactado presentan una permeabilidad moderada a alta, por tanto una parte del agua emplazada comienza a infiltrarse a través del cuerpo de la presa y de su cimentación. Cuando las infiltraciones aguas abajo llegan a ser suficientemente fuertes, provocan el arrastre de material en sus paredes, progresando así hasta aguas arriba, generando finalmente una falla completa por tubificación.

En razón a ello y para la seguridad de la presa durante y posterior a su construcción, se debe realizar un programa de inspección geotécnica en el suelo de fundación y cuerpo de presa, el cual consta principalmente de: auscultaciones geológicas a nivel superficial, reconocimiento del estrato no visible mediante métodos directos e indirectos, tales como las perforaciones diamantinas y prospección geofísica respectivamente, complementados con ensayos de campo y laboratorio.

Los parámetros geotécnicos de los materiales obtenidos mediante la inspección geotécnica, se utilizan en los análisis de cálculo por medio de software especializados en el área de la geotécnica, los cuales nos permiten obtener: la simulación de superficies de falla de los taludes del cuerpo de la presa y los niveles de infiltración de partículas de agua que siguen su recorrido hacia el cuerpo de la presa y el suelo de fundación. Con todo esto es posible determinar las soluciones apropiadas que faciliten la construcción de la presa de manera segura.

1.1 JUSTIFICACION DEL PROYECTO

En el Perú y en el mundo numerosas presas se han construido sin tomar la debida atención a la posibilidad de que se desarrollen problemas Geológicos-Geotécnico del área de emplazamiento, fue el caso de la presa Lagunillas, se esperó muchos años para concretar la construcción; a parte de lo económico, el principal problema fue la posibilidad de la excesiva filtración de agua por factores geológicos como la presencia de fallas y sistema de fracturamiento perpendiculares al eje de la presa.

Cuando se detiene el agua por medio de una estructura, tal como una presa, hay una masa de agua del depósito que drena por debajo y alrededor del estribos de la presa, este fenómeno se llama infiltración; ocurre a través de fisuras y aberturas de la roca y de los poros entre grano y grano del suelo; pero a este problema antes de la construcción se puede estimar la permeabilidad analizando los parámetros geotécnicos del suelo de fundación y material de préstamo para el cuerpo de presa.

Dentro de la cuenca Huanzo perteneciente al distrito de Santiago de Lucanamarca, en la cuenca Huanzo, se localiza la laguna Huanzo de aproximadamente 860827.63 m², lo cual se proyecta como el sistema de irrigación para tres comunidades principales como son: santa rosa de Ccocha, Lunanamarca y asunción de Erpa; que se encuentran entre 3700 a 3900 m.s.n.m. con aproximadamente 4500 Has de terrenos agrícolas, con lo cual se mejorará notablemente el nivel socio económico de la población de las tres comunidades principales; para ello se proyecta una presa de tierra en el cierre de esta laguna con una capacidad de almacenamiento de 13 MMC. aproximadamente. En la actualidad los terrenos cultivables antes mencionados no son aprovechados al 100% debido a la escases de agua en la época de estiaje que dura mayor parte del año, con precipitaciones pluviales en su época corta no garantizan la producción de dichos terrenos agrícolas, a causa de ello muchas familias no tienen una estabilidad económica, viéndose obligados a migrar a zonas urbanas cercanas, lejanas y muchas veces hacia la capital del país en busca de oportunidades de tener mayor ingreso y estabilidad económica.

Los parámetros geotécnicos del cuerpo de presa y lugar de fundación, estabilidad de taludes y grado de infiltración son materia de investigación, ya que estos son los factores más comunes que causan y afectan a obras similares; para estimar

valores nos apoyaremos de los parámetros geotécnicos obtenidos del suelo de fundación y el material de préstamo para el cuerpo de presa.

Como parte del planteamiento del problema, nos encontramos con las siguientes interrogantes.

- Las condiciones geotécnicas del terreno de fundación de la presa-Huanzo y los materiales de préstamo a utilizar, ¿serán adecuadas para su construcción?
- ¿Cuál será la geometría adecuada de taludes de la presa, para que esta sea estable?
- ¿Cómo influye la permeabilidad del área de desplante y cuerpo de presa para la estabilidad de la presa-Huanzo?

1.2 HIPÓTESIS

Con la evaluación geotécnica del área de emplazamiento y del material de préstamo se obtiene condiciones geotécnicas apropiadas para la construcción de la presa.

1.3 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

Los objetivos que direccionan este proyecto de investigación se han dividido en generales y específicos:

1.3.1 Objetivo General

Evaluar las características geotécnicas del área de emplazamiento y material de préstamo para la presa de tierra-Huanzo, con la finalidad de elaborar el estudio para el proceso constructivo.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Determinar los parámetros geotécnicos; de la zona de desplante de la presa y del material de préstamo.
- Evaluar la estabilidad de los taludes aguas arriba y aguas debajo de la presa, mediante el factor de seguridad.
- Evaluar la infiltración de agua del lugar de desplante y cuerpo de presa.

1.4 ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN

En este acápite, se pretende determinar el alcance de la investigación, definiendo lo que se pretende que sea y lo que no se pretende que sea ésta.

En primer lugar, la investigación no pretende imponer un método absoluto de auscultación geológica, ni establecer un orden en lo que respecta a la investigación geotécnica. Lo que esta tesis busca, es contribuir al conocimiento de los parámetros que condicionan los potenciales problemas que surgen en la construcción de una presa de tierra sobre terrenos morrénicos, por tal motivo, y para cumplir con los objetivos planteados se realizará una evaluación geotécnica en la zona de influencia del área de investigación, y en base a la inspección y análisis de los resultados de campo y laboratorio, se presentará la solución pertinente a los posibles problemas a encontrar. Para el cumplimiento de dicha evaluación se desarrollaron diferentes investigaciones las cuales se detallan a continuación:

- Caracterización geológica de la zona en estudio, en donde se identificó la litología, estratigrafía, estructuras geológicas, características geomorfológicas, zonas de alteración y procesos de geodinámica externa e interna.
- Evaluación local de la geodinámica externa de la zona que abarca el proyecto de investigación, a fin de determinar las alternativas de solución.
- Para la caracterización geotécnica se consideraron exploraciones de campo y ensayos de laboratorio, los cuales se determinaron en términos de estabilidad y condiciones del suelo.
- Ensayos de campo y laboratorio en muestras de suelos extraídos de la zona de investigación.
- Descripción de las condiciones de suelo, estratigrafía e identificación de los afloramientos presentes en la zona de investigación.
- Exploración de campo mediante perforaciones diamantinas y calicatas para efectuar los cortes geológicos y posterior interpretación de la geología y geotecnia.

CAPITULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS DE LOS MATERIALES

Las características geotécnicas del suelo juegan un papel de suma importancia en cualquier proyecto de construcción que involucre edificios, carreteras, presas y diques. Estos proyectos usan el suelo como material de ingeniería en términos de su capacidad para soportar las estructuras de apoyo y la conformación de cuerpos en las presas de tierra. A continuación se detallan algunos conceptos de aspectos geotécnicos de los materiales.

2.1.1 Granulometría

Las propiedades mecánicas de los suelos están íntimamente relacionadas con el tamaño y la forma de las partículas que los integran. Un suelo puede estar constituido predominantemente por partículas de tamaños muy semejantes entre sí, o bien, puede encontrarse con él una gran diversidad de tamaños, variando desde aquellos que no son visibles aun con los mejores microscopios ópticos (partículas coloidales) hasta rocas de 6 a 10 centímetros. “Si se hace pasar una porción de suelo a través de una serie de mallas o tamices de aberturas conocidas”, como los que indica la tabla 1, en cada una de ellas se irán deteniendo las partículas cuyo tamaño es mayor que la abertura de la malla que los retiene y menor que la inmediata superior” (Gonzales, 2002).

De esta manera puede establecerse la proporción relativa, en peso, de los diversos rangos de tamaño que constituyen el material en cuestión. Cuando se tienen dichas proporciones para un suelo dado se dice que se conoce su granulometría, o su textura.

A partir del tamiz N° 4 se diferencian los agregados finos de los gruesos, es decir de los tamaños 76.200 mm. a 4.750 mm. se consideran agregados gruesos (gravas), y de los tamaños 4.750 mm. a 0.075 mm. se les considera agregados finos(arenas), por último el porcentaje que pasa la malla -200, y según el ASTM D 1140, se le considera material fino (limos y arcillas)

Tabla 1: Aberturas de mallas de la serie Americana.

TAMICES	
SERIE AMERICANA	
NÚMERO DE MALLAS ABERTURA (Pulg.)	ABERTURA (mm)
3"	76.200
2 ½"	63.500
2"	50.800
1 ½"	38.100
1"	25.400
¾"	19.050
½"	12.700
⅜"	9.525
¼"	6.350
N° 4	4.750
N° 6	3.360
N° 8	2.360
N° 10	2.000
N° 16	1.180
N° 20	0.850
N° 30	0.600
N° 40	0.425
N° 50	0.300
N° 80	0.180
N°100	0.150
N° 200	0.075
- 200	ASTM D 1140

Fuente: Agua y Agro (2015).

Por otro lado la curva granulométrica representa en una gráfica, los resultados obtenidos en el laboratorio de un suelo desde el punto de vista del tamaño de las partículas que lo forman. Para graficar la curva granulométrica, debemos tomar en cuenta que los porcentajes de muestra que pasa cada uno de los tamices, se encuentran en el eje de las ordenadas y a una escala aritmética, en cambio la ordenación de la abertura del tamiz se encuentra en el eje de las abscisas y con una escala logarítmica; esto para facilitar la construcción de la curva granulométrica. El propósito del análisis

granulométrico, es determinar el tamaño de las partículas o granos que constituyen un suelo y fijar en porcentaje de su peso total, la cantidad de granos de distintos tamaños que el suelo contiene. (Das, 1999).

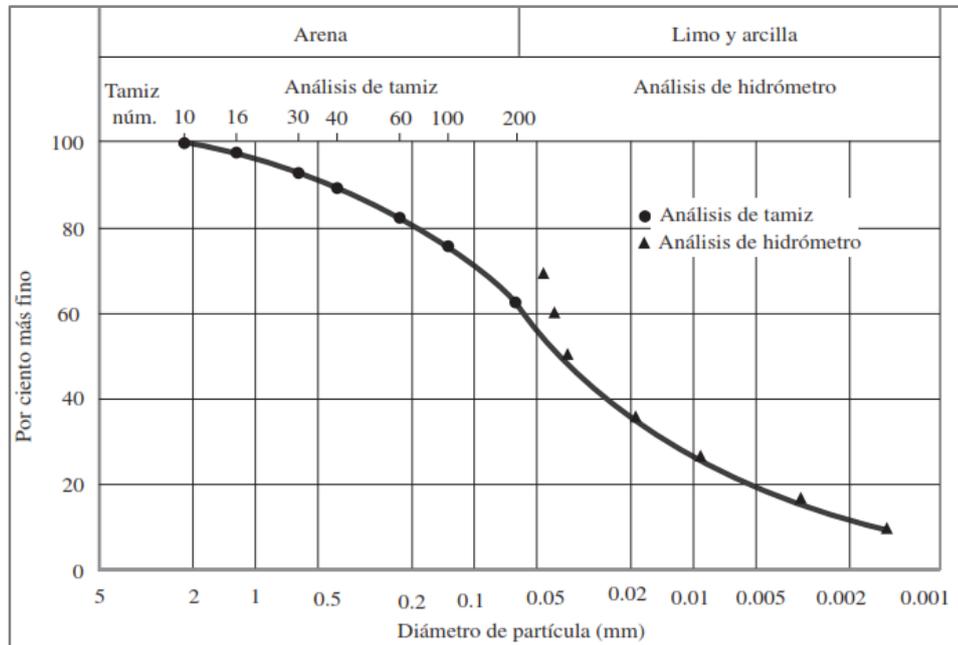


Figura N° 1: Ejemplo de curva granulométrica (Das 1999).

2.1.2 Graduación

Cuando un suelo está constituido por partículas de gran variedad de diámetros, se dice que el suelo es de buena “graduación”. La curva granulométrica es continua y suave. Si la curva presenta tramos horizontales o verticales significa, respectivamente, que falta o predomina cierto rango de tamaños y se considera un suelo de “mala gradación” (ver figura N° 1). Una línea vertical significa que ese suelo está formado por partículas de tamaño semejante entre sí y se conoce como suelo uniforme. Un suelo uniforme es más ligero y menos resistente que otro bien graduado (Desena, 2003).

2.1.3 Forma

Independientemente de su tamaño, las partículas del suelo pueden tener formas redondas, subredondeadas, angulares o laminares, (Gonzáles y Robles, 2004), como se muestra en la figura N° 2.

La forma influye en las propiedades mecánicas; por ejemplo: un suelo compuesto en su mayor parte de granos gruesos de forma angular, exhibe una mejor

trabazón entre sus partículas que otro de igual granulometría pero de granos redondos. Esto se traduce en una mayor resistencia al desplazamiento relativo de las partículas, en el primer caso. Por lo que respecta a los suelos de las partículas finas, la forma es aún más importante, (González y Robles, 2004).

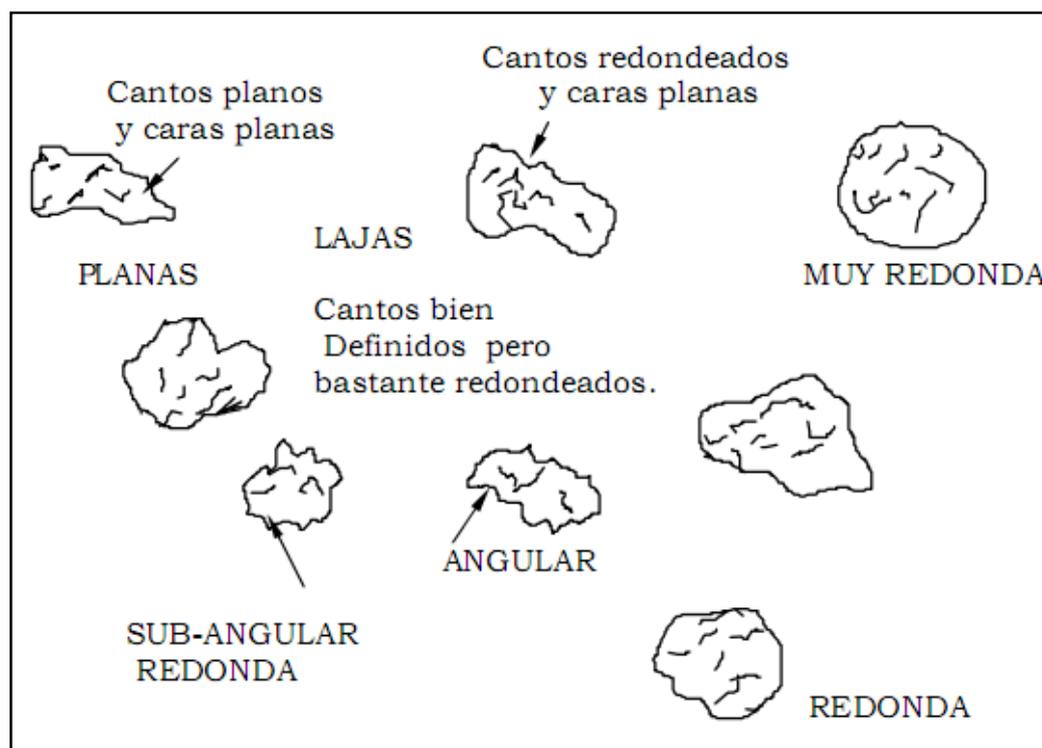


Figura N° 2: Formas de partículas de suelo (Gonzales y Robles 2004).

2.1.4 Plasticidad

Es un hecho bien conocido que, al mejorar una tierra constituida por limo y arcilla, se vuelve blanda, formando lodo que al secarse se endurece en grado variable o se vuelve polvo. Estos sencillos fenómenos son, en realidad de naturaleza, físico químico muy complejo, y que constituye la base de las pruebas desarrolladas por Atterberg para estudiar las variaciones de la consistencia de los suelos finos con los cambios de humedad. Atterberg introdujo los conceptos que se conocen como “límites de consistencia” o de “Atterberg” (Gonzales y Robles 2004).

2.1.5 Estructura

La estructura del suelo es el resultado de su composición granulométrica, la actividad biológica y una serie de condiciones físico-químicas que permiten la aglomeración de las partículas, (Jordan,2006).

El predominio de unos u otros procesos origina los distintos tipos de estructura. En la formación de la estructura es muy importante la acción de los coloides (arcilla y materia orgánica) y las sustancias cementantes del suelo (carbonatos, sesquióxidos, etc.), que forman recubrimientos alrededor de las partículas más gruesas, englobándolas en grupos. Si no hay una proporción de coloides o sustancias cementantes suficiente, las partículas del suelo permanecen dispersas, (Jordan,2006).

Además de la granulometría, la graduación y la plasticidad, la manera como se asocian las partículas entre sí, es decir, la estructura del suelo, es también un factor importante en las propiedades mecánicas, se distinguen tres tipos de estructura: “granular, prismática y laminar”, tal y como se muestra en la figura N° 3.

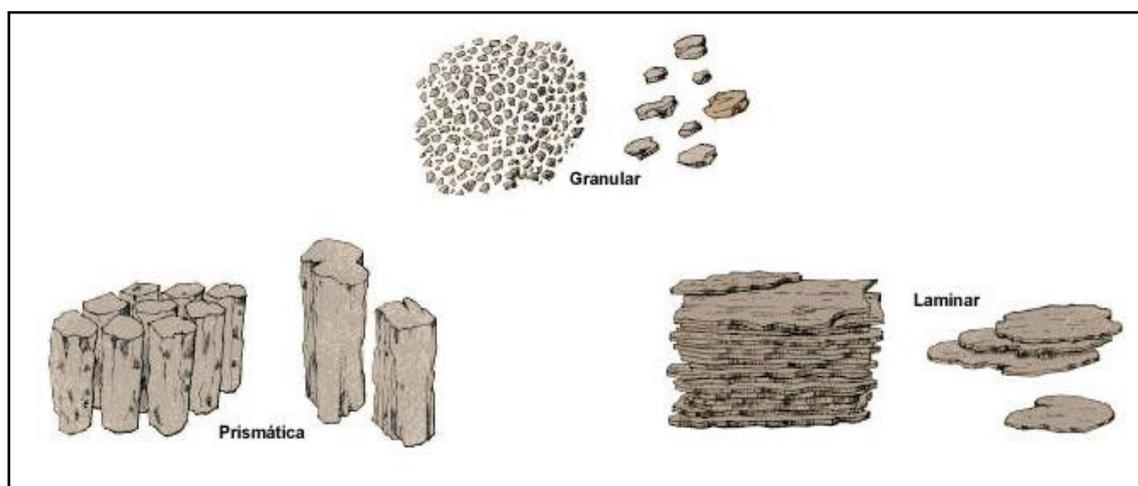


Figura N° 3: Tipos de estructuras en suelos (Jordan 2006).

- Estructura granular.- Son partículas individuales de arena, limo y arcilla agrupadas en granos pequeños casi esféricos.
- Estructuras prismáticas.- Son partículas de suelo que han formado columnas o pilares verticales separados por fisuras verticales diminutas, pero definidas.
- Estructuras laminares.- Se compone de partículas de suelo agregadas en láminas o capas finas que se acumulan horizontalmente una sobre otra.

2.1.6 Límite Líquido (LL)

Si a un suelo fino se le agrega agua en cantidad suficiente, puede convertirse prácticamente en un líquido, es decir, fluye fácilmente bajo el efecto de un pequeño esfuerzo cortante. Si se permite que el agua se evapore parcialmente, llega un momento en que el suelo empieza a ofrecer una resistencia al esfuerzo cortante y se comporta como un material plástico. El contenido de agua, expresado en por ciento del peso del suelo seco, en este momento, es el “límite líquido” (Sociedad internacional de mecánica de rocas, 1984).

2.1.7 Límite Plástico (LP)

Si después de alcanzado el límite líquido se continúa evaporando el agua, amasando el suelo con la mano, se llega a un contenido de agua en el que el suelo se vuelve quebradizo y deja de comportarse como un material plástico. El contenido de agua correspondiente se llama “límite plástico”. La diferencia entre el límite líquido y el plástico se llama “índice de plasticidad”. Definido con el símbolo IP. Correlacionando el límite líquido con el correspondiente índice de plasticidad de un gran número de suelos finos, Arthur Casagrande estableció la carta de plasticidad que muestra la figura N° 4. La línea “A” establece la frontera entre los suelos arcillosos y limosos.

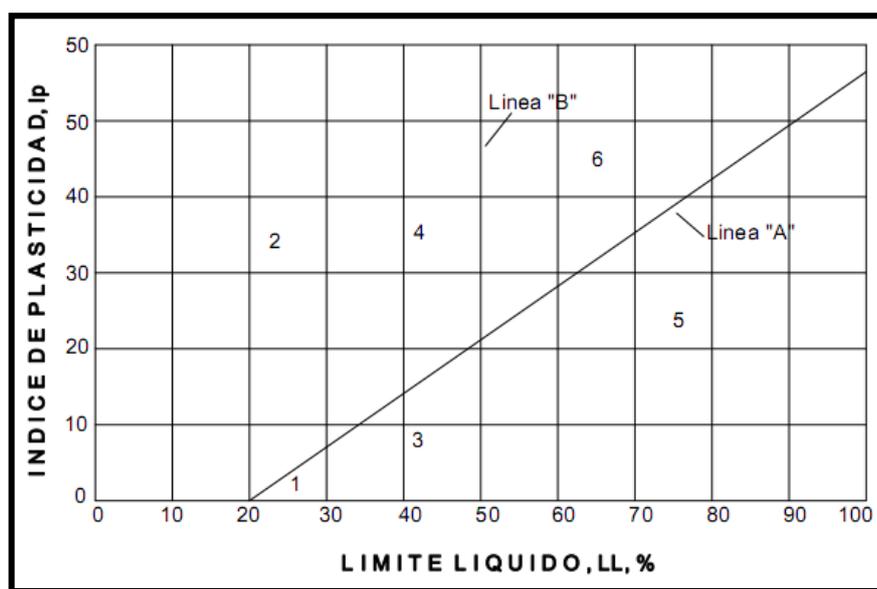


Figura N° 4: Carta de plasticidad de A. Casagrande (Casagrande 1948).

- (1). Limos inorgánicos de baja compresibilidad.
- (2). Arcillas inorgánicas de baja plasticidad.

- (3). Limos orgánicos y limos inorgánicos de compresibilidad media.
- (4). Arcillas inorgánicas de plasticidad media.
- (5). Limos inorgánicos de baja compresibilidad y arcillas orgánicas.
- (6). Arcillas inorgánicas de alta plasticidad.

2.1.8 Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS)

Este sistema, originalmente introducido por el Dr. Arthur Casagrande como “Sistema de clasificación de suelos para Aeropuertos”, durante los años de la segunda Guerra Mundial, fue ligeramente modificado, posteriormente por el “U.S. Army Corps of Engineers” y el “U.S. Bureau of Reclamation”, para adoptarlo a usos en caminos, presas de tierra y cimentaciones; actualmente se le conoce como sistema unificado.

Este sistema ofrece la doble ventaja de ser fácilmente adaptable al campo y al laboratorio, requiriendo poca experiencia y unas cuantas pruebas sencillas para determinar al grupo al cual pertenece un suelo dado. Por tomar en cuenta la granulometría, la graduación y las características de la plasticidad, describe los suelos de tal manera que es fácil, con un poco de criterio, asociar a cada grupo de suelo el orden de magnitud de las características mecánicas, mas importantes y, por consiguiente, su adaptabilidad a diversos usos en la construcción. (Desena, 2003).

Los suelos se designan por símbolos de grupo. El símbolo de cada grupo consta de un prefijo y un sufijo. Los prefijos son las iniciales de los nombres en ingles de los seis principales tipos de suelos (grava, arena, limo, arcilla, suelos orgánicos de grano fino y turbas), mientras que los sufijos indican subdivisiones en dichos grupos (Desena, 2003).

2.1.8.1 Suelos Gruesos. Se dividen en gravas (G) y arena (S), y se separan con el tamiz No. 4, de manera que un suelo pertenece al grupo de grava si más del 50% retiene el tamiz No. 4 y pertenecerá al grupo arena en caso contrario.

2.1.8.2 Suelos Finos. El sistema unificado considera los suelos finos divididos entre grupos: limos inorgánicos (M), arcillas inorgánicas (C) y limos y arcillas orgánicas (O). Cada uno de estos suelos se subdivide a su vez según el límite líquido, en dos grupos cuya frontera es $Ll = 50\%$. Si el límite líquido del suelo es menor de 50 se añade

al símbolo general la letra L (low compresibility). Si es mayor de 50 se añade la letra H (high compresibility).

A continuación se presenta en la tabla 2, la clasificación de suelos según las combinaciones existentes encontradas en el campo de trabajo, resaltando que la fuente presentada es referencial, debido a que en la conformación de esta tabla intervienen diferentes factores dominados por experiencias propias adquiridas del autor.

Tabla 2: Clasificación de suelos S.U.C.S.

CLASIFICACIÓN DE SUELOS	
SÍMBOLO DE GRUPO	NOMBRE DEL GRUPO
GW	Graba bien graduada
GP	Grava mal graduada
GM	Grava limosa
GC	Grava arcillosa
GW-GM	Grava bien graduada con limo
GW-GC	Grava bien graduada con arcilla
GP-GM	Grava mal graduada con limo
GP-GC	Grava mal graduada con arcilla
SW	Arena bien graduada
SP	Arena mal graduada
SM	Arena limosa
SC	Arena arcillosa
SW-SM	Arena bien graduada con limo
SW-SC	Arena bien graduada con arcilla
SP-SM	Arena mal graduada con limo
SP-SC	Arena mal graduada con arcilla
CL	Arcilla de baja plasticidad
ML	Limo de baja plasticidad
OL	Limo / Arcilla orgánica
CH	Arcilla de alta plasticidad
MH	Limo de alta plasticidad
OH	Limo / Arcilla orgánica
PT	Turba

Fuente: Gonzáles (2002).

2.2 ENSAYOS DE PERMEABILIDAD

Los ensayos para determinar la permeabilidad en suelos con fines geotécnicos pueden realizarse en el interior de sondeos o pozos y en excavaciones. Los más extendidos son realizados en sondeos, utilizando las perforaciones de las campañas de investigación geotécnica. Sin embargo, cuando no se dispone de sondeos es posible realizarlos en pequeñas excavaciones de poca de profundidad con una geometría

predefinida. (González, 2002). A continuación se describen los ensayos utilizados en la presente investigación.

2.2.1 Tipo Lefranc

Este ensayo se utiliza para medir el coeficiente de permeabilidad en suelos permeables o semipermeables, de tipo granular, situados por debajo del nivel freático, y en roca muy fracturadas. El ensayo se efectúa en el interior de los sondeos y puede realizarse durante la ejecución de la perforación o una vez finalizada esta, (Gonzales, 2002).

El procedimiento consiste en rellenar de agua el sondeo y medir el caudal necesario para mantener el nivel constante (ensayo a régimen permanente) o bien medir la velocidad de descenso del nivel de agua (ensayo a régimen variable) (Gonzales, 2002). La medición del caudal de admisión debe medirse durante 10 minutos en intervalos de 1 minuto.

2.2.1.1 Lefranc a Nivel Variable

Se extrae o se introduce súbitamente un volumen de agua en el sondeo, lo que provoca un ascenso o descenso instantáneo del nivel del agua adentro de la perforación. Se miden los descensos-tiempos a medida que se recupera el nivel inicial, (Sánchez San Román, 2011). Se determina mediante la ecuación:

$$K = [d^2 * \ln (2L / d) / 8 L * t] * \ln (h_1/h_2)$$

Donde:

K = Coeficiente de permeabilidad (cm/s);

h₁ y h₂ = Altura del agua al inicio y fin del ensayo;

t = Tiempo transcurrido entre la observación de los niveles h₁ y h₂;

L = Longitud del ensayo;

d = Diámetro del pozo.

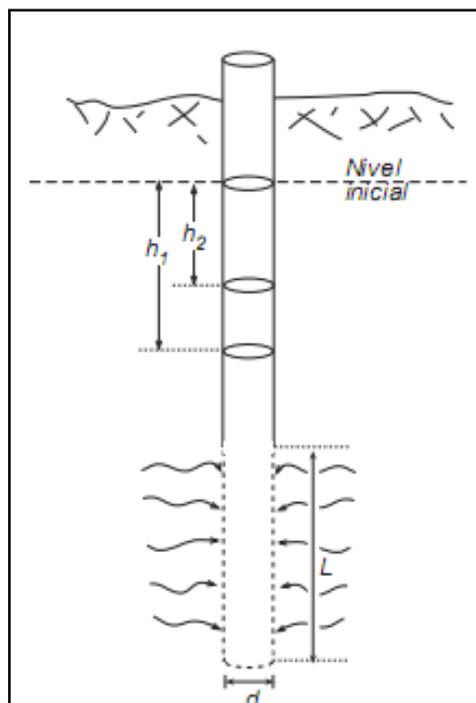


Figura N° 5: Esquema del ensayo Lefranc nivel variable (Sánchez San Román 2011).

2.2.1.2 Lefranc a Nivel Constante

Se introduce un caudal constante, Q para mantener el nivel del agua dentro del sondeo estabilizado a una altura h_m (Sánchez San Román, 2011). Ver figura N° 06

La conductividad hidráulica se obtiene por esta expresión:

$$K = Q / (C * \Delta h)$$

Siendo:

K = Coeficiente de permeabilidad (cm/s);

Q = Caudal (cm³/s);

Δh = Altura del agua sobre el nivel inicial (cm);

C = Coeficiente de forma, definido por la expresión:

$$C = 2 \pi * L / \ln(2L/d)$$

Donde:

L = Longitud del tramo ensayado (m),

d = Diámetro de la perforación (m).

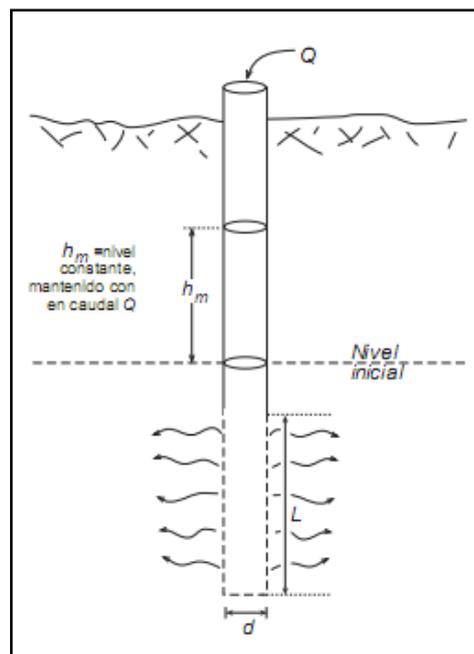


Figura N° 6: Esquema del ensayo Lefranc a nivel constante (Sánchez San Román 2011).

2.3 ENSAYOS DE LABORATORIO

Los ensayos geotécnicos de laboratorio son pruebas realizadas para la determinación de las características geotécnicas de un terreno, como parte de las técnicas de reconocimiento geotécnico. Estos ensayos se ejecutan sobre las muestras previamente obtenidas en el terreno y, dependiendo del tipo de ensayo, se exigen distintas calidades de muestra, para este caso el autor realizará.

2.3.1 Ensayo de Corte Directo

La finalidad de los ensayos de corte, es determinar la resistencia de una muestra de suelo, sometida a fatigas y/o deformaciones que simulen las que existen o existirán en terreno producto de la aplicación de una carga (Das, 1999).

Para conocer una de estas resistencias en laboratorio se usa el aparato de corte directo, siendo el más típico una caja de sección cuadrada o circular dividida horizontalmente en dos mitades. Dentro de ella se coloca la muestra de suelo y se aplica una carga vertical de confinamiento y luego una carga horizontal creciente que origina el desplazamiento de la mitad móvil de la caja originando el corte de la muestra. Los ensayos de corte directo en laboratorio se pueden clasificar en tres tipos según exista drenaje y/o consolidación de la muestra, por lo tanto los valores de “ c ” y “ ϕ ” dependen esencialmente de la velocidad del ensayo y de la permeabilidad del suelo.

2.3.2 Análisis Granulométrico

La finalidad de este análisis es obtener la distribución por tamaño de las partículas presentes en una muestra de suelo. Así es posible también su clasificación mediante el sistema SUCS. El ensayo es importante, ya que gran parte de los criterios de aceptación de suelos para ser utilizados en bases o sub-bases de carreteras, presas de tierra o diques, drenajes, etc., depende de este análisis.

Para obtener la distribución de tamaños, se emplean tamices normalizados y numerados, dispuestos en orden decreciente. Para suelos con tamaño de partículas mayor a 0,074 mm. se utiliza el método de análisis mecánico mediante tamices de abertura y numeración.

2.3.3 Determinación de los Límites de Atterberg

Los suelos que poseen algo de cohesión, según su naturaleza y cantidad de agua, pueden presentar propiedades que lo incluyan en el estado sólido, semi-sólido, plástico o semi-líquido. El contenido de agua o humedad límite al que se produce el cambio de estado varía de un suelo a otro. El método usado para medir estos límites se conoce como método de Atterberg. Los ensayos se realizan en el laboratorio y miden la cohesión del terreno y su contenido de humedad, para ello se forman pequeños cilindros de espesor con el suelo. Siguiendo estos procedimientos se definen dos límites: (Desena, 2003).

- **Límite líquido (LL)** Humedad de un suelo remoldeado, límite entre los estados líquido y plástico, expresado en porcentaje.
- **Límite plástico (LP)** Humedad de un suelo remoldeado, límite entre los estados plástico y semi-sólido, expresado en porcentaje.

Además, se define el **índice de plasticidad (IP)** como la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico ($IP = LL - LP$).

2.3.4 Contenido de Humedad

Este ensayo tiene por finalidad, determinar el contenido de humedad de una muestra de suelo. El contenido de humedad de una masa de suelo, está formado por la suma de sus aguas libres, capilares e hidrosκόpicas. La importancia del contenido de

agua que presenta un suelo representa junto con la cantidad de aire, una de las características más importantes para explicar el comportamiento de este (especialmente en aquellos de textura más fina), como por ejemplo cambios de volumen, cohesión, estabilidad mecánica. El método tradicional de determinación de la humedad del suelo en laboratorio, es por medio del secado a horno, donde la humedad de un suelo es la relación expresada en porcentaje entre el peso del agua existente en una determinada masa de suelo y el peso de las partículas sólidas (Desena, 2003).

2.4 SONDEO ELECTRICO VERTICAL

Los sondeos eléctricos verticales (SEV) constituyen uno de los métodos de campo para determinar la variación en profundidad de las propiedades eléctricas del subsuelo. “Los SEV consisten en una serie de determinaciones de resistividades aparentes, efectuadas con el mismo tipo de dispositivo y de separación creciente entre los electrodos de emisión y de recepción”, (Agua y Agro, 2015).

La finalidad del SEV es “averiguar la distribución vertical de resistividades bajo el punto sondeado. Son útiles en zonas con estratificación aproximadamente horizontal, en las que las propiedades eléctricas varían principalmente con la profundidad, más bien que lateralmente”, (Agua y Agro, 2015).

El método consiste en inducir al subsuelo una determinada intensidad de corriente en mA a través de dos electrodos A y B, mediante dos electrodos no polarizables se mide el potencial inducido en mV. La profundidad de investigación está en función del espaciamiento de los electrodos A y B de corriente.

Los datos de resistividad aparente obtenidos en cada sondeo eléctrico vertical se representan por medio de una curva en función de las distancias entre electrodos $AB/2$.

2.4.1 Dispositivo Electrónico Schlumberger

El arreglo Schlumberger es diseñado para sondeos, eso es, determinar la resistividad en profundidad. “El sondeo consiste en separar progresivamente los electrodos de corriente A y B, dejando los electrodos de potencial M y N fijos en torno a un punto central fijo. Este dispositivo permite una buena penetración con la suficiente distancia de AB, ofrece una buena resolución vertical y el efecto de las

heterogeneidades irrelevantes es menor pues sólo se mueven el par de electrodos A y B”, (Agua y Agro, 2015).

Los resultados de este sondeo muestran en ordenadas la resistividad ρa y en abscisas la distancia $AB/2$.

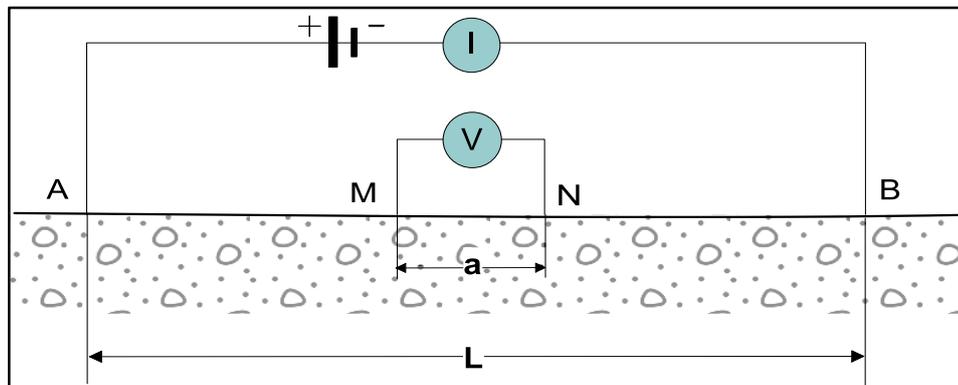


Figura N° 7, Dispositivo Electrónico Schlumberger lineal simétrico (Agua y Agro2015).

$$K = \frac{\pi}{4} * \frac{(L^2 - a^2)}{a}$$

$$\rho a = k \frac{\Delta V}{I}$$

Dónde: **k** es el factor geométrico, **V** potencial e **I** intensidad de corriente

2.4.2 Valores Típicos de Resistividad

En las Tablas 3, se indica las resistividades que caracterizan a los minerales, a las rocas ya los sedimentos, y dentro de estos últimos también se aprecian diferencias notorias entre los de grano fino (margas, limos, arcillas), los de grano mediano (arenas) y grueso (gravas).

Tabla 3; Valores típicos de resistividad de geo materiales

MATERIAL	Resistividad (Ωm)
Basamento. Roca sana con diaclasas espaciadas	>10000
Basamento. Roca fracturada	1500-5000
Basamento. Roca fracturada saturada con agua corriente	100-2000
Basamento. Roca fracturada saturada con agua salada	1-100
Gruss no saturado	500-1000
Gruss saturado	40-60
Saprolitos no saturados	200-500
Saprolitos saturados	40-100
Gravas no saturadas	500-2000
Gravas saturadas	300-500
Arena no saturadas	400-700
Arenas saturadas	100-200
Limos no saturados	100-200
Limos saturados	200-100
Limos saturados con agua salada	5-15
Arcillas no saturadas	20-40
Arcillas saturadas	5-20
Arcillas saturadas con agua salada	1-10
Andosoles secos	1000-2000
Andosoles no saturados	300-1000
Andosoles saturados	100-300

Fuente: Agua y Agro (2015).

2.5 FENOMENO DE FILTRACION EN LA CIMENTACIÓN DE PRESAS

2.5.1 Flujos de Filtración en Suelos y Rocas

Los suelos tienen vacíos interconectados a través de los cuales el agua puede fluir de puntos de alta energía a puntos de baja energía. El estudio del flujo de agua a través de un suelo o roca como medio poroso es importante en la mecánica de suelos y rocas, siendo necesario para estimar la cantidad de infiltración subterránea bajo varias condiciones hidráulicas, para investigar problemas que implican el bombeo de agua para construcciones subterráneas y para el análisis de estabilidad de las presas de tierra y de estructuras de retención sometidas a fuerzas de infiltración, (Arellano, 2015).

El agua presente en el suelo influye en su comportamiento en cuanto modifica la forma de las partículas y afecta a las fuerzas transmitidas a través de ellas. El flujo de agua en el macizo rocoso puede producirse a través de la roca intacta o matriz, a través

de las discontinuidades. El primer caso puede llegar a tener escasa importancia cuando se trata de rocas ígneas, calizas intactas, algunos tipos de yesos, etc., al ser su permeabilidad muy pequeña. Para algunas rocas sedimentarias como las areniscas, la permeabilidad primaria intergranular puede llegar a ser importante (Arellano, 2015).

2.5.2 Velocidad de Descarga y Filtración Real

2.5.2.1 Velocidad de Descarga. Es la cantidad de agua que fluye por unidad de tiempo a través de una sección transversal total unitaria de suelo perpendicular a la dirección de flujo. Esta se deduce directamente de la ecuación de Darcy, (Juárez, 1996)

$$V = K i$$

2.5.2.2 Velocidad de Filtración (v_1). En esta velocidad se toma en cuenta la existencia de una fase sólida impermeable y es la velocidad media de avance del agua en la dirección del flujo, (Juárez, 1995)

$$v_1 = (1 + e) / e * V$$

Donde:

e = relación de vacíos.

V = velocidad de descarga - ecuación de Darcy.

2.5.2.3 Velocidad de Real (v_2). El agua no recorre la longitud L al atravesar el suelo, sino una línea sinuosa o irregular de longitud L_m . Entonces si V_2 es la velocidad media real. (Juárez, 1996)

$$v_2 = v_1 * L_m/L$$

2.5.3 Número de Reynolds

Los diferentes regímenes de flujo y la asignación de valores numéricos de cada uno fueron reportados por primera vez por Osborne Reynolds en 1883. Reynolds observó que el tipo de flujo adquirido por un líquido que fluye dentro de una tubería depende de la velocidad del líquido, el diámetro de la tubería y de algunas propiedades físicas del fluido. Así, el número de Reynolds es un número adimensional que relaciona

las propiedades físicas del fluido, su velocidad y la geometría del ducto por el que fluye y está dado por:

$$Re = D * v * \rho / \mu$$

Dónde:

Re: Número de Reynolds.

D: Diámetro del ducto.

v: Velocidad promedio del líquido.

ρ : Densidad del líquido.

μ : Viscosidad del líquido.

El número de Reynolds aparece en muchos casos relacionado con el hecho de que el flujo pueda considerarse laminar (número de Reynolds pequeño) o turbulento (número de Reynolds grande). Si el número de Reynolds es menor de 2100 el flujo será laminar y si es mayor de 3000 el flujo será turbulento. El mecanismo y muchas de las razones por las cuales un flujo es laminar o turbulento es todavía hoy objeto de especulación. (Galofre, 1980).

2.5.4 Ley de Darcy

El flujo del agua puede ser de dos tipos: laminar y turbulento. El régimen de flujo se considera laminar cuando las trayectorias de las gotas de agua (las líneas de corriente) no interfieren unas con contra otras. En caso contrario, se trata de un flujo turbulento. Para el estudio de filtraciones en el terreno, salvo en algunos casos especiales de suelos de gran permeabilidad, flujo a través de grandes fisuras, flujo en karst, etc., se suele considerar que el régimen es laminar. (Gonzales, 2002).

En estas condiciones es aplicable la llamada ley de Darcy y se puede suponer que la velocidad de flujo es proporcional al gradiente hidráulico:

$$v = k * (\Delta h / L) = ki$$

Siendo k la permeabilidad del medio (expresada por el coeficiente de permeabilidad), y v la velocidad media del agua a través de una sección macroscópica de suelo, es decir, la velocidad aparente a lo largo de las líneas de flujo teóricas. L es la longitud del tramo a ensayado.

2.5.5 Ecuaciones Hidrodinámicas que Gobiernan el Flujo de Agua a Través de Suelos

2.5.5.1 Ecuación de Laplace

La ecuación de Laplace es la primera de las ecuaciones diferenciales en derivadas parciales que gobiernan el flujo en medios porosos (permeables en general, cuando el medio pueda ser asumido como poroso). Se refiere al flujo en condiciones de régimen permanente y en ausencia de fuentes y sumidores (Torres, 2010).

Esta ecuación, como todas las ecuaciones del flujo en medios porosos, se obtiene aplicando conjuntamente la ecuación de la continuidad y la ley de Darcy. De hecho, es lógico que así sea. El flujo se estudia aceptando, de una parte, que la masa entrante debe ser igual a la saliente, y que ambas, dentro del medio poroso, están condicionadas por los planteamientos de Darcy (Torres, 2010). Así se tiene:

$$\partial u_x / \partial x + \partial u_y / \partial y + \partial u_z / \partial z = 0 \quad (\text{continuidad en régimen estacionario}).$$

$$v_x = -k_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \quad ; \quad v_y = -k_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \quad ; \quad v_z = -k_{zz} \frac{\partial h}{\partial z}$$

Sustituyendo:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(-k_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(-k_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(-k_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) = 0$$

Si se considera el medio homogéneo (la permeabilidad es la misma en cualquier punto del espacio) e isótropo (la permeabilidad es la misma en cualquier dirección del espacio), se tiene que:

$$K_{xx} = k_{yy} = k_{zz} = k$$

y:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0$$

Que es la ecuación de Laplace (régimen permanente, medio homogéneo e isótropo y ausencia de fuentes y sumideros). Hay dos tipos característicos de condiciones de entorno:

- Condiciones Dirichlet: nivel piezométrico conocido en frontera.
- Condiciones Neuman: flujo conocido en frontera.

La resolución de la ecuación solo es posible por métodos analíticos en sistema físicos sencillos, como es el caso de flujo hacia pozos y algunos problemas de flujo entre zanjas. Para casos reales más complejos debe acudir a métodos aproximados de resolución numérica, o también, en algunos otros casos, a métodos gráficos de resolución, como redes de flujo (Torres, 2010).

2.5.5.2 Ecuación de Continuidad

La ecuación de continuidad parte de las bases ideales siguientes:

- El fluido es incompresible.
- La temperatura del fluido no cambia.
- El flujo es continuo, es decir su velocidad y presión no dependen del tiempo.
- El flujo es laminar. No turbulento
- No existe rotación dentro de la masa del fluido, es un flujo irrotacional.
- No existen pérdidas por rozamiento en el fluido, es decir no hay viscosidad.

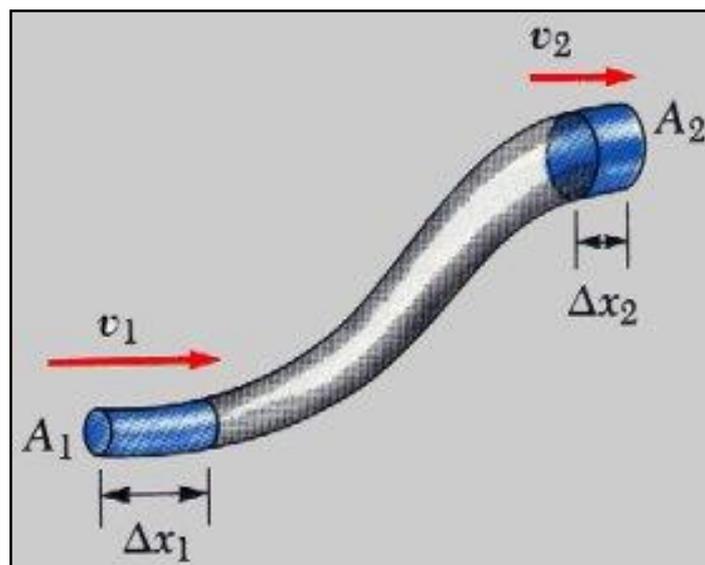


Figura N° 8: Un fluido en movimiento con las líneas de corriente a lo largo de un tubo de sección variable (Krynine y Judd 1972).

Como ejemplo veremos el tubo de la figura N° 8, de sección variable con líneas de corriente del interior de un fluido en movimiento. En un intervalo pequeño de tiempo Δt , el fluido que entra por el fondo del tubo recorre una distancia $\Delta x_1 = v_1 \Delta t$ siendo v_1 la velocidad del fluido en esa zona.

Si A_1 es el área de la sección transversal de esta región, entonces la masa de fluido contenida en la parte azul del fondo es $\Delta M_1 = \rho_1 A_1 \Delta x_1 = \rho_1 A_1 v_1 \Delta t$, donde ρ es la densidad del fluido. De la misma forma el flujo que sale por el extremo superior del tubo en el mismo tiempo Δt tiene la masa $\Delta M_2 = \rho_2 A_2 v_2 \Delta t$. Como la masa debe conservarse y debido también a que el flujo es laminar, la masa que fluye a través del fondo del tubo en la sección A_1 , en el tiempo Δt , será igual a la que fluye en el mismo tiempo a través de A_2 . Por lo tanto $\Delta M_1 = \Delta M_2$, o:

$$\rho_1 A_1 v_1 \Delta t = \rho_2 A_2 v_2 \Delta t \quad (\text{ecuación 1})$$

Si dividimos por Δt tenemos que:

$$\rho_1 A_1 v_1 = \rho_2 A_2 v_2 \quad (\text{ecuación 2})$$

La ecuación 2 se conoce como ecuación de continuidad. Como hemos considerado que el fluido es incompresible entonces $\rho_1 = \rho_2$ y la ecuación de continuidad se reduce a:

$$A_1 v_1 = A_2 v_2$$

Es decir, el área de la sección transversal de un tubo, multiplicada por la velocidad del fluido es constante a todo lo largo del tubo. El producto Av , que tiene las dimensiones de volumen por unidad de tiempo se conoce como caudal. (Krynine y Judd, 1972).

2.5.6 Líneas de Corriente y Líneas Equipotenciales

El empleo de la representación gráfica para el flujo que traspasa el suelo se lleva a cabo a través de lo que se denomina como red de flujo. De la red de flujo se puede obtener información relativa a los problemas planteados, (Torres, 2010).

El camino seguido por una partícula de agua en su recorrido de escurrimiento o filtración a lo largo de una masa de suelo saturado es llamado línea de corriente, un ejemplo de estas, son las líneas curvas, suaves y sólidas, que pasan por debajo de un muro de contención construido con una pantalla de estacas como el que se muestra en la figura N° 9.

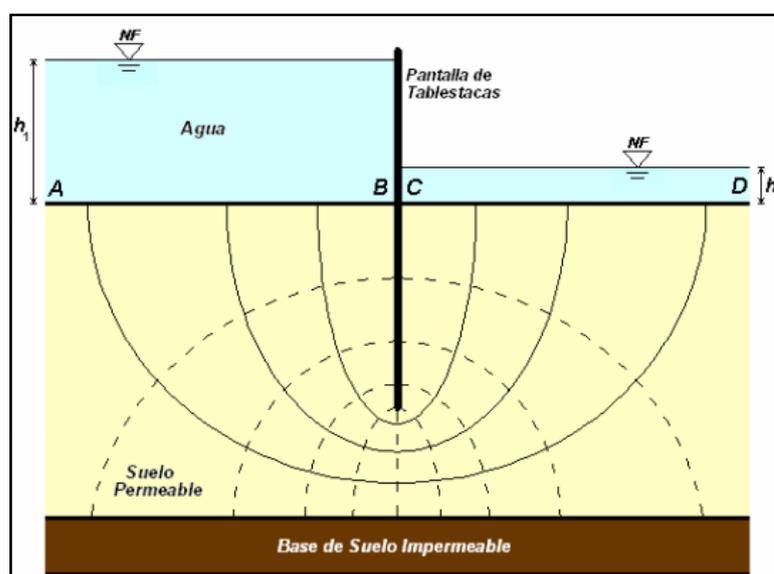


Figura N° 9: Diagrama de líneas de corriente y líneas equipotenciales (Torres 2010).

Cada línea de flujo comienza en un punto localizado sobre la línea AB, con una carga de presión ($h = h_1 - h_2$) que se disipa por la fricción viscosa, y termina en la línea CD, donde la carga de presión es igual a h_2 . A todo lo largo de la línea existe un punto donde el agua ha disipado una porción específica conocida como su potencial. Una línea que conecte todos esos puntos de igual carga es llamada línea equipotencial (líneas punteadas de la figura N° 9 o dicho de otra manera: en todos los puntos de una misma línea equipotencial, el agua asciende en un piezómetro hasta un mismo nivel piezométrico. Dichas líneas se asemejan a curvas de nivel de igual energía y las líneas de flujo las cortan en ángulo recto, ya que el agua se mueve desde los niveles de mayor a los de menor energía, siguiendo los caminos de gradiente de máxima energía; de la misma manera que el agua corre hacia abajo en la ladera de una colina, de los niveles

superiores a los inferiores siguiendo la misma línea de pendiente máxima (Torres, 2010).

El esquema de las líneas de flujo y equipotenciales se denomina red de flujo y es un instrumento poderoso para la solución de los problemas de filtración de agua donde es evidente que existe un número ilimitado de líneas de flujo y de equipotenciales, pero se toman sólo aquellas que ofrecen una representación más general y una forma más conveniente de explicar el fenómeno (Torres, 2010).

2.5.7 Red de Flujos

Es la combinación de las líneas de corriente y las líneas equipotenciales; se construyen para calcular el flujo de aguas subterráneas y tienen reglas de trazo específicas. Las dos familias de curvas son ortogonales solo para suelos isotrópicos. Los suelos anisotrópicos necesitan transformarse para ser tratados como isotrópicos.

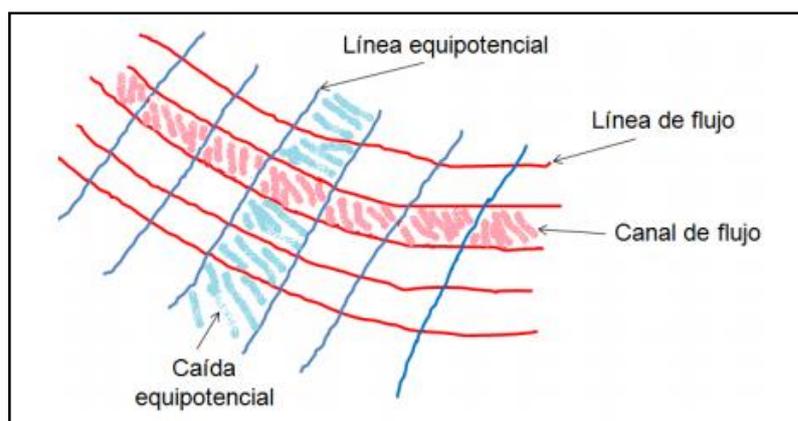


Figura N° 10: Red de flujos (Torres 2010).

El caudal que fluye entre dos líneas consecutivas es el mismo por unidad de ancho, las líneas equipotenciales no pueden cortarse entre sí, dentro del medio fluido, tampoco las líneas de corriente pueden cortarse entre sí dentro del medio fluido. (Das, 1999).

Se trata entonces de definir en cada caso las condiciones de frontera específicas del problema a trazar, cumpliendo con estas, las dos familias de curvas ortogonales, obteniendo así una verdadera imagen gráfica del problema, que si ha sido realizada con cuidado podrá ser lo suficientemente buena para los fines ingenieriles. (Bowler, 1995). Para la conformación de las redes de flujo se procede de la siguiente manera:

- Se dibuja la geometría del problema a escala.

- Se dibujan las líneas de flujo y equipotenciales conocidas del contorno
- Se trazan varias líneas de corriente perpendiculares a las líneas equipotenciales conocidas del contorno.
- Se dibujan las líneas equipotenciales necesarias para conseguir cuadrados curvilíneos, logrando que las dos familias de curvas sean perpendiculares entre sí (Figura N° 10).
- La pérdida de carga total se distribuye de manera uniforme entre equipotenciales.
- Un canal de flujo es el comprendido entre dos líneas de corriente.
- Todos los canales de flujo transportan el mismo caudal.

Teniendo en cuenta que:

Nf: Número de canales de flujo.

Nd: Número de caídas sucesivas de potencial.

Δh se distribuye en las caídas sucesivas de potencial.

dh: Pérdida de carga entre equipotenciales.

dh: $\Delta h / Nd$

El caudal que fluye en la red (cuadrado formado por las líneas equipotenciales y de corriente) y considerando que la red es cuadrada, será:

$$q = K \Delta h / Nd$$

Considerando que todos los canales transportan el mismo flujo, el caudal total corresponde a:

$$Q = K \Delta h * Nf / Nd$$

Para determinar la presión intersticial en cualquier punto, se debe conocer la equipotencial en que se ubica, para determinar su altura piezométrica:

$$h_p = h_A - Nd * \Delta h / Nd = Z_p - u_p / \gamma_w$$

Despejando la presión intersticial queda:

$$u_p = \gamma_w (h_A - N_d * \Delta h / N_d - Z_p)$$

2.6 FACTORES QUE FAVORECEN LA FILTRACIÓN

Los factores principales que determinan el movimiento del agua por infiltración son:

- Textura. Los porcentajes de arena, limo y arcilla presentes en el suelo. En un suelo arenoso se favorece la infiltración.
- Profundidad del suelo a una capa endurecida, lecho rocoso u otras capas impermeables influyen en la infiltración. Los suelos delgados almacenan menos agua que los suelos profundos.
- Temperatura del suelo. Los suelos calientes permiten mayor infiltración del agua que los suelos fríos.
- Estructura. Suelos con grandes agregados estables en agua tienen proporciones de filtraciones más altas.
- Cantidad de materia orgánica. Altas proporciones de materia orgánica sin descomponer propician que una mayor cantidad de agua entre al suelo.
- Cantidad de agua en el suelo. En general un suelo mojado tendrá una menor infiltración que un suelo seco.
- Cantidad de organismos vivos. A mayor actividad microbiológica en los suelos habrá una mayor infiltración. Un caso típico es la elaboración de pequeños túneles por las lombrices, los cuales favorecen la infiltración y la penetración de las raíces así como la aireación. (Cancela, 1987).

2.7 EFECTOS DE LAS FILTRACIONES

En muchos problemas geotécnicos, el movimiento del agua que llena los poros y diaclasas del terreno, tiene una influencia esencial. Pero, esta influencia tiene tres aspectos distintos. El primero se refiere al caudal de agua que circula, por ejemplo si se trata de un embalse, importa saber la cantidad de agua que se perderá a través de la presa y del terreno, (Franco, 1988). Si se trata de obtener un recinto seco en un cauce de agua (por ejemplo un río).

El segundo aspecto es menos evidente, pero de igual importancia y se refiere a la variación del estado tensional del suelo. El agua, al circular, toma un cierto estado de presiones intersticiales que determinan a su vez el estado de tensiones del terreno y, por lo tanto, afectan a sus deformaciones y a su estabilidad. El rebajamiento del nivel de la capa freática, bien sea por una extracción excesiva de agua por medio de pozos, para su aprovechamiento, o bien como artificio constructivo produce asentamientos que pueden llegar a ser desde varios centímetros a algunos metros. Por otra parte en lo que se refiere a la estabilidad, la influencia de la filtración sobre los taludes se manifiesta bien claramente después de cualquier temporal de lluvia, cuando aparecen corrimientos, muchas veces causantes de cortes en las carreteras y ferrocarriles (Franco, 1988).

Por último, el tercer aspecto es el de las alteraciones que el paso del agua puede producir en el terreno. Estas pueden dividirse en físicas, químicas y biológicas. Como fenómenos típicos, podemos citar la erosión interna (arrastre de partículas del suelo), muchos casos de cementación por precipitación de geles, y también el de aparición de susceptibilidad tixotrópica, al cambiar el agua salina de los poros por agua dulce. Como alteraciones debidas, al menos en parte, a actividades biológicas, se puede citar que el desarrollo de algas microscópicas es capaz de impermeabilizar en poco tiempo capas que se deseaba fueran filtrantes. En otros casos, el rebajamiento de la capa freática reactiva bacterias aeróbicas que permanecían en vida latente o muy amortiguada, y desencadena procesos de hinchamiento (Franco, 1988).

2.8 GENERALIDADES SOBRE PRESAS DE TIERRA

Una presa de embalse es simplemente una pared que se coloca en un sitio determinado del cauce de una corriente natural con el objeto de almacenar parte del caudal que transporta la corriente. La pared debe ser diseñada para que soporte las fuerzas que se generan por la presión del agua, y para que impida filtraciones a lo largo de su estructura y en las superficies de contacto entre la estructura y el terreno natural adyacente. Además, la presa debe contar con obras complementarias que permitan el paso del agua que no se embalsa y con estructuras de toma para captar y entregar el agua embalsada a los usuarios del sistema (Rodríguez, 2012).

En la práctica se han desarrollado diferentes tipos de presas, y en cada caso particular se selecciona el tipo de presa que mejor se acomode a las condiciones locales, tales como altura de la presa, acondicionamiento y facilidades de acceso de la zona,

cimentación que se requiere, costo y transporte de materiales y seguridad. Los tipos de presa más utilizados en la actualidad son los de tierra y escollera.

Los diseños hidráulicos en una presa de embalse consideran los siguientes aspectos:

2.8.1 Demanda. Es la necesidad de agua que tiene el sistema que se está considerando. Cuando el río o la quebrada que se seleccionó como fuente de suministro, pueden entregar el caudal de demanda durante unos períodos pero falla en otros, entonces se hacen estudios hidrológicos adicionales de la fuente para determinar si la construcción de un embalse resuelve el problema. Como resultado de estos estudios se obtiene el volumen de almacenamiento requerido que es el volumen que se debe almacenar para suministrar la demanda todo el tiempo (Arellano, 2015).

2.8.2 Volumen Útil de Almacenamiento. Es el volumen que el embalse está en capacidad de almacenar para suministrar a los usuarios del sistema. Se determina mediante la aplicación de modelos de simulación hidrológica, utilizando como variables las características físicas del embalse, los caudales naturales que entran al embalse, las lluvias directas sobre el área del embalse, las pérdidas por evapotranspiración, infiltración y vertimientos, y el suministro de agua a los usuarios. Cuando el volumen útil es menor que el volumen requerido entonces el embalse no está en capacidad de suministrar la demanda durante todo el tiempo y se presentan fallas en el suministro con el consiguiente racionamiento. Hay algunas tolerancias para que el sistema permita operar con racionamientos (Arellano, 2015).

2.8.3 Volumen de Sedimentos. un embalse es un gran sedimentador. Mediante estudios de hidráulica fluvial y de transporte de sedimentos se estiman los volúmenes y las características granulométricas de los sedimentos que llegan al embalse en un año típico. También, dado que los sedimentos más gruesos se quedan primero que los finos, y que un porcentaje de estos últimos se deposita contra la presa, es necesario evaluar la forma que toma la masa de los sólidos que se sedimentan para definir el volumen que ocuparán año tras año durante la vida útil del embalse. Los diseños deben asegurar que hay suficiente espacio de almacenamiento de sedimentos para que durante los años de operación proyectados los sedimentos no obstaculicen el funcionamiento de las estructuras de captación (Arellano, 2015).

2.8.4 Estructuras de Captación. Son obras de toma que están colocadas por encima del nivel de sedimentos y por debajo del nivel mínimo de operación del embalse. Pueden ser torres con o sin compuertas que se comunican con conductos cerrados que pasan a través de la presa y entregan el agua a los sistemas de distribución, o estructuras más sencillas controladas por compuertas o por válvulas (Arellano, 2015).

2.8.5 Vertimiento de Excesos. Los volúmenes de agua que llegan al embalse cuando el volumen de embalse útil está lleno son excesos que deben salir de la estructura en un tiempo corto. Para este efecto se diseñan las estructuras de vertimiento, las cuales deben tener capacidad para conducir los picos de las crecientes extraordinarias en forma segura hasta entregarlos aguas abajo de la presa.

En presas de concreto es corriente construir el vertedero de excesos dentro del cuerpo de la presa, pero en presas de tierra y escollera, y en algunos casos particulares de estructuras de concreto resulta más conveniente diseñar y construir el vertedero de excesos como una estructura independiente. (Galán, 2012).

2.9 DEPÓSITOS GLACIARES

Son depósitos transportados y depositados por el hielo. Están formados por tillitas y morrenas. Su composición es muy heterométrica y la distribución es altamente errática. Los depósitos fluvio-glaciares contienen fracciones desde gravas gruesas a arcillas; están algo estratificados y su granulometría decrece con la distancia al frente glaciar, (Lambert, 1972). Sin embargo, los de origen lacustre-glaciar presentan fracciones más finas, predominando las arcillas y las estructuras laminadas, típicas de las arcillas barbadas.

La heterogeneidad y anisotropía es la característica típica de estos depósitos, pues coexisten desde las arcillas hasta las gravas gruesas y grandes bloques, ver figura N° 11. Por tanto, las propiedades geotécnicas son altamente variables. La permeabilidad está directamente relacionada con la granulometría, estos suelos son muy sensibles a los incrementos de presión intersticial producidos por lluvias torrenciales y por deshielo. En estos depósitos son muy frecuentes los fenómenos de soliflucción y de inestabilidad de laderas. La investigación geotécnica es compleja, los espesores pueden ser igualmente muy variables, siendo frecuentes las potencias elevadas.

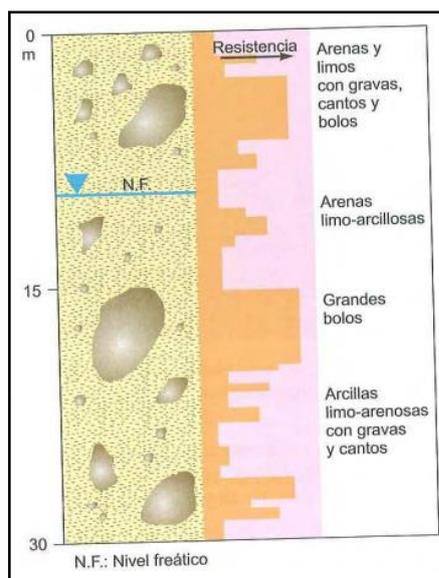


Figura N° 11: Perfil tipo de depósitos glaciares (Gonzales 2002).

2.10 DEPOSITOS ALUVIALES

Constituyen depósitos transportados por la corriente de los ríos, flujo de agua y corrientes laminares producto de las precipitaciones pluviales. Litológicamente están compuestos por niveles intercalados de arena, limos y conglomerados polimicticos y heteromícticos, que presentan lenticularidades y entrecruzamientos. (Ingemmet, 1996)

2.11 GEOTECNIA

La geotecnia es la ciencia aplicada al estudio y solución de los problemas de la ingeniería y del medio ambiente producidos como consecuencia de la interacción entre las actividades humanas y el medio geológico. El fin de la geotecnia es asegurar que los factores geológicos condicionantes de las obras de ingeniería sean tenidos en cuenta e interpretados adecuadamente, así como evitar o mitigar las consecuencias de los riesgos geológicos. (Gonzales, 2002).

El ingeniero en geología es un profesional, que entiende acerca de los adelantos y métodos geológicos, así como los riesgos y afectaciones que causa el hombre. También este busca las mejores posibilidades de construcción civil, precaviéndose de los impactos que puede provocar al ambiente. (Foyo, Tomillo y Sánchez, 1998).

La ingeniería geológica surge con el desarrollo de las grandes obras públicas y el crecimiento urbano. Existen diversos antecedentes que demarcaron la necesidad de llevar a cabo estudios geológicos aplicados a la ingeniería. El desarrollo que alcanzaron

otras ciencias afines, como la mecánica del suelo y la mecánica de rocas, configuraron los principios de la moderna geotecnia, dentro de la cual la ingeniería geológica representa la visión más geológica a la solución de los problemas constructivos. La necesidad de estudiar geológicamente el terreno como base de partida para los proyectos de grandes obras es indiscutible en la actualidad, y constituye una práctica obligatoria. Esta necesidad se extiende a otras obras de menor volumen, pero de gran repercusión social, como la edificación, en donde los estudios geotécnicos son igualmente obligatorios. (González, 2002).

2.11.1 Métodos de Aplicación en Geotecnia

La geotecnia tiene sus fundamentos en la geología y en el comportamiento mecánico de los suelos y las rocas. Incluye el conocimiento de las técnicas de investigación del subsuelo, tanto mecánicas como instrumentales y geofísicas, así como los métodos de análisis y modelización del terreno, se tiene 3 modelos.

- Modelo geológico.
- Modelo geomecánico.
- Modelo geotectónico de comportamiento.

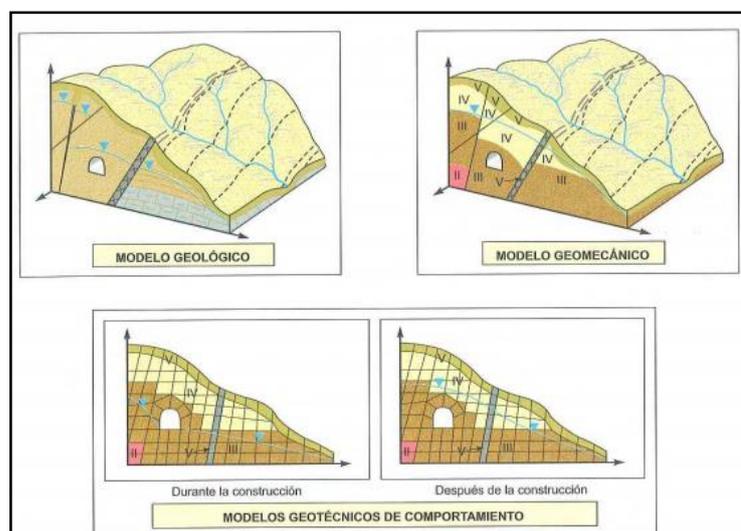


Figura N° 12: Ejemplo de Modelación en ingeniería geológica (Gonzales 2002).

CAPITULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 MATERIALES

En este capítulo se mencionará todos los materiales que se utilizaron para llevar adelante la presente investigación, a continuación se menciona:

- Brújula.
- GPS.
- Protactor
- Cámara fotográfica digital.
- Winchas.
- Martillo de geólogo.
- Equipos para ensayos de laboratorio de reconocimiento y especiales.
- Equipo para ensayos in situ para determinar la permeabilidad.
- Equipo para la prospección geofísica.
- Equipos para las perforaciones diamantinas.
- Movilidad para trasladar personal y equipos.
- Programas especializados para evaluar el la estabilidad y filtración.

3.2 MÉTODOS

Siendo una investigación en la cual se conjuga la búsqueda de información por fuentes teóricas y a la vez la toma de datos en campo, se define entonces el método cuantitativo, además de ser descriptivo.

Las técnicas de investigación que se utilizó en esta investigación son: trabajos realizados en gabinete, campo y laboratorio, a continuación se detalla:

3.2.1 Actividad de Gabinete Inicial

Se recopilaron datos a nivel regional como; estratigrafía, geomorfología, estructural, geodinámica externa, etc., tomando como referencia principal el cuadrángulo 28ñ del boletín de la INGEMMET, con su respectiva memoria respectiva y planos.

Se verificaron y analizaron imágenes satelitales de la zona de evaluación, descartando así agentes externos que pueden afectar durante y después de la construcción de la presa.

También se realizó el plano base, tomando como referencia el estudio topográfico del **Estudio de pre inversión a nivel de factibilidad del PIP: Instalación de servicio de agua del sistema de riego laguna Huanzo - distrito de Lucanamarca, provincia Huancasancos – Ayacucho**, (Agua y Agro, 2015)

3.2.2 Actividades de Campo

Se realizaron trabajos de campo.

3.2.2.1 Mapeo Geológico

Mediante un recorrido de la zona de desplante y alrededores, se identificó las unidades lito estratigráficas, unidades geomorfológicas y agentes geodinámicas que puedan afectar al proyecto.

La evaluación geológica local, plantea el reconocimiento de las unidades lito estratigráficas, así como las características físicas, geomorfológicas y estructurales.

La laguna Huanzo se emplaza sobre depósitos morrénicos conformados por tills (gravas, arenas y limos). Los diversos procesos morfodinámicos locales que se producen en el área, tienen un origen natural, las cuales son el resultado de la interacción de los factores fisicoquímicos y de los procesos geodinámicas.

La identificación de las diferentes geo formas, ha sido determinada tomando en cuenta las características genéticas de la roca, pendiente o inclinación del terreno, características litológicas, edad de formación de las unidades estratigráficas, características estructurales (tectónica) y la evolución geo histórica de los procesos geodinámicos.

3.2.2.2 Prospección Geofísica

La finalidad del sondeo eléctrico vertical (SEV), es averiguar la distribución vertical de resistividades bajo el punto sondeado, delinear la estructura del subsuelo a lo largo del eje de presa proyectado y perfiles transversales al eje del cauce principal de la laguna Huanzo , diferenciando las capas del subsuelo presentes hasta una determinada profundidad,(Agua y Agro, 2015).

Los métodos geofísicos realizados en la zona de estudio, han consistido en la ejecución de 08 puntos de resistividad distribuidos a lo largo y ancho de la zona de desplante, la distancia de los electrodos A B fue de un máximo de 200m. con un MN desde los 0.5 a 50m. con esta disposición de electrodos se logró una profundidad de investigación aproximadamente de 70 m., (Agua y Agro, 2015).

Los puntos SEV se ubicaron en lugares estratégicos con referencia al eje de presa a construir, para así lograr como resultado secciones de perfiles estratigráficos.

3.2.2.3 Excavación a Cielo Abierto

Como parte de la exploración directa, se realizaron tres (03) calicatas en lugares estratégicos con referencia al eje trazado de la presa a construir. La excavación fue manualmente.

Cuadro 1: Resumen de las calicatas realizadas

CODIGO DE CALICATAS	UBICACIÓN	CORDENADAS UTM (WGS – ‘84)		COTA DE TERRENO m.s.n.m.	PROF. (m.)
		ESTE	NORTE		
CA-01	Eje de presa	549,208	8’468,130	4,150	1.80
CA-02	Eje de presa	549,295	8’468,122	4,157	1.60
CA-03	Eje de presa	549,334	8’468,093	4,152	1.60

3.2.2.4 Perforaciones Diamantinas

Se realizaron cinco (05) perforaciones diamantinas, ubicadas en el eje de la presa proyectada, estas perforaciones cuentan con recuperación de muestras, completando un total de 151.10 metros.

Los puntos de perforación se ubicaron estratégicamente con referencia al eje de presa proyectada, prospección geofísica, excavación de calicatas.

Para la ejecución de las perforaciones, el método empleado fue el rotativo, con una máquina diamantina modelo TP-50D sobre oruga; los trabajos de perforación se realizaron con tuberías HQ (63.5 mm.) y NQ (47.6 mm.), con un diámetro de perforación de 96,0 mm. y diámetro de testigos recuperados de 63,5 y 47.6 mm. Respectivamente. Las brocas utilizadas están provistas de esquiras de diamante impregnadas. Como fluido de perforación se utilizó agua de la laguna.

Cuadro 2: Resumen de perforaciones diamantinas realizada.

CODIGO	UBICACIÓN	CORDENADAS UTM (WGS – ‘84)		COTA DE TERRENO m.s.n.m.	PROF. (m.)
		ESTE	NORTE		
P-01	Eje de Presa	549,371	8’468,055	4,145.00	30.10
P-02	Eje de Presa	549,272	8’468,091	4,138.00	30.05
P-03	Eje de Presa	549,194	8’468,149	4,143.00	30.30
P-04	Eje de Presa	549,328	8’468,115	4,144.00	30.40
P-05	Eje de Presa	549,226	8’468,164	4,140.00	30.35

3.2.2.5 Ensayo de Permeabilidad Tipo Lefranc

El ensayo se efectuó en el interior del sondeo y puede realizarse durante la ejecución de la perforación o una vez finalizada ésta, en este caso se realizaron las pruebas de permeabilidad mientras se realizaba la perforación, a cada 03 metros de profundidad. La longitud del tramo a ensayar queda siempre definida entre el final de la tubería de revestimiento del sondeo y el fondo del mismo.

El procedimiento consiste en rellenar de agua el sondeo y medir el caudal necesario para mantener el nivel constante (ensayo a régimen permanente) o bien medir la velocidad de descenso del nivel de agua (ensayo a régimen variable). La medida del caudal de admisión se realizó cada minuto en un periodo de 10 minutos.

La realización del ensayo requirió que, antes de medir tiempos y caudales, se llene todo el sondeo de agua, observando que el aire es expulsado y que se estabiliza el nivel y la velocidad de descenso, lo que indica que se ha alcanzado el régimen permanente.

El coeficiente de permeabilidad del suelo se calcula de manera simple con la siguiente fórmula:

$$K=Q / (C\Delta h)$$

Siendo:

K= Coeficiente de permeabilidad (cm/s);

Q= Caudal (cm³/s);

Δh = Altura del agua sobre el nivel inicia (cm);

C= Coeficiente de forma (cm⁻¹), definido por la expresión:

$$C=4\pi/[2/L)\log(L/r) - (1/2H)]$$

Donde:

L = Longitud del tramo ensayado (m),

r = Radio del sondeo (m)

H = Distancia del punto medio de la zona ensayada al nivel freático.

3.2.3 Actividades de Laboratorio

• Ensayos de Laboratorio

De las calicatas y trincheras realizadas en el eje de la presa y las canteras correspondientes se extrajeron muestras representativas, a las cuales se les realizó los ensayos de análisis granulométricos, clasificación S.U.C.S. y A.A.S.H.T.O, corte directo, permeabilidad y ensayo triaxial.

Estos ensayos se realizaron en el laboratorio de la universidad nacional de ingeniería (UNI).

3.2.4 Actividades de Gabinete Final

3.2.4.1 Elaboración de Planos

Los plano correspondientes a esta investigación, se realizaron con la ayuda de software especializados para ingeniería; como el ArcGIS 10.3, AutoCAD Civil 3D 2013 y AutoCAD 2013.

Los datos obtenidos de campo, de ubicación, litológico, geomorfológico, etc., se insertaron y procesados en los software antes mencionados.

3.2.4.2 Evaluación de la Estabilidad de Taludes

Para evaluar las condiciones de estabilidad de las zonas críticas de la presa en el procesos constructivos, se realizo el análisis de estabilidad de taludes en condiciones pseudoestáticas por ser el mas critico, en las cuales la presa se encontrará y trabajará durante toda su vida útil.

Para dicho análisis se debe tener en cuenta una serie de factores que influyen en la estabilidad de un talud. Los factores que se toman en cuenta son: geometría del talud, parámetros geotécnicos, cargas dinámicas por acción de los sismos, condiciones de flujo de agua, etc. No todos estos factores se pueden cuantificar en un modelo matemático; a pesar de estas limitaciones, determinar el factor de seguridad asumiendo superficies probables de falla, permite tener una idea del comportamiento del talud.

Para realizar este analisis nos apoyaremos en el software especializado **GEOESTUDIO 2012-SLOPE/W**

El Slope/w es un programa de cálculo de estabilidad de taludes muy usado en el ámbito de la geotecnia, el cual se basa en la simulación de una superficie de posible falla, este programa es comercializado por la empresa Geo-slope International Ltd. De Calgary, Alberta.

El análisis se ha realizado con la geometría planteada; una presa de material suelto de 12 metros de altura, de taludes 1V /2H para aguas arriba y 1V /1.8H para aguas abajo, además de 3 materiales: el primero denominado cimentación, es correspondiente a los depósitos morrénicos; el siguiente se trata de un material de filtro, utilizado para reprimir posibles niveles de agua generados por filtraciones no previstas y por último, el material denominado cuerpo de presa.

El coeficiente sísmico para presas a utilizar según, Kramer-1996 (quien considera que la aceleración pseudoestática en la simulaciones debería ser mucho menor que la máxima aceleración), por tanto será 2/3 del parámetro de la zona, es decir 0.22g.

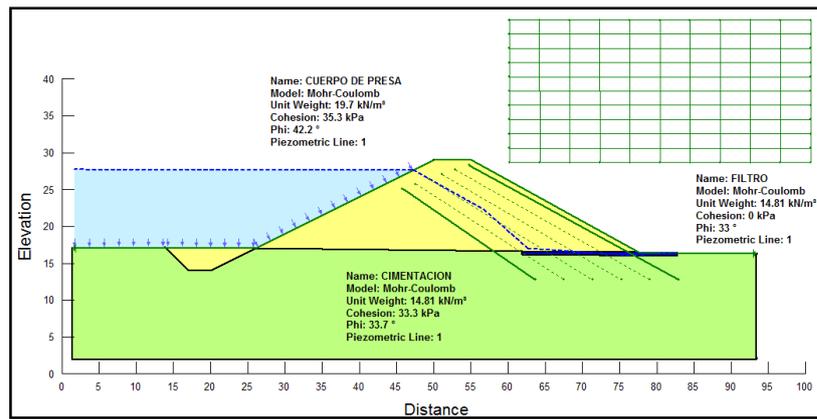


Figura N° 13: Ejemplo de análisis de estabilidad de talud con el programa Slope/w.

3.2.4.3 Análisis de Filtración

De acuerdo a los resultados de los ensayos anteriores tenemos:

Se determinó un tipo de suelo granular (arenoso) de composición ígnea, con fragmentos de roca andesítica de hasta 5 cm. de diámetro; a este material se le adjudica la acción directa de los glaciares. El ensayo de permeabilidad tipo Lefranc, cataloga a este suelo como permeable, y por tanto propenso a las filtraciones sucedidas por subpresiones del embalsamiento.

Todo esto conlleva a realizar un análisis de infiltraciones en el subsuelo de cimentación.

A. Parámetros Geotécnicos del Suelo de Cimentación

Según los estudios realizados en la zona del eje de presa, se ha podido determinar los parámetros geotécnicos de los materiales constituyentes del suelo de cimentación, a continuación se presenta un resumen de estos.

Cuadro 3: Parámetros geotécnicos obtenidos de los ensayos de laboratorio.

ESPESOR (m) Y TIPO DE SUELO		PARÁMETROS GEOTÉCNICOS		PERMEABILIDAD (cm/s)
		C (Kg/cm ²)	Φ°	
0.00- 5.00	Cobertura	0.34	33.7	3.20E-04 cm/s
5.00- 15.00	Morrenas			2.02E-05 cm/s
15.00- 50.00	Morrenas Compactas			2.50E-04 cm/s
PERMEABILIDAD EN LABORATORIO		7.96E-05 cm/s		

Fuente: (Agua y Agro, 2015).

Para el estudio y determinación de las subpresiones que realmente actúan en la presa, se ha desarrollado un análisis por el método de elementos finitos, utilizando para ello, el programa de simulación del movimiento del agua en medios porosos **Seep/w**, del paquete **Geoestudio 2007**.

B. Análisis con Geoestudio 2007 – seep/w

Este es un programa que usa el método de elementos finitos para modelar el movimiento y la distribución de la presión de poros dentro de materiales como suelo y roca. Se realizó diferentes etapas del modelamiento, el cual simulará las infiltraciones hacia el suelo de cimentación, así como también el efecto de la impermeabilización recomendada para esta presa, esto en función de los parámetros geotécnicos del suelo.

Cuadro 4: Parámetros utilizados en el análisis

MATERIAL	PERMEABILIDAD
CUERPO DE PRESA	4.44E-05 cm/s
CIMENTACIÓN	7.96E-05 cm/s
GEOMEMBRANA	1E-10 cm/s
FILTRO	10.00 cm/s
INYECCIONES	1.0E-10 cm/s

Fuente: Agua y Agro (2015)

3.2.4.4 Redacción del Informe Final

Con los datos obtenidos de los trabajos; gabinete inicial, trabajos de campo, trabajos de gabinete y trabajos de gabinete final, debidamente procesados y con sus resultados correspondientes, se hace la redacción del informe final.

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

4.1.1 Ubicación

Geográficamente la zona de estudio se ubica en la parte Sur de la Sierra del territorio peruano, en la región Ayacucho, entre las coordenadas geográficas 13° 51' 23'' Latitud Sur y 74° 32' 39'' de Longitud Oeste, hidrográficamente se encuentra dentro de la microcuenca de la laguna Huanzo, a una altitud aproximada de 4,150 m.s.n.m. correspondiendo a la Región Ayacucho.

Políticamente está ubicado en el distrito de Santiago de Lucanamarca, en la provincia de Huanca Sancos, departamento de Ayacucho; según las siguientes coordenadas UTM en el sistema WGS'84 – Zona 18 L:

- Lagunas Huanzo N= 8°468,141 E= 549,341 Z= 4,150 msnm.

4.1.2 Accesos

4.1.2.1 Via terrestre

El acceso hacia la zona de proyecto es desde la ciudad de Lima a través de la carretera afirmada Lima-Pisco-Ayacucho hasta las ciudad de Huamanga, luego através de la carretera afirmada Ayacucho-Cangallo hasta las ciudad de Cangallo, carretera afirmada Cangallo – Huancapi - Huancasancos hasta la ciudad de Huancasancos y finalmente por la carretera carrozables se llega al lugar del Proyecto. El recorrido es como se presenta en la cuadro 5.

Cuadro 5: Recorrido de Lima-laguna Huanzo.

TRAMOS	LONGITUD	HORAS	TIPO DE VÍA
Lima-Ayacucho	553 Km	8.00 hrs	Carretera afirmada
Ayacucho – Cangallo	90 Km	3.00 hrs	Carretera afirmada
Cangallo – Huancapi	22 Km	1.00 hrs	Carretera afirmada
Huancapi – Huanca Sancos	55 Km	2.00 hrs	Carretera afirmada
Huanca Sancos – Lucanamarca	40 Km	2.00 hrs	Trocha carrozable
Lucanamarca – Laguna	30 Km	1.00 hrs	Trocha carrozable
Total	790 Km	17.00 hrs	

4.1.2.2 Vía Aérea

Vuelo hacia la ciudad de Huamanga, El viaje toma un tiempo de 40 min. Aprox. Hasta llegar a la ciudad de Huamanga, luego por la carretera afirmada Ayacucho-Cangallo hasta la ciudad de Cangallo, carretera afirmada Cangallo – Huancapi - Huancasancos hasta la ciudad de Huancasancos y finalmente por la carretera carrozables se llega al lugar del Proyecto.

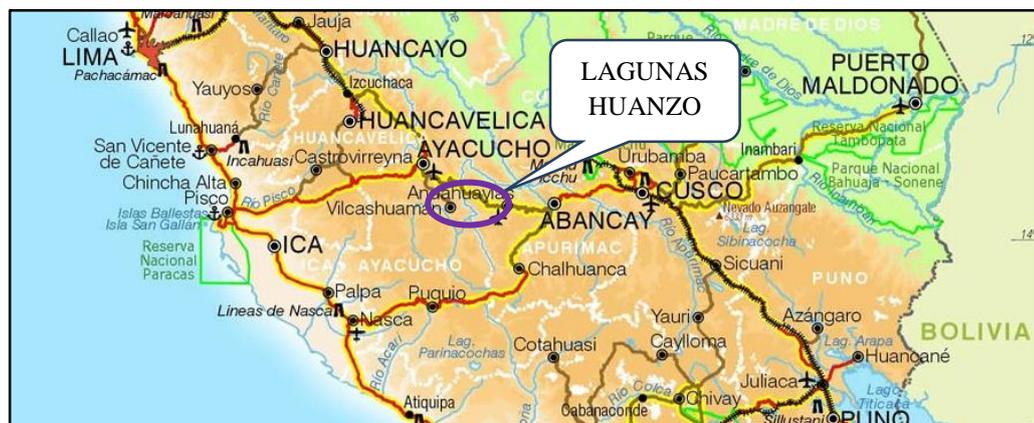


Figura N° 14: Ubicación de la zona de estudio (Agua y Agro, 2015).

4.1.3 Clima

El clima de la zona de estudio, como la mayor parte de los Andes peruanos, está caracterizado por la alternancia de una estación seca (Abril a Noviembre) y otra lluviosa (Diciembre a Marzo); la cantidad de las precipitaciones varía según la posición geográfica y altimetría, generando una marcada variación en el clima y la vegetación en diferentes sectores del área estudiada.



Figura N° 15: Vista panorámica de la laguna Huanzo.

4.1.4 Fauna y Flora

La fauna en esta zona está representada por aves silvestres y animales carnívoros como el zorro y otros, además destacan las vizcachas, cuyes silvestres, gavilanes, la trucha es característica principal de la laguna Huanzo. La flora destaca por variedades como la cola de zorro y la cantuta, en zona de menos altitud crece el sauco, además está representada en su mayoría por el típico ichu.

La agricultura en región se desarrolla mayormente en la región Quechua y en los pisos más altos que contienen clima frío. En los pisos superiores se cultivan algunas especies nativas como quinua y tarwi ocasionalmente, en los lugares más abrigados se siembra cebada.



Figura N° 16: Flora y fauna laguna Huanzo.

4.1.5 Geología Local

4.1.5.1 Litología

En esta sección se presentan las características litológicas dominantes en la zona de investigación, en ella se han podido determinar las características lito estratigráficas, los mismos que se detallan en la figura N° 17.

ERA	SISTEMA	SERIE	UNID. LITOESTRATIGRAFICAS	
CENOZOICO	CUATERNARIO	HOLOCENO	DEP. PALUSTRES	Q-pa
			DEP. ALUVIAL 2	Q-al2
			DEP. ALUVIAL 1	Q-al1
		PLEIS-TOCENO	DEP. MORRENICO 2	Q-mo2
			DEP. MORRENICO 1	Q-mo1

Figura N° 17: Columna estratigráfica a nivel local.

A. Cenozoica

a) Depósito Morrénico 1 (Q-mo1)

En la zona de investigación estos depósitos se encuentran en la margen derecha del eje de presa y de la laguna Huanzo, como se muestra en la figura N° 18.

Se presentan en forma de bloques y fragmentos de roca, estriados y diaclasados, proveniente del afloramiento rocoso ígneo (Formación Astobamba), que se encuentra en la parte más alta de la laguna.

Presenta una composición de clastos de rocas en diferentes tamaños, angulosas y tabulares; además presentan material o depósitos de grano medio a fino.

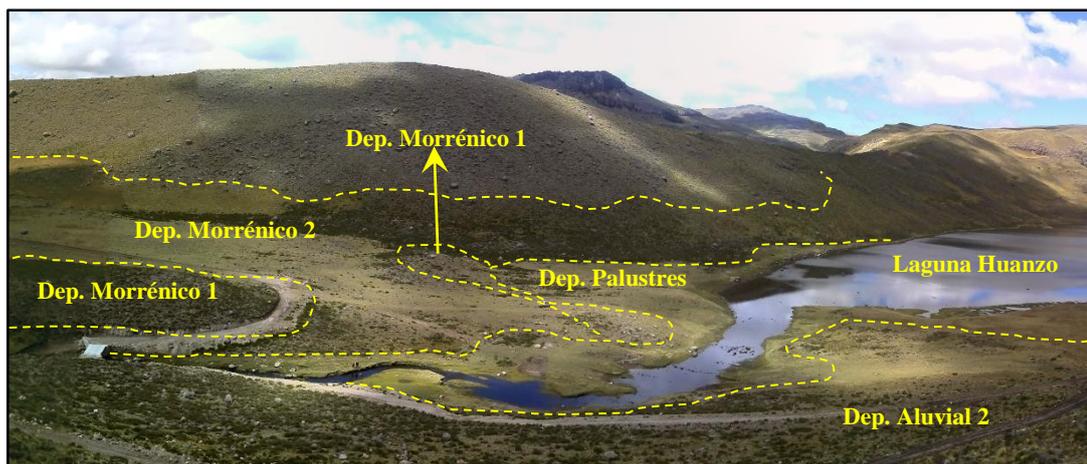


Figura N° 18: Fotografía de identificación de los diferentes depósitos dominantes en la zona de investigación.

b) Depósito Morrénico 2 (Q-mo2)

Estos depósitos son la sucesión respecto al movimiento por la gravedad de los depósitos morrénico 1,

En el lugar de investigación, se ubica en la parte baja de ladera en margen derecha, la composición litología está representado por; clastos de rocas ignea en diferentes tamaños, sub angulosas, además presentan material o depósitos de grano medio a fino en cantidad considerable.

c) Depósito Aluvial 1 (Q-al1)

En el lugar de investigación se presenta en la zona mas elevada de la margen izquierda de la laguna Huanzo, como se muestran enm la figura N°18.

Litológicamente están compuestas por niveles intercalados de arenas medianamente gradadas, limos, arcillas y clastos polimíctico subredondeados.

d) Depósito Aluvial 2 (Q-al2)

Este tipo de depósito es similar al depósito Aluvial 1, con la diferencia que estos presentan un movimiento por fuerza de la gravedad.

Se presenta en la margen derecha de la laguna Huanzo, en las faldas de los Depósitos Aluviales 1.

e) Depósito Palustres (Q-pa)

En el lugar de investigación se presenta alrededor de la laguna Huanzo. Es una zona de inundación, por la subida del nivel del agua de la laguna en temporada de lluvia cada año.

Litológicamente presenta; arenas limosas de color beige oscuro, con materia orgánico.

Ver anexo I Plano geológico local (MN-02)

4.1.5.2 Geomorfología Local

Se ha identificado varias unidades geomorfológicas, en cuyo modelado externo han participado agentes como los glaciares, lluvias y los cambios climáticos; al tipo litológico de la Formación Astobamba se dio una erosión por desglaciación que la han rebajado en un 50% de su nivel volumétrico, dando una topografía de cuenca. Las principales geo formas son:

A. Colinas

Prominentes de la parte alta de la laguna, están desarrolladas en la cota 4440 a 4500 m.s.n.m. que se distingue en una cadena de cerros, con orientaciones de NE a SW.

B. Laderas

Se muestran en la zona de estudio con pendientes moderadas, las cuales están combinadas con otras unidades geológicas como; material de cobertura y depósitos eluviales.

Las laderas que han permanecido estables por muchos años, pueden fallar en forma imprevista debido a cambios topográficos, sismicidad, flujos de agua subterránea, cambios en la resistencia del suelo, meteorización o factores de tipo antrópico o natural que modifiquen su estado natural de estabilidad.

C. Planicies

Son sectores ubicados cercanos a la Laguna Huanzo. En estos lugares, la horizontalidad del relieve, y la constitución del suelo, con proporciones de arcilla y materia orgánica, tienden a concentrar las escorrentías provenientes de sectores laterales

en el fondo del vaso, y de afloramientos de aguas subterráneas locales, determinando la formación de ambientes hidromórficos, anegados, de especial importancia ecológica e hidrológica.

4.1.5.3 Geodinámica Interna

Se refiere a los procesos endógenos de dinámica cortical, originados en los niveles estructurales internos de la tierra y que no dependen de la interacción de los fenómenos atmosféricos; en la zona estudiada los fenómenos de geodinámica interna.

A. Sismicidad

La actividad sísmica en el Perú es debida principalmente al proceso de subducción de la placa de Nazca bajo la Sudamericana de Oeste a Este, en su borde Oeste, con una velocidad relativa del orden de 8-10 cm/año. El margen continental Oeste de Sudamérica es uno de los más activos y de los bordes de placa el mayor en la Tierra. Como resultado de este proceso se ha formado la Cordillera de los Andes en diferentes etapas orogénicas. La alta velocidad de convergencia de placas permite que se genere un fuerte acoplamiento entre ellas, produciendo frecuentemente sismos de diferentes magnitudes a diversos niveles de profundidad, ya sea en la superficie de fricción de las placas, en el interior de la placa continental o en el interior de la placa oceánica que se desplaza por debajo del continente. Las características de la sismicidad de Perú han sido ampliamente analizadas y discutidas por diversos autores; siendo las principales, las relacionadas con la distribución espacial de los focos sísmicos en superficie y en profundidad.

El fenómeno sismo constituye la expresión superficial de la ruptura cortical de masas pétreas sometidas a enormes esfuerzos de deformación donde la energía producto es liberada en forma de ondas elásticas que al desplazarse a través de la superficie generan las vibraciones que identificamos como sismo.

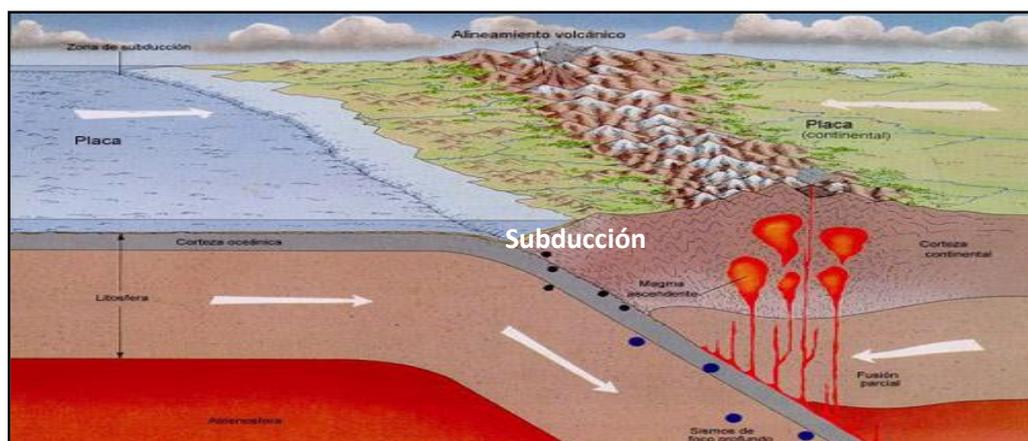


Figura N° 19: Esquema de la zona de subducción en el Perú (Agua y Agro 2015).

a) Parámetros de Diseño Sísmico

Para fines prácticos, en base a la distribución espacial de la sismicidad documentada en el país, así como a las características de los movimientos sísmicos y a las tendencias de intensidad decreciente con respecto a los epicentros registrada en el catálogo sísmico nacional, la normatividad pertinente asume la división del territorio en tres zonas (NTP E-0.3), asignándoles sus correspondientes parámetros de aceleraciones máximas, dentro de un rango de probabilidad determinado.

De esta manera, el territorio nacional queda segmentado tal como se muestra en las figuras N° 20, donde se observa que el proyecto se encuentra ubicado dentro del área de influencia de la Zona 3, se espera que el factor de aceleración máxima del terreno (A) sea de 0.33 g, con una probabilidad de 10% de ser excedida en 50 años, equivalente a un periodo de recurrencia de 475 años.



Figura N° 20: Mapa de zonificación para el diseño sismo resistente (Arellano 2015)

FACTOR DE ZONA 3	$Z=0.40$
SUELO DE CIMENTACIÓN	S_2 =Suelos Intermedios
PERIODO DE VIBRACIÓN	$T_p=0.6$
FACTOR DE SUELO	$S=1.2$

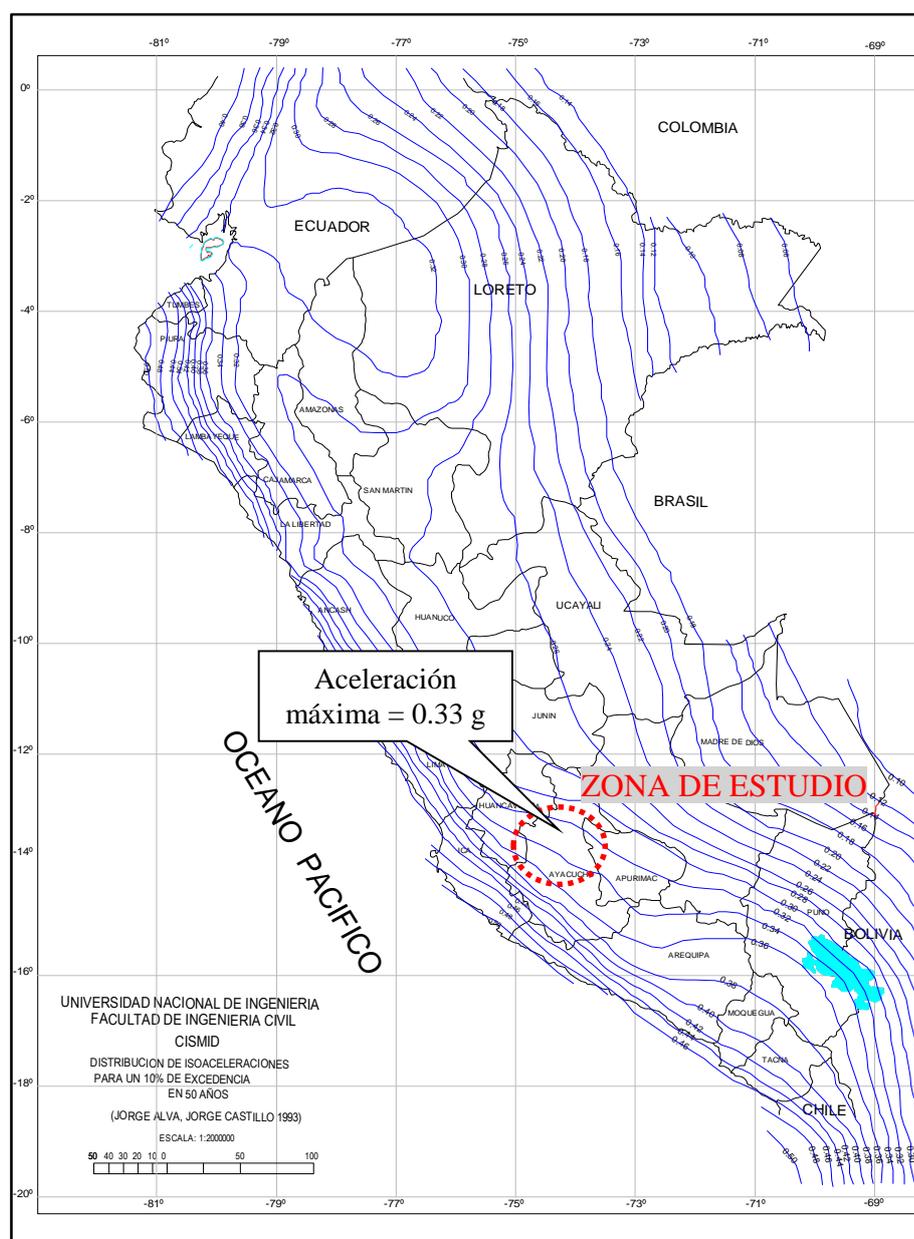


Figura N° 21 Mapa de distribución de isoaceleraciones para un 10% de excedencia en 50 años (CISMID).

Para los análisis de estabilidad por métodos pseudoestáticos para muros y taludes se recomienda emplear un coeficiente sísmico igual a 1/2 de aceleración máxima del terreno (peak ground acceleration PGA) y para presas y reservorios 2/3 de la aceleración máxima del terreno, según Kramer-1996 (quien considera que la aceleración pseudoestática en la simulaciones debería ser mucho menor que la máxima aceleración). Según el mapa de Isoaceleraciones de la figura N° 21 usaremos 0.33g. (0.165g para taludes y 0.22 para cuerpos de presa).

4.1.6 Investigaciones Geotécnicas

A continuación se describe los resultados de la exploración correspondiente a este ítem, de acuerdo a lo detallado que se hizo en el ítem de Métodos.

4.1.6.1 Sondeo Eléctrico Vertical

El procesamiento de las líneas se inició con el ploteo de los valores de resistividad medidos en campo en hojas bilogarithmicas con la finalidad de realizar un control de calidad y las correcciones necesarias; las curvas son suavizadas para realizar la interpretación cuantitativa en forma manual mediante los ábacos patrón de dos capas, estos ábacos permiten calcular valores de resistividad y espesor para cada tipo de curva identificada en el sondeo, (Agua y Agro, 2015). En la siguiente tabla se presenta la disposición geométrica empleada en campo y la ubicación en coordenada UTM de cada uno de los puntos:

Cuadro 6: Ubicación de Puntos SEV.

CODIGO	Coordenadas UTM WGS '84 18L		COTA (msnm)
	ESTE (m)	NORTE (m)	
SEV-01	549,207.85	8'468,129.84	4140.0
SEV-02	549,301.85	8'468,124.84	4142.5
SEV-03	549,225.85	8'468,123.84	4136.5
SEV-04	549,334.85	8'467,848.83	4148.0
SEV-05	549,326.44	8'467,923.94	4137.0
SEV-06	549,321.00	8'468,251.00	4137.5
SEV-07	549,166.11	8'468,024.97	4139.5
SEV-08	549,189.85	8'468,081.91	4141.5

Fuente: Agua y Agro (2015).



Figura N° 22: Plano de ubicación de los puntos SEV.

En la etapa de Gabinete se realizaron el procesamiento de los datos tomados en campo y su respectiva interpretación. Los resultados de la interpretación de cada uno de los SEV, en las distintas zonas, se presentan en el cuadro 7, donde la resistividad viene dada en Ohm-m y el espesor en metros.

Cuadro 7: Resultado de los sondajes Eléctricos Verticales.

SEV N°	RESULTADOS					
	1ra CAPA		2da CAPA		3ra CAPA	
	ρ_1	E1	ρ_1	E2	ρ_1	E3
1	729	3.3	52	59	4005	--
2	238	1.5	48	37	13685	--
3	112	22	30	56	2624	--
4	99	14	44	85	5854	--
5	101	23	43	50	5247	--
6	117	16	21	66	23416	--
7	--	--	69/54	26/12	3815	--
8	512	5.3	72/50	8.5/44.8	3965	--

Fuente: Agua y Agro (2015).

Con la finalidad de determinar y visualizar la secuencia y continuidad de los diferentes estratos del subsuelo para el lugar de implante de la presa-Huanzo, se ha correlacionado a la prospección eléctrica con la geología para lo cual se ha elaborado tres secciones Geo eléctricas (longitudinal y transversal), los cuales se describen a continuación:

- **Sección Geo Eléctrica A-A’.**

La sección se elaboró en forma transversal cortando el eje principal del cauce de la descarga de la Laguna Huanzo, con orientaciones de Oeste – Este, conformado por tres (03) SEV, una longitud de 124m. Cuya descripción se presenta en el cuadro 8.

Cuadro 8: Resultado de los Sondajes Eléctricos Verticales-Sección Geo eléctrica A – A’

DESCRIPCION DE LAS SECCIONES GEOELECTRICAS A – A’			
Capas	Resistividades (Ohm.m)	Espesores (m)	Descripción
1	112 – 729	1.5 - 22	Material orgánico con cobertura vegetal húmedo, con posible presencia de arenas y clastos.
2	30 – 52	37 - 59	Material arenoso arcilloso y limoso saturado, con presencia posiblemente de clastos de diferentes tamaños.
3	>2624	??	Posiblemente roca volcánica con diaclasas aisladas, Basamento rocoso.

Fuente: Agua y Agro (2015)

- **Sección Geo Eléctrica B - B’.**

La sección se elaboró en forma longitudinal al eje principal del cauce de la descarga de la laguna-Huanzo, con orientación Suroeste – Noreste, ubicada en la margen izquierda del cauce principal, conformado por (04) SEVs, iniciándose en el SEVs-07 margen izquierda aguas abajo, culminando en la zona del cauce SEV-06 (puente artesanal), tiene una longitud de 318m. Cuya descripción de los estratos es como sigue, en el cuadro 9.

Cuadro 9: Resultado de los Sondajes Eléctricos Verticales- Sección Geo eléctrica B -B’.

DESCRIPCION DE LAS SECCIONES GEOELECTRICAS B – B’			
Capas	Resistividades (Ohm.m)	Espesores (m)	Descripción
1	117 - 512	3.3 - 16	Material de depósitos Fluvioglaciares con probable presencia de arenas gradadas con clastos aislados.
2	69 – 72	8.5 - 26	Depósito de deslizamiento de rocas volcánicas saturadas, con posible presencia de material arcilloso.
3	21 – 54	12 - 66	Material arcilloso saturado, con presencia posible de Arenas, clastos de roca volcánica aislados.
4	>3815	??	Posible zona de roca volcánica con diaclasas aisladas, Basamento rocoso.

Fuente: Agua y Agro (2015)

- **Sección Geo Eléctrica C - C’.**

La sección se elaboró en forma longitudinal al eje principal del cauce de la descarga de la laguna Huanzo, con orientación Norte-Sur, ubicado en la margen derecha de la laguna, conformada por (04) SEVs iniciándose en el SEV-06 (Puente artesanal) margen derecha aguas abajo, culminando en la zona de la laguna SEV-04, tiene una longitud de 435m. cuya descripción de sus estratos es como sigue en el cuadro 10.

Cuadro 10: Resultado de los Sondajes Eléctricos Verticales-Sección Geo eléctrica C - C’.

DESCRIPCION DE LAS SECCIONES GEOELECTRICAS C - C’			
Capas	Resistividades (Ohm.m)	Espesores (m)	Descripción
1	99 - 238	1.5 - 23	Material Orgánico con cobertura vegetal húmedo, con presencia de arena gradada, con posibles intercalaciones de clastos. Presencia de material de depósito de origen fluvio-glaciar y derrúbiales en ambos extremos de la sección.
2	21 – 48	37 - 85	Material arena-arcilloso saturado, con posible presencia de limos y clastos de origen volcánico.
3	>5247	??	Posiblemente roca volcánica con diaclasas aisladas, Basamento rocoso.

Fuente: Agua y Agro (2015)

Ver plano en el anexo I; planta SEV (MN-05) y perfil estratigráfico SEV (MN-06)

4.1.6.2 Excavaciones a Cielo Abierto

De acuerdo a los trabajos realizados, que son detallados en el ítem de materiales y métodos, las excavaciones a cielo abierto se obtienen los siguientes resultados:

Se recuperaron muestras disturbadas de cada uno de los tipos de suelos encontrados durante las excavaciones, en cantidad suficiente o representativa, para realizar los ensayos de clasificación e identificación de suelos.

A. Calicatas

Se han excavado tres calicatas hasta una profundidad media de 1.7 metros cuyas, características litológicas se describen a continuación:

Cuadro 11: Resumen de las calicatas realizadas.

CODIGO	UBICACIÓN	CORDENADAS UTM (WGS – ‘84)		COTA DE TERRENO m.s.n.m.	PROF. (m.)
		ESTE	NORTE		
CA-01	Eje de Presa	549,208	8’468,130	4,150	1.80
CA-02	Eje de Presa	549,295	8’468,122	4,157	1.60
CA-03	Eje de Presa	549,334	8’468,093	4,152	1.60

- **Calicata C-01.**

Consiste en tres (03) estratos bien definidos, esta calicata está ubicada en el área de influencia del eje de presa proyectado.



Figura N° 23: Fotografía de la calicata 01.

0,00 - 0,50 m.: Material de cobertura, biodisturbado por raíces, color gris oscuro a negro, de compacidad media, con clastos aislados de roca ígnea y sub angulosos.

0,50 - 1,00m.: Arenas limosas de media a alta compacidad de color gris oscuro a negro, con clastos aislados de roca ígnea y subangulosos.

1,00 - 1,80m.: Arenas de grano fino con limos en mínima proporción, de compacidad media color beige.

- **Calicata C-02.**

Consiste en tres (03) estratos bien definidos, ubicada en el eje de presa proyectada.

0,00 - 0,30 m.: Material de cobertura, biodisturbado por raíces, color gris oscuro a negro, de compacidad media, con clastos aislados de roca ígnea y subangulosos.

0,30 - 0,80 m.: Arenas de grano fino, limos y arcillas en mayor proporción, de compacidad media, color gris.

0,80 - 1,60 m.: Arenas de grano fino con limos en menor proporción, de compacidad media, de color gris.

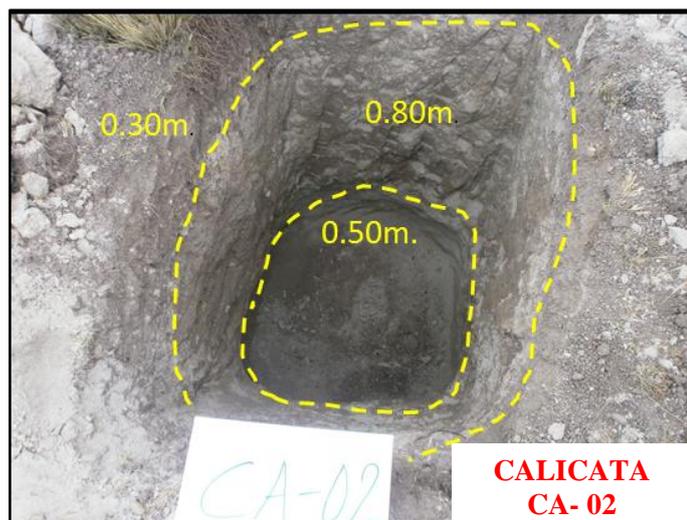


Figura N° 24: Fotografía de la calicata 02.

- **Calicata C-03**

Se registraron cinco (05) estratos bien definidos.

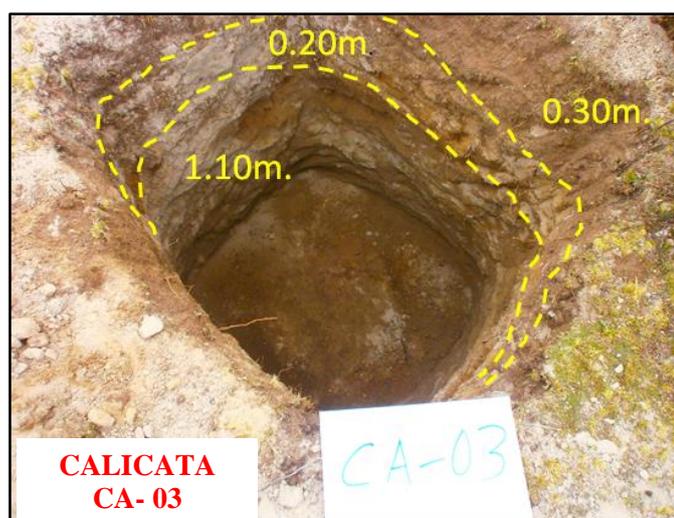


Figura N° 25: Fotografía de la calicata 03.

- **0,00 – 0.30 m.:** Material de cobertura biodisturbado por raíces, color gris oscuro, con clastos subangulosos aislados.
- **0.30 - 0.50 m.:** Limos, arcillas y arenas de grano fino en menor proporción, de compacidad media, color pardo amarillento.
- **0.50 - 1.00 m.:** Arenas de grano fino de compacidad regular, color beige.
- **1.00 - 1.10 m.:** Arenas bien gradadas de grano medio a grueso y presencia de gravillas.
- **1.10 - 1.60 m.:** Arenas de grano fino compacidad media, color beige.

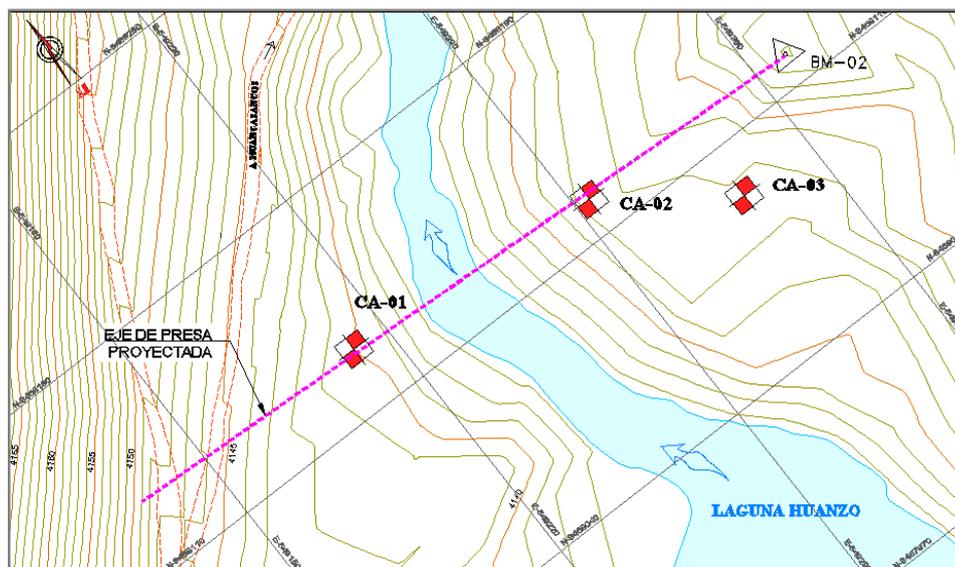


Figura N° 26: Ubicación de Calicatas.

Los registros de calicatas detallados se encuentra en el anexo II, calicatas.

4.1.6.3 Perforaciones Diamantinas

Se realizaron cinco (05) perforaciones diamantinas, ubicadas en el eje de la presa proyectada, estas perforaciones cuentan con recuperación de muestras, completando un total de 151.10 metros lineales; tal como se detalla en el cuadro 12.

Cuadro 12: Resumen de perforaciones diamantinas realizada.

CODIGO	UBICACIÓN	CORDENADAS UTM (WGS – '84)		COTA DE TERRENO m.s.n.m.	PROF. (m.)
		ESTE	NORTE		
P-01	Eje de Cerrada	549,371	8'468,055	4,145.00	30.10
P-02	Eje de Cerrada	549,272	8'468,091	4,138.00	30.05
P-03	Eje de Cerrada	549,194	8'468,149	4,143.00	30.30
P-04	Eje de Cerrada	549,328	8'468,115	4,144.00	30.30
P-05	Eje de Cerrada	549,226	8'468,164	4,140.00	30.35

Según el resultado de las perforaciones en el eje proyectado de la presa , se tiene una profundidad aproximada “conocida” de 40 m. de material morrénico (arenas bien gradadas, limos, lentejones de arcillas y clastos de rocas ígneas y sedimentarias), se tiene una cobertura de suelo conformado en conjunto de material biodisturbado por raíces y clastos de rocas subangulosas a subredondeadas de litología antes mencionada, la matriz de esta capa superficial es de arenas bien gradadas con contenido de limos, se registró una potencia aproximada de 1.50 m. (entre los 2 tipos de cobertura)

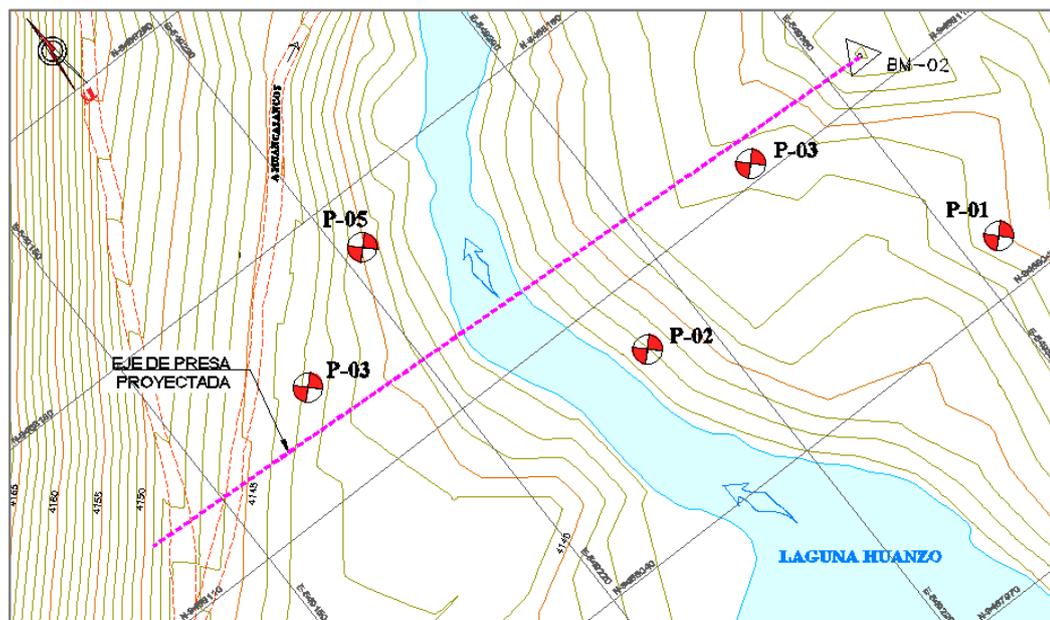


Figura N° 27: Ubicación de las perforaciones diamantinas.

Los registros de calicatas detallados se encuentra en el anexo II, perforaciones.

4.1.6.4 Ensayos Realizados Insitu

A. Ensayo de Permeabilidad Tipo Lefranc

De acuerdo a los trabajos de ensayos en campo, tal como se detalla en el ítem de materiales y métodos, tenemos los siguientes resultados.

Cuadro 13: Resumen de los ensayos de permeabilidad en los sondeos.

SONDAJE	N° DE ENSAYO	PROFUNDIDAD (m)	GRADO DE PERMEABILIDAD	TIPO DE ENSAYO
P – 01	01	3.20 – 5.20	3.20E-04 cm/s	Lefranc
	02	8.15 – 10.15	1.45E-04 cm/s	Lefranc
	03	13.20 – 15.20	2.02E-05 cm/s	Lefranc
	04	18.15 – 20.15	2.63E-05 cm/s	Lefranc
	05	23.30 – 25.30	4.28E-04 cm/s	Lefranc
	06	28.10 – 30.10	2.50E-04 cm/s	Lefranc
P – 02	01	2.95 – 4.95	2.62E-04 cm/s	Lefranc
	02	8.05 – 10.05	3.17E-05 cm/s	*Lefranc V.
	03	13.15 – 15.15	3.88E-03 cm/s	*Lefranc V.
	04	18.00 – 20.00	4.36E-05 cm/s	*Lefranc V.
	05	23.00 – 25.00	2.68E-05 m/s	*Lefranc V.
	06	28.05 – 30.05	1.79E-03 cm/s	*Lefranc V.
P – 03	01	3.25 – 5.25	1.16E-03 cm/s	Lefranc
	02	8.40 – 10.40	5.02E-04 cm/s	Lefranc
	03	13.35 – 15.35	6.26E-04 cm/s	Lefranc

SONDAJE	Nº DE ENSAYO	PROFUNDIDAD (m)	GRADO DE PERMEABILIDAD	TIPO DE ENSAYO
	04	18.00 – 20.00	4.67E-04 cm/s	Lefranc
	05	23.45 – 25.45	2.50E-04 cm/s	Lefranc
	06	28.30 – 30.30	1.96E-04 cm/s	Lefranc
P – 04	01	3.20 – 5.20	1.50E-04 cm/s	Lefranc
	02	8.10 – 10.10	4.53E-04 cm/s	Lefranc
	03	13.10 – 15.10	1.89E-04 cm/s	Lefranc
	04	17.95 – 19.95	1.83E-04 cm/s	Lefranc
	05	23.00 – 25.00	2.02E-04 cm/s	Lefranc
	06	28.40 – 30.40	1.77E-04 cm/s	Lefranc
P – 05	01	3.15 – 5.15	4.11E-04 cm/s	Lefranc
	02	7.95 – 9.95	1.94E-04 cm/s	Lefranc
	03	12.90 – 14.90	6.09E-04 cm/s	Lefranc
	04	17.90 – 19.90	2.85E-04 cm/s	Lefranc
	05	23.00 – 25.00	3.35E-05 cm/s	Lefranc
	06	28.35 – 30.35	3.73E-05 cm/s	Lefranc

Fuente: Agua y agro (2015)

*Lefranc V.= Lefranc Variable.



Figura N° 28: Ensayos de permeabilidad tipo Lefranc.

4.1.6.5 Ensayos de Laboratorio

Para determinar las propiedades físicas y mecánicas de las muestras extraídas de suelos se realizaron ensayos estándar.

Se realizaron ensayos de Granulometría, Triaxial y Permeabilidad. Todas las muestras para los ensayos mencionados antes se tomaron solo de la calicata (CA-03)

como representación de todo el terreno de fundación a lo largo de todo el eje de la presa.

A continuación se muestran los resultados de los ensayos de muestras que se realizaron en laboratorio de la Universidad Nacional de Ingeniería CISMID.

Cuadro 14: Resultado de los ensayos de laboratorio CISMID-UNI.

GRANULOMETRÍA						
UBICACIÓN	CODIGO	PRO F. (m)	SUC S	AASHTO	W (%)	DESCRIPCION
CUERPO DE PRESA	T-01	-	SM-GM	A-1b(0)	5.9	ARENA LIMOSA CON GRAVAS
CIMENTACION	CA-03	-	SM	A-2-4(0)	21.7	ARENA LIMOSA
PERMEABILIDAD						
CUERPO DE PRESA	T-01	K= 4.44 E-5 cm/s				
CIMENTACION	CA-03	K= 7.96 E-5 cm/s				
TRIAxIAL						
CODIGO		FRICCCION (°)	PESO ESPECÍFICO (kN/m3)		C (Kg/cm2)	
T-01		41.00	19.7		0.65	
T-01 (ESFUERZOS EFECTIVOS)		42.40	19.7		0.36	
CA-03		32.00	14.81		0.70	
CA-03 (ESFUERZOS EFECTIVOS)		33.70	14.81		0.34	

Fuente: Agua y Agro (2015).

Con los resultados obtenidos se han realizado los análisis de estabilidad de taludes, de infiltración

Los ensayos de laboratorio se adjuntan en los anexos III

4.1.6.6 Análisis de Estabilidad de Taludes

Para evaluar las condiciones de estabilidad de las zonas críticas en los procesos constructivos y después de ello, se ha realizado un análisis de estabilidad de taludes en condiciones en las cuales la presa se encontrará y trabajará durante toda su vida útil.

Para dicho análisis se debe tener en cuenta una serie de factores que influyen en la estabilidad de un talud. Los factores que se toman en cuenta son: geometría del talud, parámetros geológicos-geotécnicos, cargas dinámicas por acción de los sismos, condiciones de flujo de agua, etc. No todos estos factores se pueden cuantificar en un modelo matemático; a pesar de estas limitaciones, determinar el factor de seguridad

asumiendo superficies probables de falla, permite tener una idea del comportamiento del talud. Las causas de los deslizamientos pueden ser externas o internas, el aumento en la altura del talud, la colocación de cualquier tipo de sobrecarga en la corona o la ocurrencia de sismos, en el primer caso, puede ocasionar la inestabilidad de este provocando deslizamientos; por otro lado las causas internas están estrechamente ligadas a una disminución de la resistencia al esfuerzo cortante del suelo constitutivo, tales como el aumento de presión de poros o la disipación de la cohesión.

El Factor de Seguridad (FS) aceptable para dar conformidad a la estabilidad de un talud debe ser $FS > 1.0$, siendo este un valor muy conservador.

El coeficiente sísmico que se utilizará será $2/3$ de $0.32g$, siendo este el valor más crítico, el valor fue obtenido del mapa de Isoaceleraciones de la UNI-CISMID.

4.2 CARACTERIZACIÓN DE LA PRESA

4.2.1 Características de la Presa

Según los requerimientos hídricos de la zona a irrigar y la capacidad de embalse a generar 13 MMC , se proyecta en la laguna-Huanzo, una presa de tierra con material suelto compactado por capas, y se estima una altura de 12 metros, estando el nivel máximo de embalse proyectado en la cota 4147 m.s.n.m.

Para esta presa se contará con un talud de inclinación $1V / 2H$ aguas arriba y $1V / 1.8H$ aguas abajo, en un primer momento se retirará la cobertura de suelo de 1.00 metro por debajo del nivel actual

4.2.2 Estabilidad de Talud en Presa

El Slope/w es un programa de cálculo de estabilidad de taludes muy usado en el ámbito de la geotecnia, el cual se basa en la simulación de una superficie de posible falla, este programa es comercializado por la empresa Geo-slope International Ltd. De Calgary, Alberta.

El análisis se ha realizado con la geometría planteada; una presa de material suelto de 12 metros de altura, de taludes $1V / 2H$ para aguas arriba y $1V / 1.8H$ para aguas abajo, además de 4 materiales, el primero denominado cimentación, que es el correspondiente a los depósitos morrénicos sin tratamiento alguno es decir, en estado natural. El siguiente se trata de un material de filtro, utilizado para reprimir posibles

niveles de agua generados por filtraciones no previstas y por último, el material denominado cuerpo de presa.

El coeficiente sísmico para presas a utilizar según Kramer-1996 (quien considera que la aceleración pseudoestática en la simulaciones debería ser mucho menor que la máxima aceleración), por tanto será 2/3 del parámetro de la zona, es decir 0.22g.

A continuación se presenta el cuadro resumen (cuadro 15) de los parámetros geotécnicos utilizados para el análisis de estabilidad de taludes con el programa de cálculo Geoestudio 2012 – Slope/w.

Cuadro 15: Parámetros geotécnicos utilizados en el análisis.

DESCRIPCION	PESO UNITARIO (kN/ m ³)	COHESIÓN (Kg/ cm ²)	FRICCIÓN (°)
Cuerpo de presa	19.32	0.65	41.00
Cuerpo de presa condiciones saturadas	19.32	0.36	42.4
Cimentación condiciones saturadas	14.81	0.34	33.70
Filtro	14.81	0.00	33.00

Fuente: Agua y Agro (2015).

Para tener mas referencia se opto por hacer una comparación con otra fuente, a continuacion se describe en la tabla 4.

Tabla 4: Parámetros utilizados en el análisis en otra fuente.

DESCRIPCION	PESO UNITARIO (TON/M ³)	COHESIÓN (KG/CM ²)	FRICCIÓN (°)
Cuerpo de presa	1.90	0.30	33
Cimentación	2.05	0.25	30
Filtro	2.20	0.00	40

Fuente: Arellano (2014).

El coeficiente de seguridad en Perú se adopta de normas como el USA Army Corps of Engineers y las de España, que fijan los siguientes mínimos admisibles para las condiciones señaladas en el cuadro siguiente:

Tabla 5: Factores de seguridad recomendados.

CONDICIÓN	SIN EFECTO SÍSMICO		CON EFECTO SÍSMICO	
	US ARMY	ESPAÑA	US ARMY	ESPAÑA
Fin de construcción	1.30	1.20	1.00	1.00
Presa llena	1.50	1.40	1.00	1.30
Desembalse rápido	1.00	1.30	-	1.00

Fuente: Agua y Agro (2015).

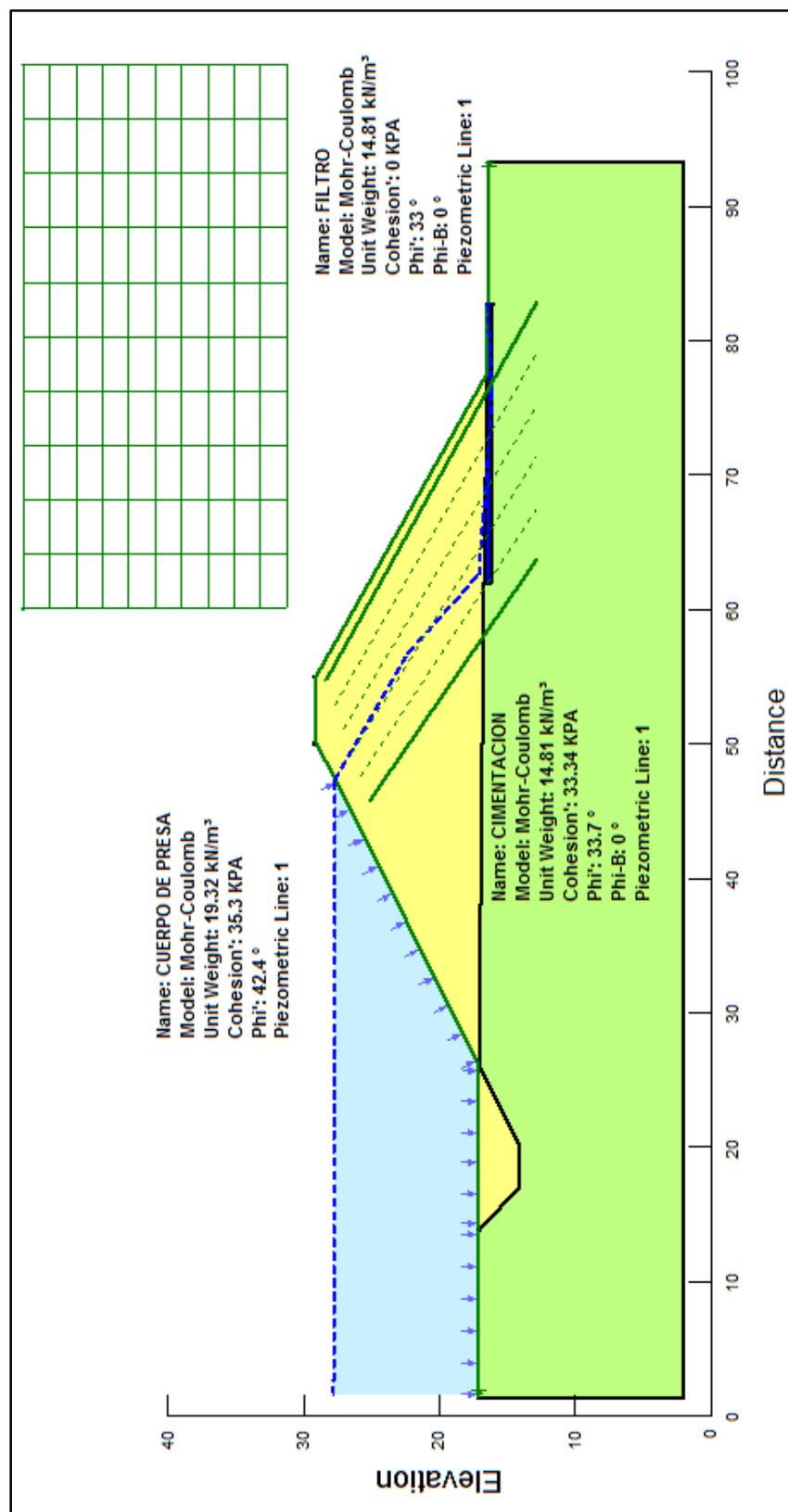


Figura N° 29: Diagrama de los componentes del análisis de estabilidad de taludes con embalsamiento.

La figura N° 29, muestra el esquema utilizado para el análisis de estabilidad de taludes, en ella se aprecia la malla de superficie de deslizamiento 20x20, la cual interactúa directamente con el radio de superficies de deslizamiento (líneas verdes), en este caso el sistema simulará la zona de falla con dirección de movimiento izquierda – derecha, que corresponde al talud-cuerpo de presa aguas abajo, este análisis se realizó con una inclinación $H / V = 1.8 / 1$, y como se indica en la cuadro 15. se utilizó los parámetros geotécnicos obtenidos de los ensayos de laboratorio en condiciones saturadas, además de utilizar un coeficiente sísmico de 0.22 g.

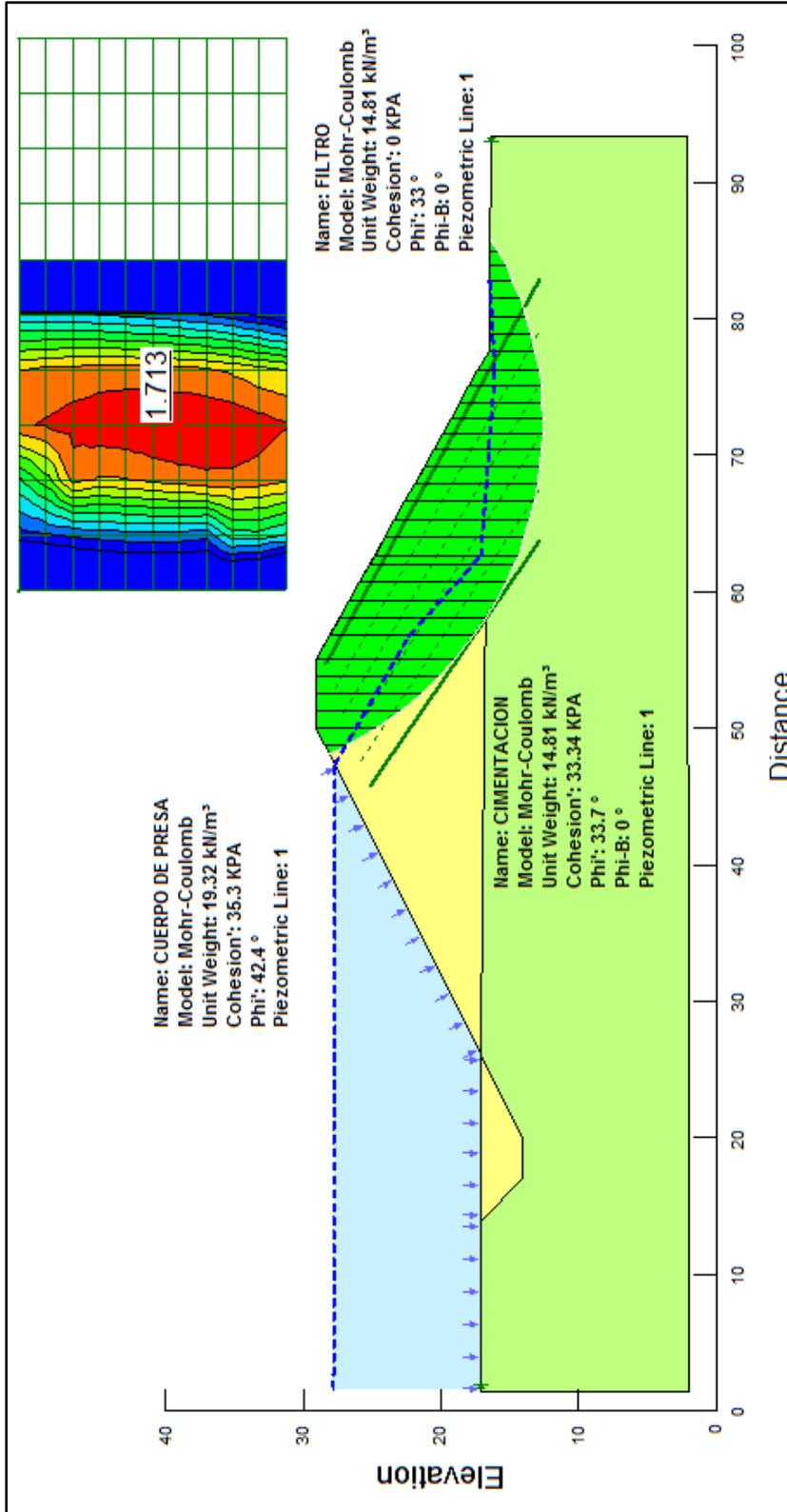


Figura N° 30: Análisis de estabilidad pseudoestático con embalsamiento, talud aguas abajo.

La figura N° 30, muestra el resultado final del análisis, el valor de color roja presenta el factor de seguridad obtenidos en la simulación pseudoestática.

El FS= 1.713 que detalla la imagen corresponde al área de falla circular (color verde), más crítica, es decir el valor más conservador.

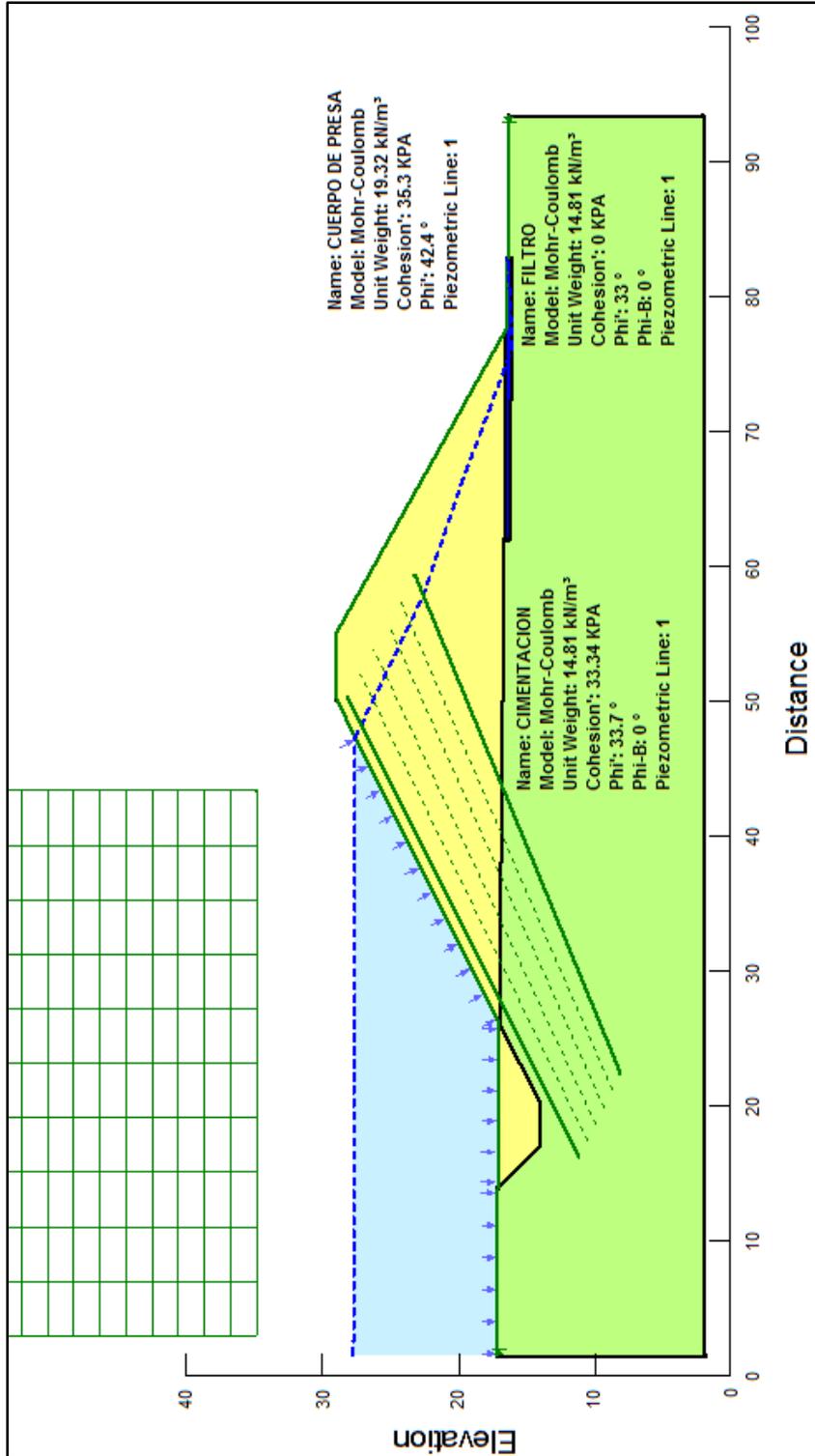


Figura N° 31: Diagrama de los componentes del análisis de estabilidad de taludes con embalsamiento.

La figura N° 31, muestra el esquema utilizado para el análisis de estabilidad de talud, en ella se aprecia la malla de superficie de deslizamiento 20x20, la cual interactúa directamente con el radio de superficies de deslizamiento (líneas verdes), en este caso el sistema simulará la zona de falla con dirección de movimiento derecha – izquierda, que corresponde al talud-cuerpo de presa aguas arriba, este análisis se realizó con una inclinación $H / V = 2 / 1$. Se utilizó los parámetros geotécnicos obtenidos de los ensayos de laboratorio en condiciones saturadas presiones efectivas, como en el análisis anterior al sistema se le castiga con un coeficiente de aceleración de 0.22 g.

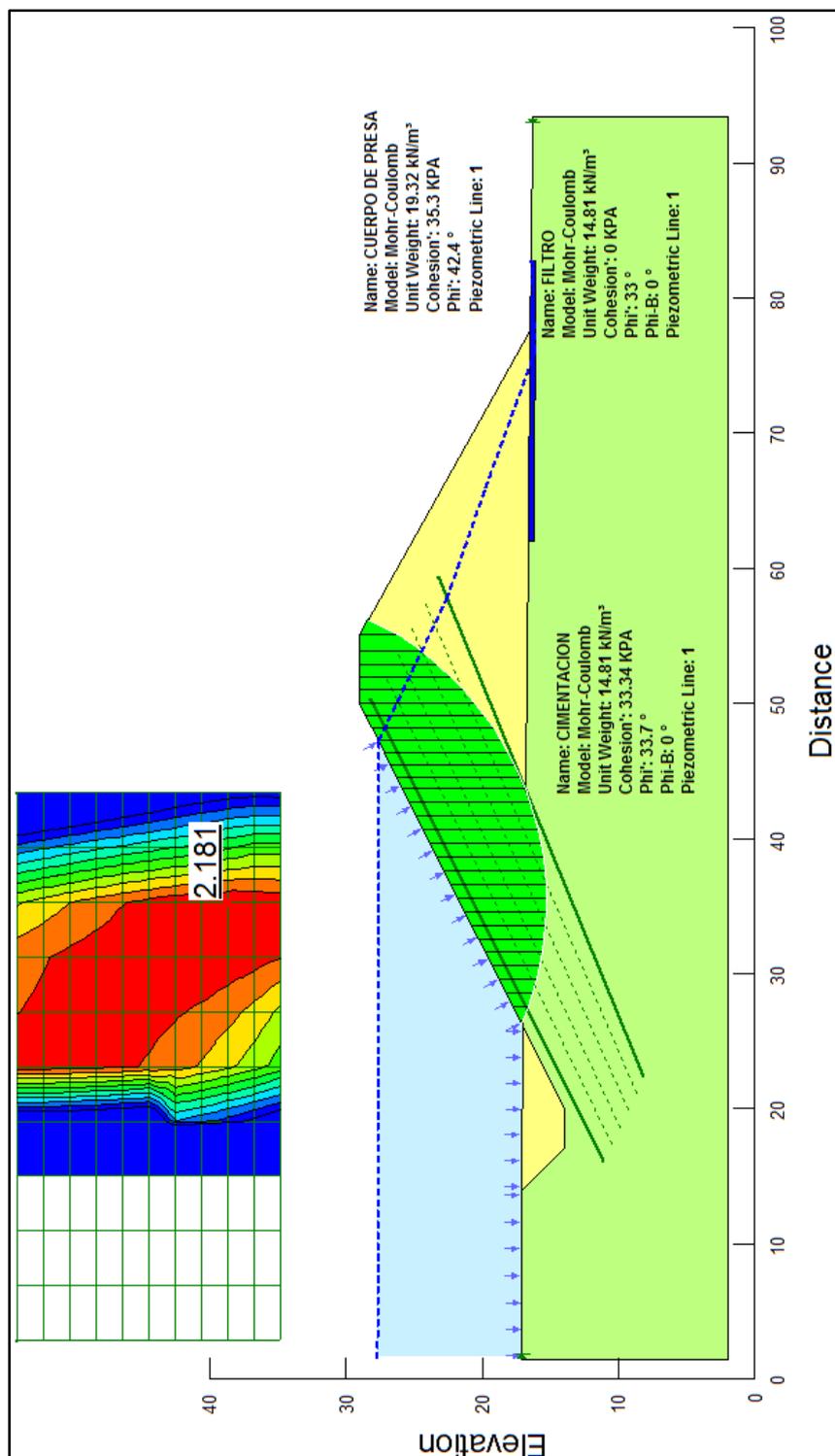


Figura N° 32: Análisis de estabilidad pseudoestático con embalsamiento, talud aguas arriba.

La figura N° 32, muestra el resultado final del análisis, el valor de color rojo presenta el factor de seguridad obtenido en la simulación pseudoestática.

El FS= 2.181 que detalla la imagen corresponde al área de falla circular (color verde), más crítica, es decir el valor más conservador.

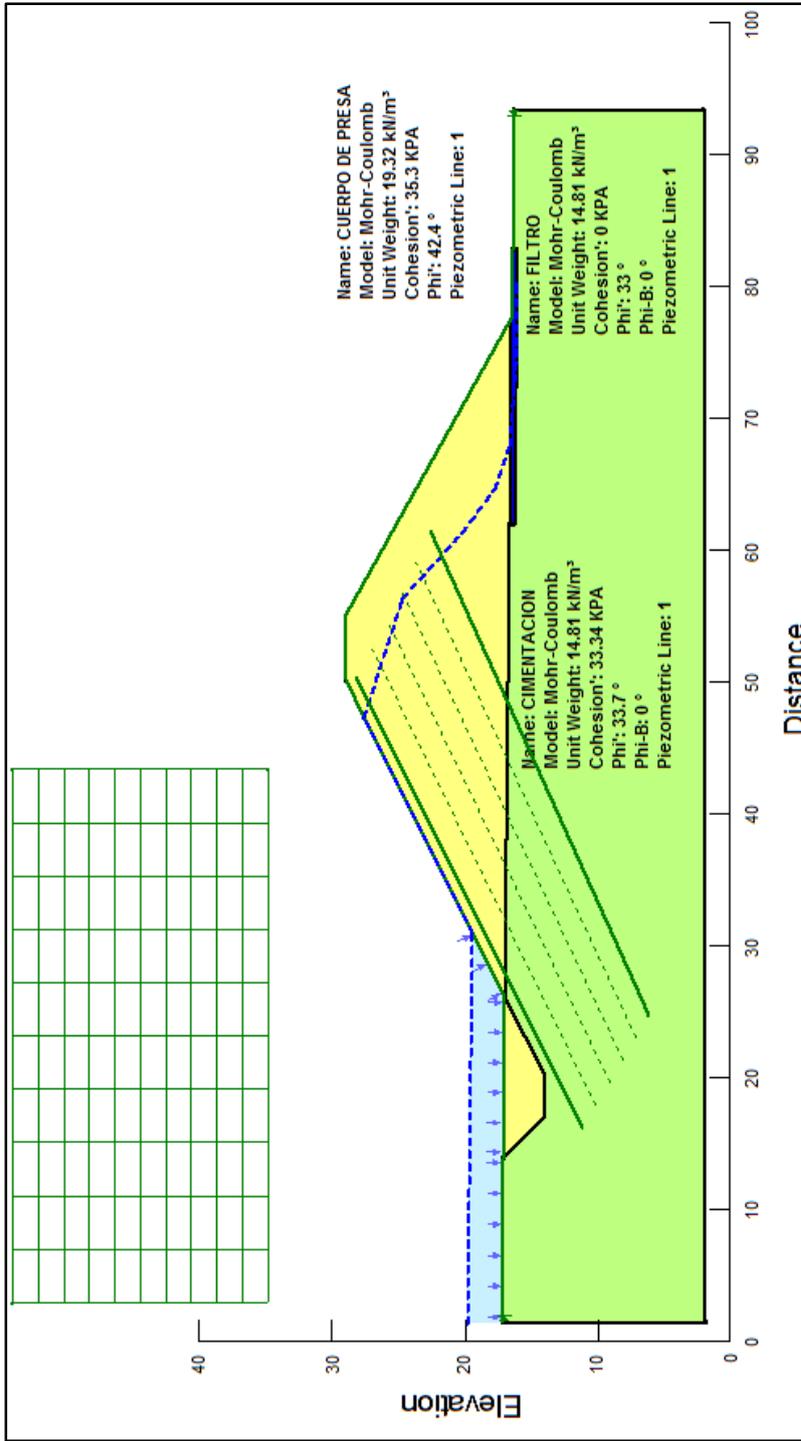


Figura N° 33: Diagrama de los componentes del análisis de estabilidad de taludes con desembalse rápido.

La figura N° 33, muestra el esquema utilizado para el análisis de estabilidad de taludes, en ella se aprecia la malla de superficie de deslizamiento 20x20, la cual interactúa directamente con el radio de superficies de deslizamiento (líneas verdes), en este caso el sistema simulará la zona de falla con dirección de movimiento derecha – izquierda, que corresponde al talud-cuerpo de presa aguas arriba, este análisis se realizó con una inclinación $H / V = 2 / 1$, este análisis simula el comportamiento del talud ante un desembalse rápido. como en los análisis anteriores al sistema se le castiga con un coeficiente de aceleración de 0.22 g.

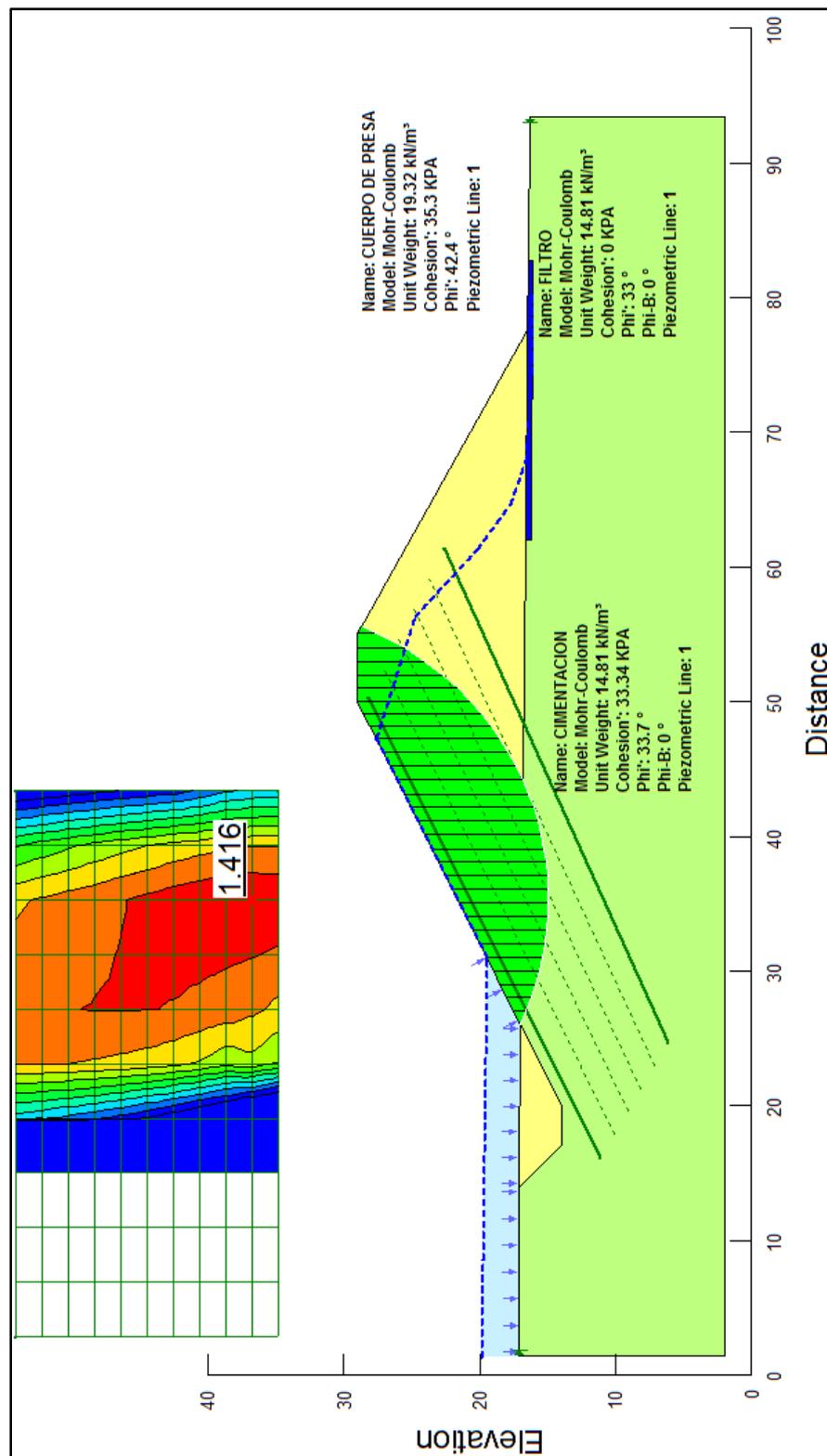


Figura N° 34: Análisis de estabilidad pseudoestático con desembalsamiento rápido, talud aguas arriba.

La figura N° 34, muestra el resultado final del análisis, el valor de color rojo presenta el factor de seguridad obtenido en la simulación pseudoestática.

El FS= 1.416 que detalla en la imagen corresponde al area de falla circular (color verde), para una simulacion de desembalse rápido.

Los factores de seguridad obtenidos con el programa Slope de GEOESTUDIO 2012, se resumen en el cuadro 16.

Cuadro 16: Resultados del análisis de estabilidad.

LAGUNA	ZONA	GEOMETRÍA A	FACTOR DE SEGURIDAD
			PSEUDO-ESTÁTICO 0.22g
Huanzo	Aguas arriba	1V / 2H	2.181
	Desembalse Rápido	1V / 2H	1.416
	Aguas abajo	1V / 1.8H	1.713

Notamos que el FS obtenido es de 2.181 y 1.713 para el talud aguas arriba y el talud aguas abajo respectivamente, este resultado contrastado con los factores recomendados (Tabla 5.) deja por sentado la estabilidad del cuerpo de presa, por tanto las inclinaciones estimadas serán las definitivas para el diseño. La superficie de falla es circular y la influencia del agua tiene poca incidencia en el resultado.

Para tener mayor referencia hacemos una comparación con otra fuente, a continuación en la siguiente tabla 6:

Tabla 6: Resultados del análisis de estabilidad de otra fuente.

ZONA	GEOMETRÍA A	FACTOR DE SEGURIDAD (FS)		
		ESTÁTICO	PSEUDO-ESTÁTICO	CON GEOSINTÉTICOS
Aguas arriba	1V / 2H	1.465	1.030	1.109
Aguas abajo	1V / 2.5H	1.819	1.093	1.220

Fuente: Arellano (2014)

4.2.3 Capacidad Portante del Suelo

La capacidad portante del suelo de fundación en este tipo de estructuras cuya base es “B” se estima es alta. Para ello se toma en cuenta la ecuación desarrollada por Terzaghi - Buisman, (Rodríguez, 2012). Para este caso se considerara que la cimentación corresponde a una zapata corrida, por las características de la propia presa.

$$Q_{ult} = C.N_c.Sc.dc + \gamma.Df.Nq.Sq.dq + \frac{1}{2}.B.\gamma.N\gamma.S\gamma.dy \dots\dots\dots (1)$$

$$Nc = \frac{2Ppc}{BC} + tg\Phi \dots\dots\dots (2)$$

$$Nq = \frac{2Ppq}{B\gamma Df} \dots\dots\dots (3)$$

$$N\gamma = \frac{4Pp}{B^2 \gamma} \dots\dots\dots (4)$$

$$dc = 1 + 0.2 \frac{Df}{B} \dots\dots\dots (5)$$

$$Qadm = \frac{Qult}{F} \dots\dots\dots (6)$$

Donde:

C; Cohesión

γ ; Peso específico del suelo de fundación.

Df; Profundidad a la cual se ejecutara la cimentación

B; Ancho de cimentación, es igual al ancho de coronación.

Nc,Nq,N γ ; Factores de capacidad de carga, es en función de Φ , ver cuadro 17.

Sc,Sq,S γ ; Factores de corrección por la forma de cimentación, para una cimentación corrida todos los valores son igual a la unidad, (Rodríguez, 2012)

dc,dq,d γ ; Factores de corrección, los valores **dq** y **d γ** son igual a la unidad, (Rodríguez, 2012).

F: factor de seguridad.

Pp: Empuje pasivo actuante en la superficie.

Ppc, Ppq: Descomposición de la fuerza Pp.

Cuadro 17: Valores utilizados para la capacidad portante

DATOS UTILIZADOS							
Φ (°)	C (kg/cm ²)	γ (KN/m ³)	Df (m.)	B (m.)	Sc,Sq, S γ	Dq, d γ	F
33.7	0.34	14.81	1	5	1	1	3

La capacidad portante se calcula en el centro de la presa en planta por ser el más crítico, por consiguiente, como base se tomará una distancia igual a la corona de la presa, una profundidad de cimentación de 1m. y el factor de seguridad más crítico (F=3).

Reemplazando las ecuaciones (2), (3), (4) y (5) en (1), reemplazamos los valores y resolvemos la ecuación (1), obtenemos:

$$Q_{ult} = 33.91 \text{ kg/cm}^2$$

Reemplazamos en la ecuación (3)

$$Q_{adm} = 11.30 \text{ kg/cm}^2$$

4.2.4 Análisis de Infiltración

En la zona del eje de la presa, a través de los resultados de exploraciones subterráneas tales como Sondeo eléctrico vertical (SEV), sondeos diamantinos calicatas y ensayos de permeabilidad, se determinó un tipo de suelo granular (arenoso) de composición ígnea, con fragmentos de roca andesítica de hasta 5 cm. de diámetro; a este material se le adjudica la acción directa de los glaciares. El ensayo de permeabilidad tipo Lefranc, cataloga a este suelo como permeable, y por tanto propenso a las filtraciones sucedidas por subpresiones del embalsamiento.

Todo esto conlleva a realizar un análisis de infiltraciones en el subsuelo de cimentación.

4.2.4.1 Parámetros Geotécnicos del Suelo de Cimentación

Según los estudios realizados en la zona del eje de presa, se ha podido determinar los parámetros geotécnicos de los materiales constituyentes del suelo de cimentación, a continuación se presenta un resumen en el cuadro 18.

Cuadro 18: Parámetros geotécnicos del suelo de cimentación.

ESPESOR (m) Y TIPO DE SUELO		PARÁMETROS GEOTÉCNICOS		REFRACCIÓN SÍSMICA VP (m/s)	PERMEABILIDAD (cm/s)
		C (Kg/cm ²)	Φ°		
0.00- 5.00	Cobertura	0.34	33.7	300 – 1,000	3.20E-04 cm/s
5.00- 15.00	Morrenas			1,000 – 1,500	2.02E-05 cm/s
15.00- 30.00	Morrenas Compactas			1,500 – 2,000	2.50E-04 cm/s
PERMEABILIDAD EN LABORATORIO		-			7.96E-05 cm/s

Fuente: Agua y Agro (2015).

4.2.4.2 Calculo de Infiltración en Presa

Para el análisis de infiltración se utilizó el programa de cómputo Seep/w de la empresa Geo-Slope International Ltd. de Calgary, Alberta.

Este es un programa que usa el método de elementos finitos para modelar el movimiento y la distribución de la presión de poros dentro de materiales como suelo y roca.

Cuadro 19: Materiales empleados en el análisis.

MATERIAL	PERMEABILIDAD
CUERPO DE PRESA	4.44E-05 cm/s
CIMENTACIÓN	7.96E-05 cm/s
GEOMEMBRANA	1E-13 cm/s
FILTRO	10.00 cm/s
INYECCIONES	1.0E-10 cm/s

Fuente: Agua y Agro (2015).

Esta simulación se realizará en 3 etapas, una primera para verificar las infiltraciones hacia el cuerpo de la presa, ya que esta no contará con protección en la pantalla del talud aguas arriba, tampoco en el suelo de cimentación; seguidamente se realizará la simulación de infiltración hacia el cuerpo de la presa, pero esta vez se colocará un geosintético en la totalidad en la pantalla del talud aguas arriba, finalmente se realizará el análisis de infiltración contando con una pequeña cortina de inyección de cemento con una profundidad de 5.00 metros.

Se coloca un filtro drenante en la parte de la base del talud aguas abajo, la longitud del filtro es de 2/3 de la longitud horizontal del talud aguas abajo.

Siendo así, se tiene que la longitud horizontal del talud aguas abajo es 21.60 m., entonces, la longitud del filtro será 14.40, se utilizará una longitud total de filtro igual a 15 m. a continuación se presentará diferentes etapas del modelamiento, el cual simulará las filtraciones hacia el suelo de cimentación, así como también el efecto de la impermeabilización recomendada para esta presa en función de los parámetros geotécnicos del suelo.

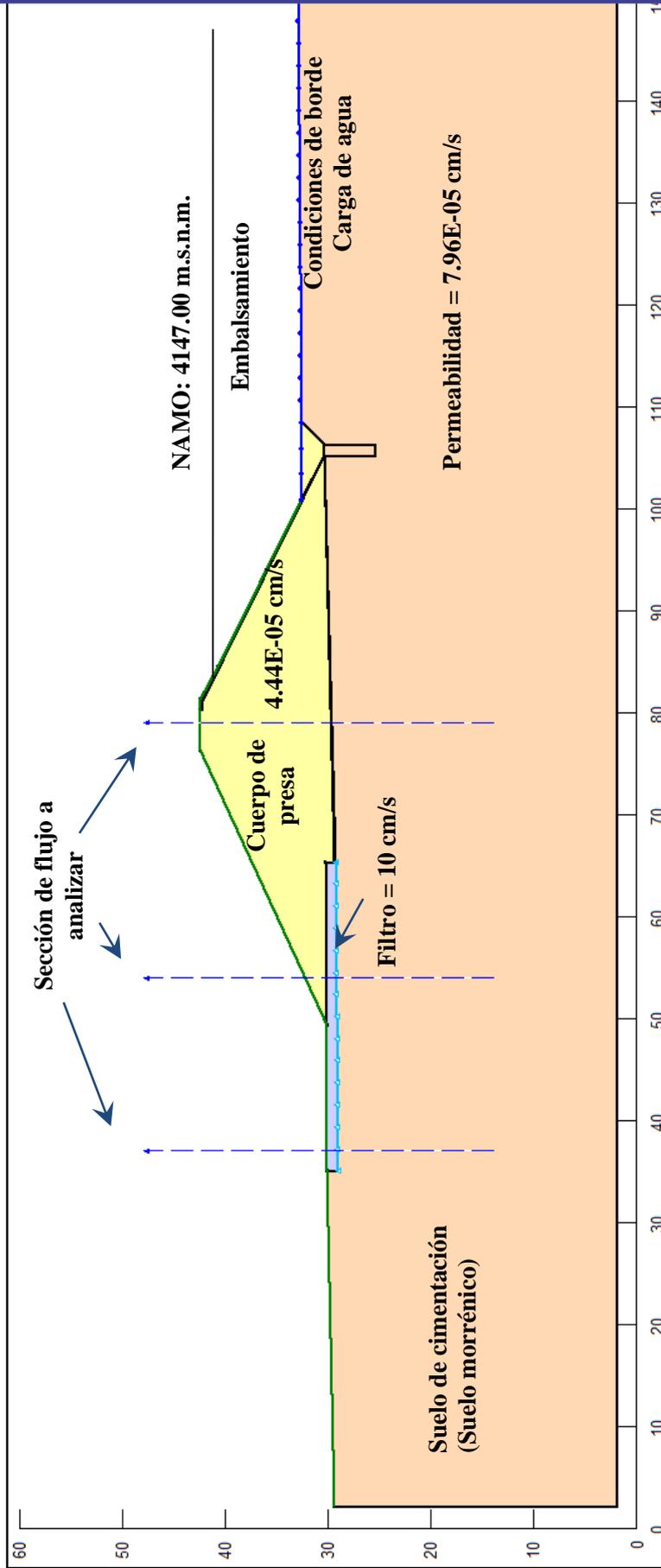


Figura N° 35: Análisis de infiltración sin protección de talud ni cimentación.

La figura N° 35, detalla los parámetros geotécnicos que se utilizarán en el análisis, en esta primera parte se realizará dicho análisis en estado natural del suelo (sin impermeabilizar), el material de filtro es muy permeable. Se muestra también las secciones de flujo, que es el punto que muestra el gasto de agua en $m^3/hora$.

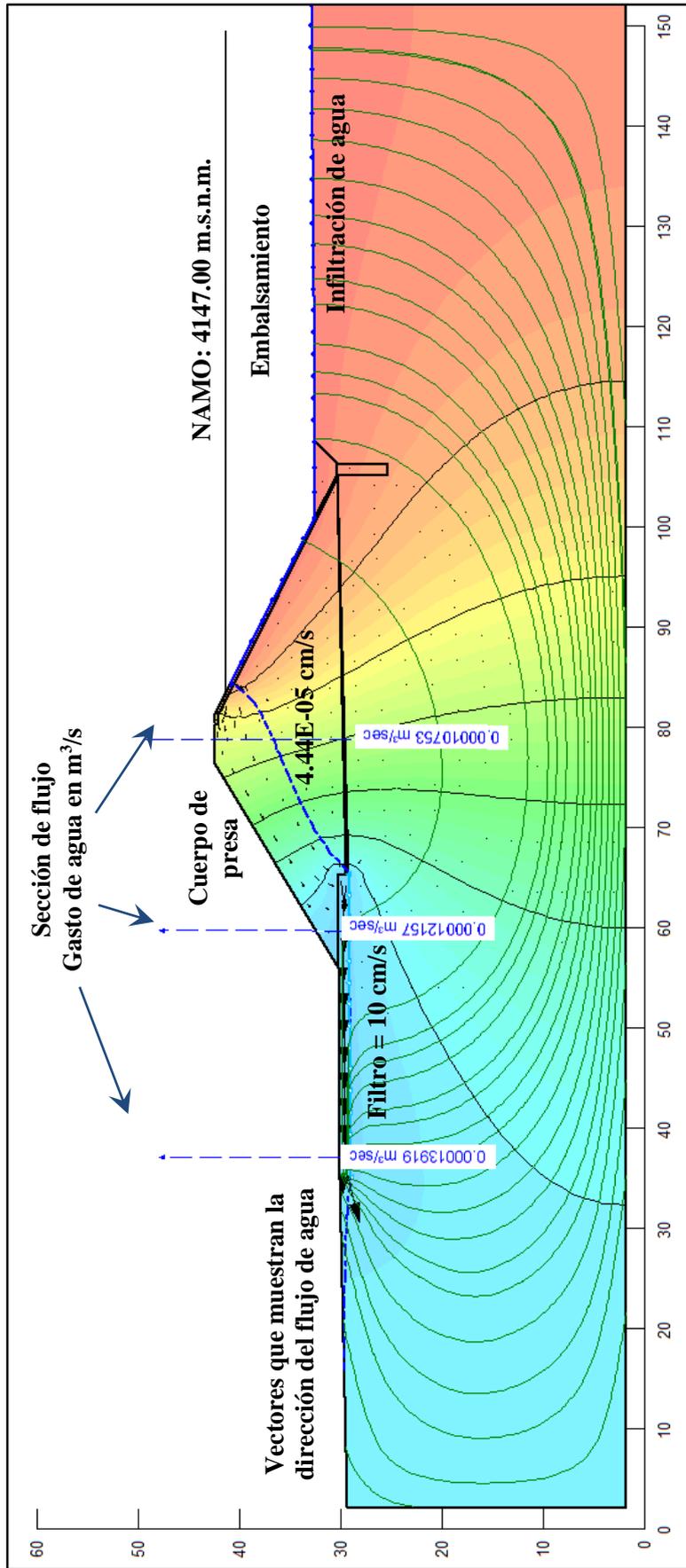


Figura N° 36: Análisis de infiltración sin protección de talud ni cimentación – Resultados.

La figura N°36, muestra lo realizado después del análisis, observamos que las líneas de flujo se dirigen al filtro permeable, sin embargo, el cuerpo de presa al no estar protegido presenta filtraciones importantes, pudiendo provocar la falla de la presa.

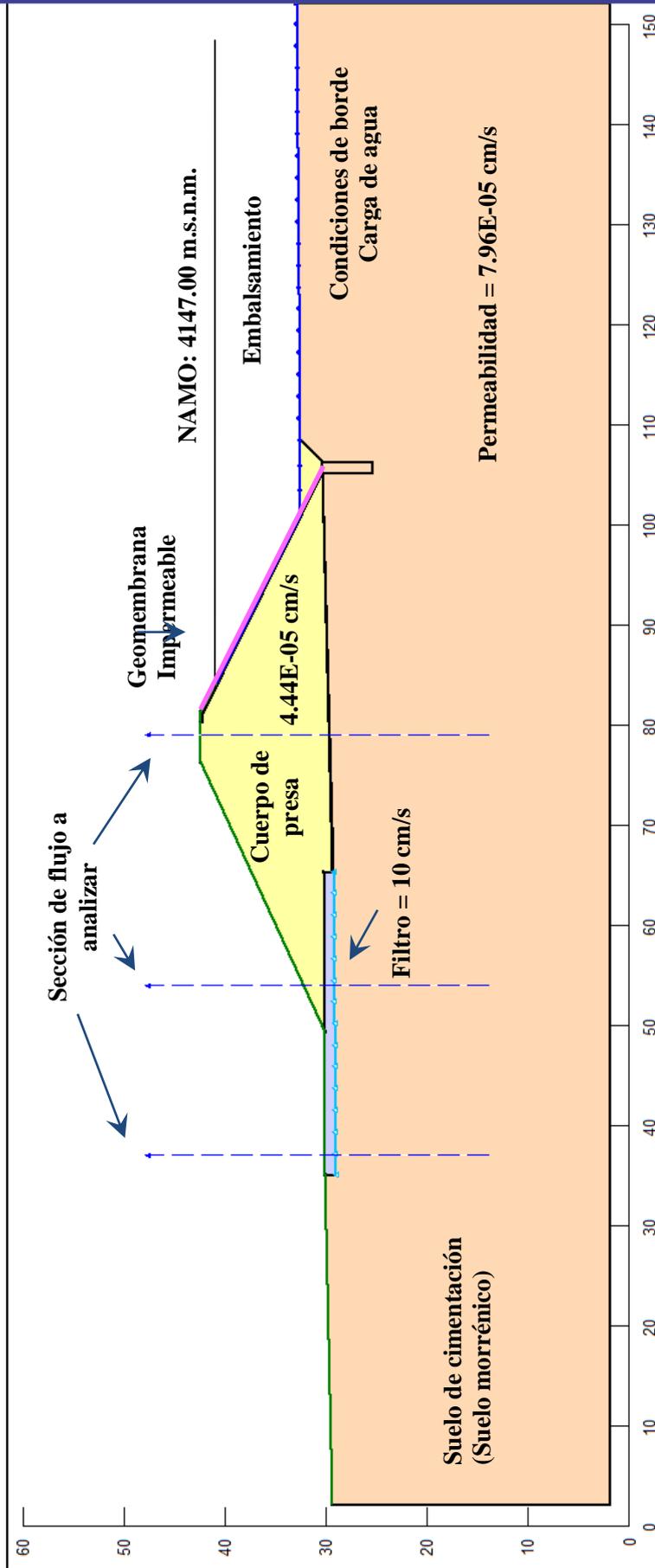


Figura N° 37: Análisis de infiltración con Geo membrana en la pantalla.

La figura N° 37, muestra los parámetros geotécnicos que se utilizarán en el análisis, se ha protegido el talud agua arriba con un geotextil (geomembrana), también las secciones de flujo, que es el punto que muestra el gasto de agua en $m^3/hora$.

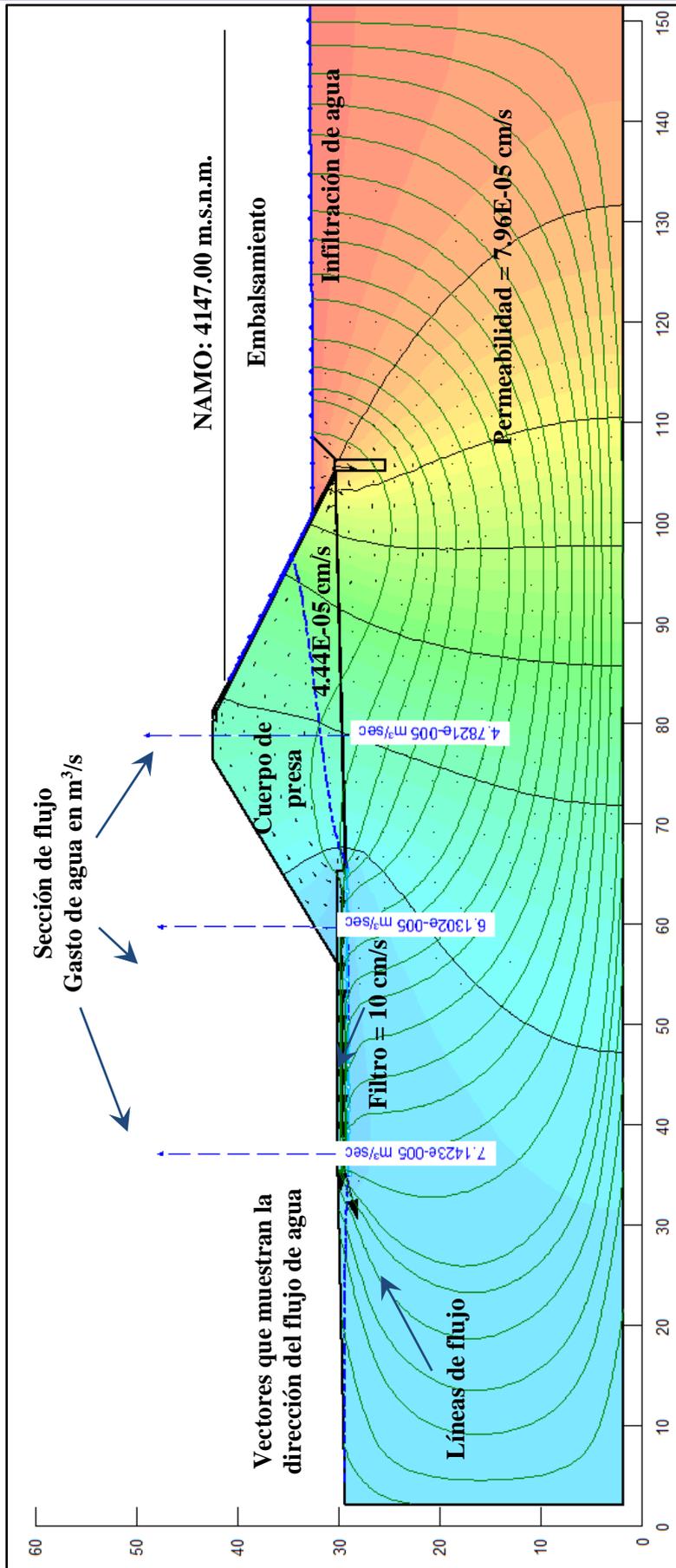


Figura N° 38: Análisis de infiltración con Geomembrana en el talud – Resultados.

La figura N° 38, muestra la geomembrana protegiendo al talud aguas arriba, la infiltración hacia el cuerpo de la presa se neutraliza (la línea punteada de color azul representa un nivel máximo de saturación provocado por un evento extraordinario, se muestra solo para motivos informativos)

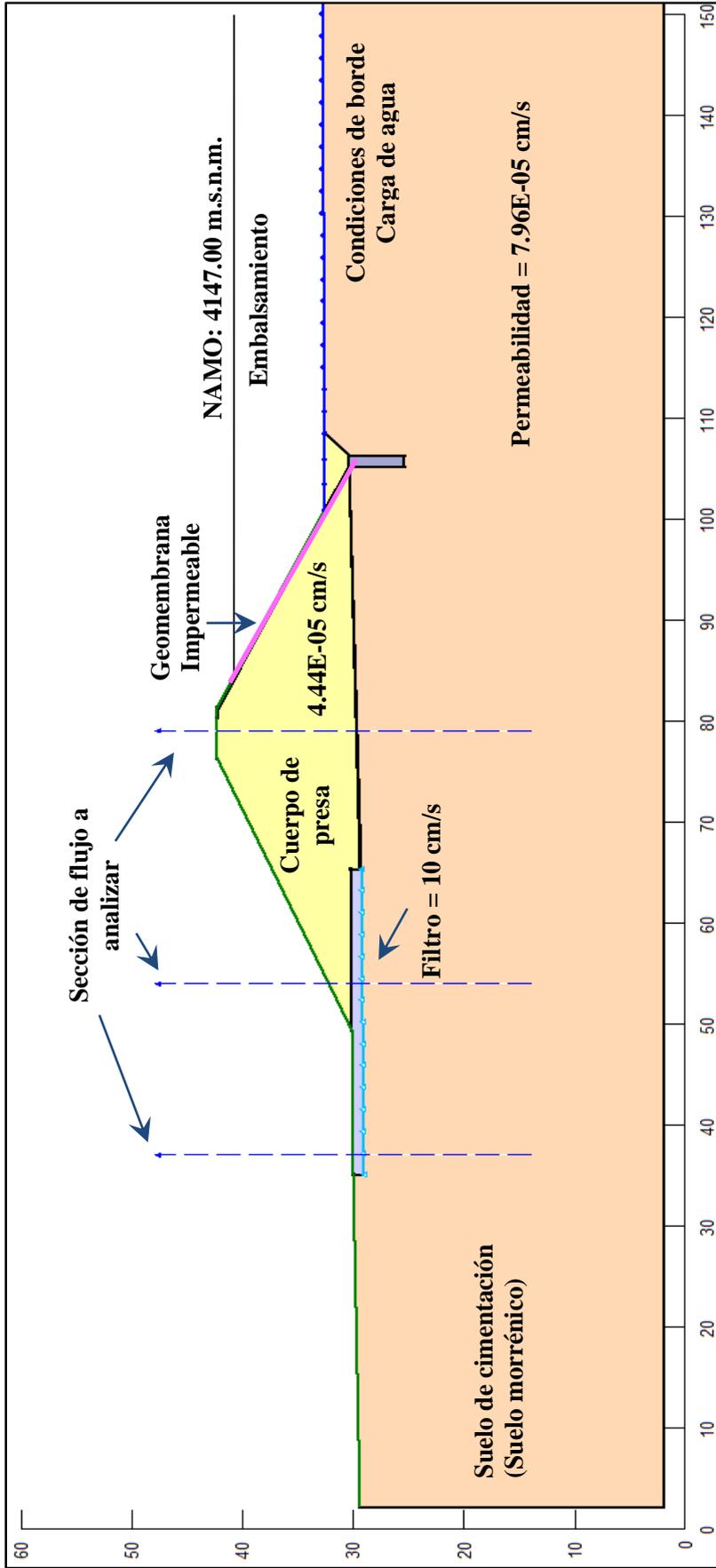


Figura N° 39: Análisis de infiltración con Geomembrana en el talud e inyecciones de cemento.

La figura N° 39, muestran los parámetros geotécnicos utilizados en el análisis, se protege al talud agua arriba con un geotextil (geomembrana), y conformado una cortina impermeable de inyecciones de cemento a 5 metros de profundidad. Se muestra también las secciones de flujo que es el punto que muestra el gasto de agua en m^3/hora .

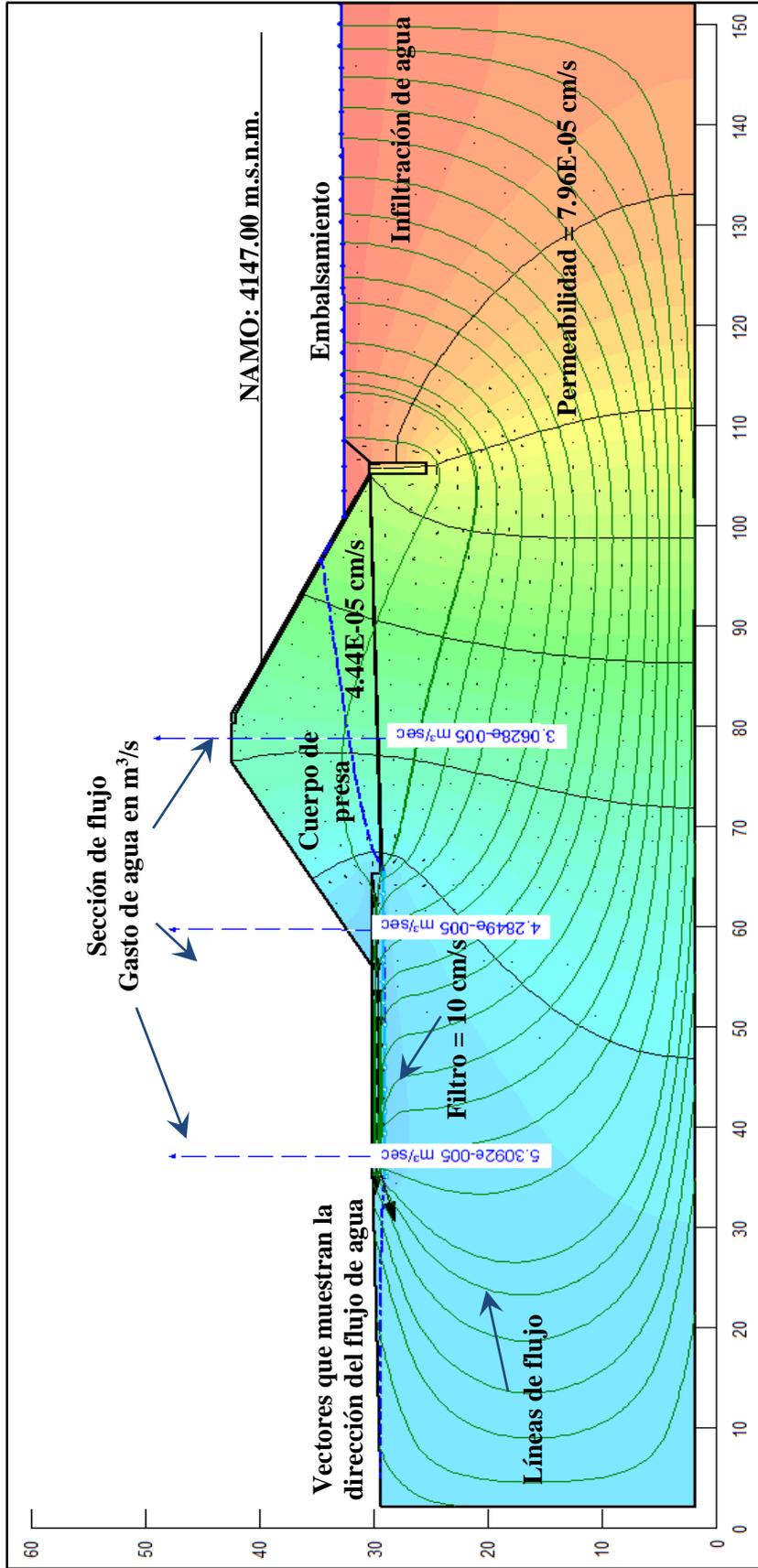


Figura N° 40: Análisis de infiltración con Geomembrana en el talud e inyecciones de cemento – Resultados.

La figura N°40, muestra la geomembrana protegiendo al talud aguas arriba, la infiltración hacia el cuerpo de la presa desaparece (la línea punteada de color azul representa un nivel máximo de saturación provocado por un evento extraordinario, se muestra solo para motivos informativos), las inyecciones de cemento de 5 m. de profundidad actúan como una cortina impermeable haciendo que el recorrido de las partículas de agua sea más largo disminuyendo el gasto de energía a través de la sección de cierre de la presa.

Después de los análisis realizados en las 3 diferentes etapas se tiene finalmente los gastos de agua que determina la viabilidad del proyecto, para esto se presenta en el cuadro 20.

Cuadro 20: Resultados del análisis de infiltración.

ETAPAS DEL ANÁLISIS	GASTO DE AGUA M ³ /Hora	
	SECCIÓN DE CIERRE	PIE DE TALUD
SIN GEOMEMBRANA	0.38	0.43
CON GEOMEMBRANA	0.17	0.23
CON INYECCIONES	0.11	0.15

Como se aprecia en los resultados, el gasto de agua por filtraciones en la sección de cierre de la presa para la etapa del análisis final (con inyecciones), es de 0.11 m³/hora, luego, acogiéndonos al texto extraído del libro LAS IRRIGACIONES (Francisco Coronado del águila - 2014): “la filtración de agua a través del cuerpo de la presa debe minimizarse a fin de no disminuir el volumen útil del embalse, no siendo admisible filtraciones superiores a “0.10 m³/hr-m²” de la sección de cierre de la presa.

Según este texto las filtraciones producidas en nuestro análisis se acemejan dichas condiciones, catalogándolas como aceptables.

4.2.5 Sistema de Impermeabilización

Atendiendo a las demandas producidas por las filtraciones que se generarán en la presa-Huanzo, se plantea un sistema de impermeabilización acorde con lo que se ha modelado con el programa Seep/w.

Según lo planteado, se recomienda una pantalla de impermeabilización compuesto de inyecciones de cemento. Este contempla la consolidación y la optimización de los terrenos naturales a través de inyecciones de productos químicos, habitualmente se realizan con lechadas de cemento mediante presión en zonas de menor resistencia, ubicados a lo largo de los taladros de tratamiento.

Puesto que el objetivo fundamental es lograr la impermeabilización debajo de la presa, se impermeabilizará una profundidad 5 m. Las permeabilidades en este estrato (morrenas) alcanza un valor cercano a los 10-5 cm/s. es decir son materiales que pueden ser impermeabilizados con el empleo del cemento comúnmente empleado para la construcción convencional (Portland tipo MS) pero además es recomendable adicionar

arcillas (bentonita). Para hacer efectivo este tratamiento el tipo de cemento deberá ser mucho más molido, lo que facilitara el viaje de este a través del suelo morrénico.

4.2.5.1 Inyecciones con Lechada de Cemento

El tratamiento de un suelo de cimentación mediante inyecciones se refiere a la serie de actividades que se requieren realizar para mitigar las filtraciones previstas en el área en donde se ubicara la presa. Esas actividades dependen de las condiciones geológicas del suelo.

El objetivo principal de un tratamiento del suelo de cimentación es tratar de lograr una zona impermeable, con el objeto de poder garantizar la seguridad y funcionalidad de la obra. Las inyecciones se realizan una vez construido el plinto o la base a lo largo del eje de la presa.

Mediante estudios de prospección geofísica realizados en la zona de estudio se ha llegado a estimar la permeabilidad de los suelos de manera referencial, en la tabla 8, se aprecia la capacidad de inyección respecto a la permeabilidad del suelo.

Tabla 7: Capacidad de inyección con respecto a las permeabilidades.

PERMEABILIDAD (cm/s)	CAPACIDAD DE INYECCION
$10^{-1} - 10^{-2}$	Fácilmente Inyectables
$10^{-3} - 10^{-4}$	Moderadamente inyectables
$10^{-4} - 10^{-5}$	Marginalmente inyectables
$< 10^{-5}$	No inyectables

Fuente: Agua y Agro (2015).

Las permeabilidades obtenidas en el subsuelo de cimentación de la presa, presentan una media de 10^{-5} cm/s, por lo tanto la capacidad de inyección será moderada.

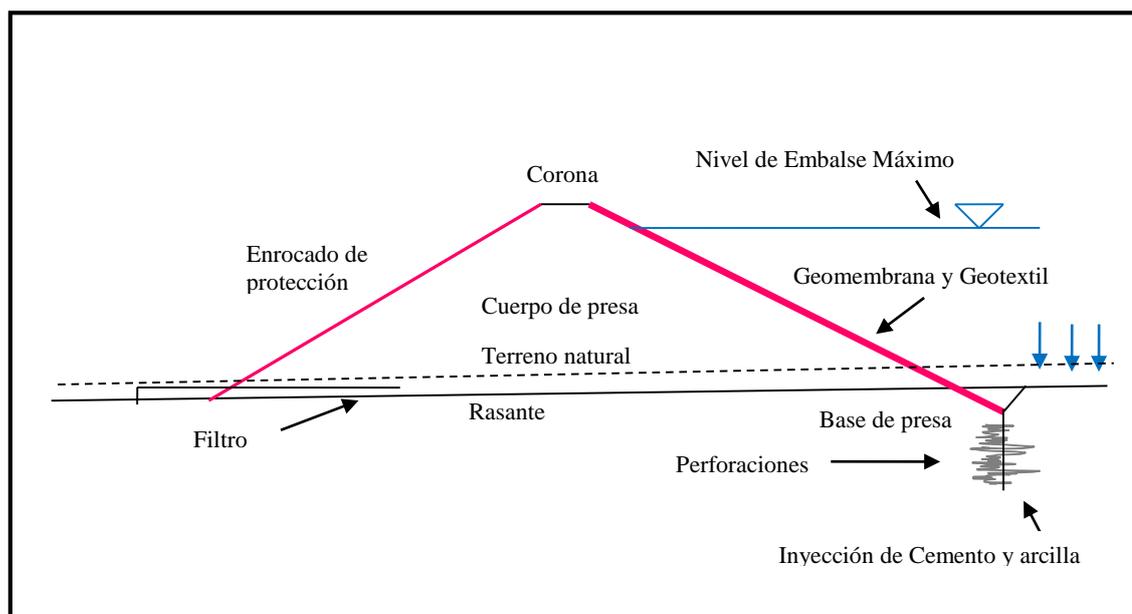


Figura N° 41: Esquema de las inyecciones de cemento en la Presa Huanzo (Agua y Agro2015)

Las inyecciones se realizarán en el pie de la presa aguas arriba tal y como se muestra en la Figura N° 41, se ha planteado esta ubicación para las inyecciones, debido a que se realizarán antes de la construcción del cuerpo, y así no causarán perjuicios constructivos (hidrofracturamiento).

La fabricación de la mezcla se efectuará colocando los materiales en el orden siguiente: agua, cemento y arcilla. Estos componentes deben mantenerse en agitación dentro de los mezcladores, el tiempo que dure la inyección. La dosificación será agua/cemento/arcilla (A/C/Ar) (0.70/1/0.02), estas dosificaciones dependen de los ensayos in situ (Cono de Marsh, punta de vicat, etc.).

Las profundidades de inyección tendrán un alcance de 5.00 metros, normalmente se hacen en etapas sucesivas con el fin de asegurar que alrededor del taladro se cree un volumen que estará limitado por el radio de acción y por la longitud de sondeo.

El radio de acción estimado para los terrenos morrénicos con permeabilidades de 10^{-3} a 10^{-4} cm/s es de 2 metros, asumiendo un terreno homogéneo. Sabiendo esto, la separación entre los taladros no deberá sobrepasar los 3 metros.

El cemento recomendado es el Portland tipo MS, debido a las buenas propiedades hidráulicas que este cemento presenta con el adicionamiento de las puzolanas (constituyentes sílice-alúmina), y es recomendable tener una antigüedad no mayor a 3 meses al momento de su uso en la inyección.

La arcilla recomendada es la Bentonita, debe de ser fina (menor a la mala 200), y del tipo de bentonita de sodio fina de Wyoming (Es una montmorillonita que se

encuentra en forma natural y que contiene un alto nivel de iones de sodio. Se hincha al mezclarse con el agua.). La bentonita no debe exceder del 3% del peso del cemento y se hidratará por un tiempo mínimo de tres horas antes de ser usada y debe tener un límite líquido (LL) de por lo menos 400%.

4.2.5.2 Pantalla Impermeable

Para la elaboración del diseño de la pantalla de impermeabilización se consideraron los resultados de las pruebas de permeabilidad, además de ensayos de laboratorio y de campo todo esto con el propósito de garantizar la estanqueidad de las aguas embalsadas en la presa de tierra.

La construcción de una pantalla de inyectado parte de la suposición, de que durante este trabajo, se forma un volumen de afectación cilíndrico alrededor de cada perforación. Cuando se colocan las perforaciones en serie a lo largo de una línea a una separación constante de tal forma de que se traslapen sus cilindros de influencia, se espera lograr un cuerpo tabular, que representa la pantalla de inyecciones.

Para formar la pantalla impermeable en el material morrénico se plantea que el número de líneas de inyección sea 3, con separación sistemática entre barrenos de 2.5 m horizontalmente y desfasando los barrenos entre líneas para obtener una distribución en tresbolillo.

Por la naturaleza del material, se tendrá que emplear la técnica de inyección por medio de manguitos. Esta técnica permitirá además reinyectar algunos tramos de la pantalla. Se deberá proteger el taladro mediante un Casing (Revestimiento) que permitirá la instalación de tubería PVC debidamente ranurada (tubo manguito), luego se extraerá el revestimiento para iniciar el proceso de inyección. El diámetro recomendado será de 76 mm. (NQ diámetro exterior) con empleo de Casing (HQ, diámetro: 96 mm.) y avance de broca adiamantada.

4.2.5.3 Separación de los Taladros de Inyección

Para asegurar que la inyección sea efectiva se ha considerado ensanchar esta, mediante el planteamiento de tres filas para que la pantalla sea lo más efectiva posible. Puesto que el radio de acción en los materiales con permeabilidades de más de 10-4 cm/s (suelos granulares morrénicos), se aproxima a los 2 m., se recomienda que la

separación mínima entre taladros sea de 2.5 m. en una misma fila, y de 2 m de separación, entre filas (primarias y secundarias).

A fin de asegurar la efectividad de la inyección en la zona de mayor consumo, se ha adicionado la perforación de taladros terciarios que sellaran la pantalla de inyección, así se tienen taladros primarios y secundarios espaciados a 2 m. entre filas y en toda su longitud a 2.5m, y los terciarios dispuestos entre estos a una separación de 0.5 m. entre filas y 2.5 m. a lo largo de su longitud, así como se muestra en la Figura 42.

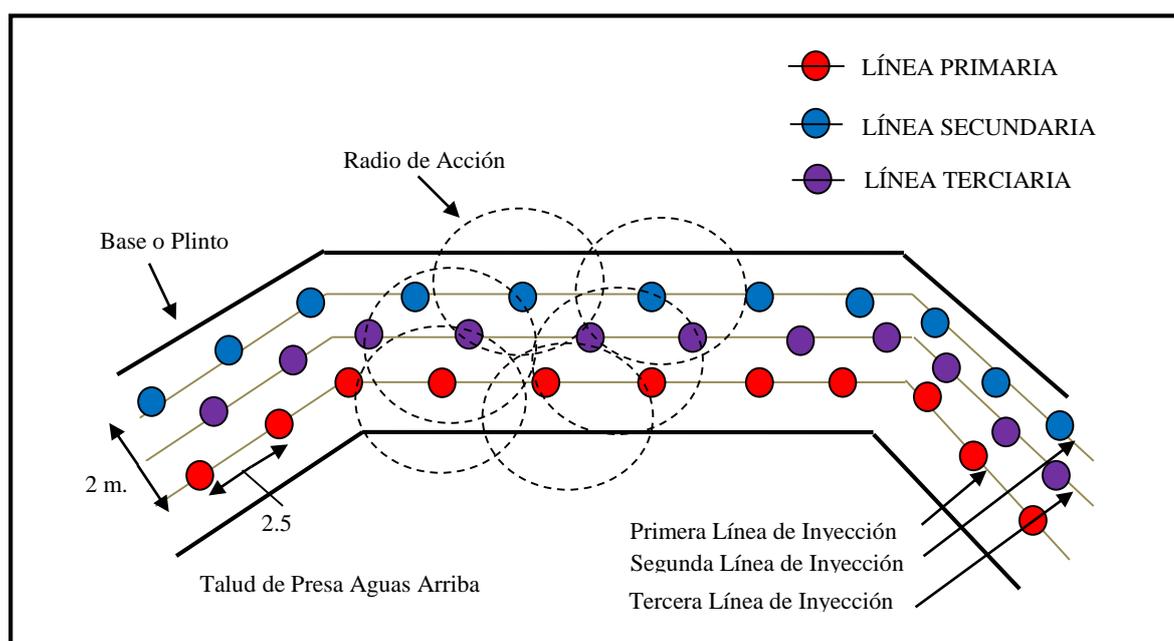


Figura N° 42: Esquema de Las líneas de inyección Primarias, Secundarias y Terciarias (Agua y Agro 2015)

CAPITULO V

CONCLUSIONES

- Se ha obtenido parámetros geotécnicos favorables que condicionan la construcción de la presa Huanzo, El material que constituirá el cuerpo de presa es arena Limosa con gravas (SM-GM), peso unitario 19.32 m kN/ m^3 , cohesión 0.36 Kg/ cm^2 , ángulo de fricción 42.4° y una permeabilidad de $4.44\text{E-}05 \text{ cm/s}$. La cimentación de la presa se hara en mateial arena limosa (SM), peso unitario 14.81 kN/ m^3 , Cohesión 0.34 Kg/ cm^2 , ángulo de fricción 33.7° , capacidad portante 11.30 Kg/cm^2 y una permeabilidad de $7.96\text{E-}05 \text{ cm/s}$.
- Se ha realizado el análisis de estabilidad de taludes con geometría $1V /2H$ para aguas arriba y $1V /1.8H$ aguas abajo con resultados del FS: 2.181 y 1.713 respectivamente; además de un análisis para un desembalse rápido con FS: 1.416. Para los análisis de estabilidad por métodos pseudoestáticos para cuerpos de presa, se a empleado un coeficiente sísmico igual a $2/3$ de aceleración máxima del terreno 0.33g . (0.22g para taludes).
- Se ha realizado analisis de infiltracion obteniendo los siguientes datos: En la seccion de cierre sin geomenbrana se obtuvo $0.38 \text{ m}^3/\text{Hora}$, con geomenbrana $0.17 \text{ m}^3/\text{Hora}$ y con inyeccion $0.11 \text{ m}^3/\text{Hora}$. En la zona del pie del talud aguas arriba sin geomenbrana $0.43 \text{ m}^3/\text{Hora}$, con geomenbrana $0.23 \text{ m}^3/\text{Hora}$ y con inyecciones se redujo a $0.15 \text{ m}^3/\text{Hora}$.

CAPITULO VI

RECOMENDACIONES

- Para complementar la información y tener mayor certeza de los resultados producto de los análisis con programas de cómputo, se recomienda utilizar los programas de ingeniería Rocscience (Slide).
- Se recomienda realizar líneas sísmicas MASW, la cual evalúa las condiciones del sitio y se puede obtener los valores del módulo de elasticidad (E) y el coeficiente de Poisson (ν), necesarios para realizar los análisis de esfuerzos.
- Se recomienda la utilización de controles geotécnicos, con instrumentación de piezómetros, inclinómetros e hitos de control topográfico.
- Llevar un control estricto de compactación en la construcción del cuerpo de presa, la compactación se debe realizar por capas.

CAPITULO VII

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- AGUA Y AGRO, ASESORES ASOCIADOS S.A.C. (2015). Estudio de pre inversión a nivel de factibilidad del pip: Instalación de servicio de agua del sistema de riego laguna Huanzo - distrito de Lucanamarca, provincia Huancasancos – Ayacucho.
- ARELLANO M. J. C. (2014). TESIS, Estudio geotécnico para la construcción de la presa TINKICCOCHA- Apurímac. Puno.
- BRAJA M. DAS. – 1999 - Fundamentos de Ingeniería Geotecnia, 3ra Edición, California State University, Sacramento, Editorial International Thomsom, 594 p.
- BRAJA M. DAS. – 1999 - Principios de Ingeniería de Cimentaciones, 4ta Edición, California State University, Sacramento, Editorial International Thomsom, 862 p.
- BOWLE, J.E. -1995 -. “Propiedades geofísicas de los suelos “Profesor de Ing. Civil Bradley University 235 p.
- CANCELA R. M. D. -1987- Comportamiento geotécnico de presas de residuos bajo acciones estáticas y dinámicas, Tesis Doctoral, Universidad de Madrid, 478 p.
- CASAGRANDE A. -1948- fragmentos del libro: Clasificación de los suelos 15 pp.
- DESENA AHEDO A. – 2003. Tesis: Estabilidad de Taludes en presas de tierra y Enrocamiento, México Distrito Federal, Instituto Politécnico Nacional, 128 p.
- FOYO, A.; TOMILLO, C.; SÁNCHEZ, M. A. – 1998 – Presas y embalses. Ingeniería geológica y aspectos ambientales. E.T.S.I. de Caminos. Universidad de Cantabria, Santander, 321 p.
- FRANCO M. A. – 1988 - El Cimiento y la Seguridad de la Presa, Madrid, 15 p.
- GALÁN S.F. – 2012 - Centrales Hidroeléctricas y presas del Alto Aragón, fundación Esteyco, Madrid, 172 pp.

- GÁLVEZ C. – 1994 – Consideraciones sobre el efecto del agua en el diseño y comportamiento de presas de materiales sueltos. Tesis del Máster de Ingeniería Geológica. Univ. Complutense de Madrid, 96 p.
- GALOFRE A. -1980- Conceptos Geológicos Básicos de Aplicación en Hidrogeología. Segunda Edición, Barcelona, 400 p.
- GONZÁLES Y. J. y ROBLES J. L. – 2004 - Geología Práctica, Departamento de Química Agrícola, Geología y Geoquímica. Universidad Autónoma de Madrid 320 p.
- GONZALEZ de VALLEJO, L. (2002), Ingeniería Geológica, Prentice hall. 1ra Edición, Madrid, 715 p.
- INSTITUTO GEOLÓGICO MINERO Y METALÚRGICO, -1996- Boletín N° 70A, Geología del Perú. Primera edición. Lima. 185 p.
- JORDAN LOPEZ, A. (2006). Manual de Edafología.
- JUAREZ B. E.-1996 -. Mecánica de suelos Tomo II-Editorial Limusa - México, Distrito Federal -703 p.
- JUAREZ B. E. -1995 - Mecánica de suelos Tomo I-Editorial Limusa -- México, Distrito Federal -640 p.
- KRAMER L. – 1996 - GEOTECHNICAL EARTHQUAKE ENGINEERING – Prentice Hall, New Jersey 07 458, 673 p
- KRYNINE P.D.; JUDD W. -1972- Principios de Geología y Geotecnia para Ingenieros, Traductor: José M. Ríos. Tercera edición. Barcelona, España. 828 p.
- LAMBET. W. – 1972 - Mecánica de Suelos, México, Editora Limusa S.A. de C.V. 4ta Edición, 575 pp.
- RODRIGUEZ BADILLO F. I. – 2012, TESIS, Diseño de la obra de cierre y las obras complementarias en el embalse Pampas de Salasaca, Quito – 76,77,359 p.
- SANCHEZ SAN ROMAN, J. F. (2011). Medidas puntuales de Permeabilidad ("Slug tests"). Obtenido de <http://hidrologia.usal.es>
- SOCIEDAD INTERNACIONAL DE MECANICA DE ROCAS - 1984. Estandarización de Pruebas de Laboratorio y Campo. 364 p.
- TORRES N. A.- octubre 2010. Filtraciones – Geología y Geotecnia, Universidad Nacional del Rosario, Facultad de Ingeniería Civil, 55 p.

ANEXOS

ANEXO I

PLANOS Y PERFILES

A Plano de Ubicación y Accesos (MN-01)

B Plano Geológico Local (MN-02)

C Perfil Estratigráfico (MN-03)

D Plano de Ubicación de Cantera (MN-04)

E Plano de SEV-Planta (MN-05)

F Perfil Estratigráfico-SEV (MN-06)

ANEXO II

ANEXO III

ANEXO IV