

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



**ANÁLISIS DE ESTABILIDAD Y EVALUACIÓN DE FILTRACIÓN
PARA LA RECONSTRUCCIÓN DE LA REPRESA YANACOCOA –
PASCO**

TESIS

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO CIVIL

JHON KENEDY OCHOA ORÉ

Lima- Perú

2013

Digitalizado por:

**Consortio Digital del
Conocimiento MebLatam,
Hemisferio y Dalse**

	<i>PÁG.</i>
ÍNDICE	I
RESUMEN	V
LISTA DE CUADROS	VII
LISTA DE FIGURAS	XI
INTRODUCCIÓN	XV
CAPÍTULO I: CONCEPTOS BÁSICOS.	
1.1 PRESAS DE TIERRA.....	
1.1.1 Principios en que se basan las presas de tierra.....	1
1.1.2 Cimentación.....	1
1.1.3 Terraplén.....	2
1.1.4 Partes de la presa de tierra.....	3
1.2 TEORÍA SOBRE ESTABILIDAD DE TALUDES EN.....	4
PRESAS DE TIERRA.	5
1.2.1 Análisis de estabilidad de taludes.....	
1.1.2 Métodos de análisis de estabilidad de taludes.....	5
1.3 TEORÍA SOBRE FILTRACIÓN EN PRESAS DE TIERRA.....	6
1.3.1 Flujo de agua en los suelos.....	15
1.3.2 Filtraciones en la cimentación.....	15
CAPÍTULO II: ESTUDIOS BÁSICOS DE LA PRESA	26
YANACOCHA.	
2.1 ESTUDIO DE GEOLOGÍA LOCAL Y REGIONAL DE LA.....	
PRESA YANACOCHA.	31

	Pág.
2.1.1 Geología regional.....	31
2.1.2 Geología local.....	31
2.2 ESTUDIO HIDROLÓGICO.....	37
2.2.1 Características físicas y climatológicas del proyecto.....	37
2.2.2 Oferta hídrica superficial.....	47
2.2.3 Demanda hídrica.....	60
2.2.4 Balance hídrico.....	66
2.2.5 Regulación de descargas.....	68
2.3 ESTUDIO GEOTÉCNICO.....	74
2.3.1 Geodinámica interna.....	74
2.3.2 Geodinámica externa.....	74
2.3.3 Geotecnia de la zona de estudio.....	75
2.3.4 Análisis de canteras.....	89
CAPÍTULO III: ANÁLISIS DE ESTABILIDAD Y EVALUACIÓN DE LA FILTRACIÓN.	
3.1 DIMENSIONAMIENTO DE LA PRESA YANACOCHA.....	93
3.1.1 Característica del lecho de fundación.....	93
3.1.2 Aspectos sísmicos del área de estudio.....	94
3.1.3 Características geométricas de la presa.....	98
3.2 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE LA PRESA MEDIANTE.....	107
EL PROGRAMA SLIDE.	

	Pág.
3.3 EVALUACIÓN DE LA FILTRACIÓN EN EL SUELO DE..... CIMENTACIÓN DE LA PRESA YANACocha CON EL PROGRAMA SEEP/W DEL GEO STUDIO 2007.	120
CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	
4.1 CONCLUSIONES.....	134
4.2 RECOMENDACIONES.....	137
BIBLIOGRAFÍA.....	138
 ANEXOS	
ANEXO A - RESULTADOS DEL PROGRAMA SLIDE Y SEPP/W.	
A.1 Datos y resultados del análisis de filtración en el..... programa Sepp/W.	A-1
A.2 Datos y resultados del análisis de estabilidad para el..... modelo 1 en el programa Slide 5.0.	A-8
A.3 Datos y resultados del análisis de estabilidad para el..... modelo 2 en el programa Slide 5.0.	A-12
 ANEXO B - RESULTADOS DE ENSAYOS DE LABORATORIO.	
B.1 Clasificación sucs de las calicatas del eje de la presa..... Yanacocha.	B-1
B.2 Ensayo de corte directo para el suelo de cimentación..... de la presa.	B-6
B.3 Clasificación sucs de las calicatas de las canteras cercanas..... a la presa yanacocha.	B-8

	Pág.
B.4 Ensayos de compresión simple de roca, relación de soporte..... de california y permeabilidad para las canteras.	B-11
ANEXO C - PERFILES DE SUELO.	
C.1 Perfil estratigráfico de las perforaciones diamantinas..... realizadas.	C-1
C.2 Perfil estratigráfico de las calicatas realizadas en el eje..... de la presa Yanacocha.	C-5
C.3 Perfil estratigráfico de las calicatas realizadas en las..... canteras cercanas a la presa Yanacocha.	C-10
ANEXO D - PLANOS.	
D.1 Ubicación general de la presa Yanacocha.....	D-1
D.2 Plano topográfico y perfil longitudinal de la presa Yanacocha....	D-2
D.3 Ubicación de calicatas y perforaciones diamantinas..... realizadas para la presa Yanacocha.	D-3
D.4 Perfil geológico de la presa Yanacocha.....	D-4
D.5 Plano geológico de la laguna Yanacocha.....	D-5
ANEXO E - PANEL FOTOGRÁFICO.	
E.1 Panel fotográfico de calicatas del eje de presa y calicatas..... de canteras.	E-1
E.2 Panel fotográfico de los ensayos de perforación..... diamantina, SPT y permeabilidad.	E-5

RESUMEN

El contenido de esta tesis "Análisis de estabilidad y evaluación de filtración para la reconstrucción de la represa Yanacocha – Pasco", se divide en tres capítulos en el capítulo I de conceptos básicos se desarrolló las características de las presas de tierra, los principios en las que se basan este tipo de presas, partes de presas de tierra, así también se desarrolló las teorías y métodos utilizados para el cálculo de estabilidad de los taludes y cálculo de filtración en presas de tierra. En el capítulo II se hace un resumen de los estudios básicos realizados para la presa Yanacocha, el cual recopila la información de campo y gabinete como los estudios geológicos, hidrológicos, geotécnicos, ensayos de laboratorio, etc. En el capítulo III se determina el tipo de presa a diseñar con la información básica del capítulo II, además se busca una sección típica cuyo diseño cumpla con las condiciones de estabilidad y filtración para la operación de la presa.

El objetivo principal de esta tesis será determinar el tipo de presa y realizar un diseño en base a los estudios de campo, al cual se analizará su estabilidad, y se verificará la filtración en la presa así como en la cimentación.

Se elige diseñar una presa de tierra homogénea, apoyados en los resultados de los estudios geológicos, geotécnicos, topográficos, hidráulicas, estudio de canteras y teniendo en cuenta el costo del proyecto. Del estudio hidrológico se obtuvo el volumen de almacenamiento, con la cual se calculó los niveles de operación y la altura de la presa, así también el eje del nuevo dique y las obras hidráulicas que presentará la nueva estructura de la presa Yanacocha.

Luego de diseñarse una sección típica, de la presa de tierra homogénea, se analiza su estabilidad para el proceso constructivo y su funcionamiento incluyendo eventos sísmicos, mediante el programa Slide 5.0. El método empleado en este programa es el de Morgenster Price, que utiliza criterio el de dividir la masa a estudiar en una serie de tajadas, dovelas o bloques y considerar el equilibrio de cada tajada por separado.

Para poder evaluar la filtración en la cimentación de la presa se emplea el programa SEEP/W del Geo Studio 2007, en la cual se modela la sección típica definida previamente que cumple con las condiciones de estabilidad, luego se define las propiedades de los materiales, como el coeficiente de permeabilidad

de cada material empleado en el dique, además de las condiciones de contorno que hace referencia al gradiente hidráulico. Con estos datos ingresados, el programa utiliza el método de las líneas equipotenciales y líneas de flujo, permitiendo obtener la gradiente hidráulica, la presión de poros y la velocidad de filtración en cada punto de la sección analizada.

Con la velocidad de flujo obtenida, se calcula el porcentaje del agua en el vaso de la presa que se pierde por filtración. Se reajusta el diseño colocando los filtros necesarios que optimicen el diseño.

LISTA DE CUADROS.

	Pág.
Cuadro Nº 1.1 Ecuaciones de equilibrio satisfechas por los métodos de equilibrio límite más utilizados.	11
Cuadro Nº 1.2 Hipótesis de fuerzas entre rebanadas de distintos métodos de equilibrio límite.	12
Cuadro Nº 1.3 Valores de permeabilidad por tipo de suelo.	17
Cuadro Nº 1.4 Diferentes métodos de cálculo para la determinación de la línea superior de flujo y la línea de descarga.	25
Cuadro Nº 1.5 Valores del coeficiente "C" para los métodos de Bligh, Lane y Komov.	29
Cuadro Nº 2.1 Características fisiográficas de la microcuenca Yanacocha.	37
Cuadro Nº 2.2 Información meteorológica para el estudio de la presa Yanacocha	38
Cuadro Nº 2.3 Precipitación total mensual y anual (mm) - Estación Cerro de Pasco.	39
Cuadro Nº 2.4 Temperatura media mensual y anual (°C) – Estación Cerro de Pasco.	41
Cuadro Nº 2.5 Humedad relativa media mensual y anual (%) – Estación Cerro de Pasco.	43
Cuadro Nº 2.6 Evaporación media mensual y anual (mm) – Estación Cerro de Pasco.	44
Cuadro Nº 2.7 Dirección predominante y velocidad media mensual del viento (m/s) – Estación Cerro de Pasco.	46
Cuadro Nº 2.8 Registro de caudales medios mensuales (mm) – Estación Cerro de Pasco.	48

	Pág.
Cuadro N° 2.9. Precipitación total mensual completada y consistente (Estación Cerro de Pasco).	50
Cuadro N° 2.10. Coeficiente para el cálculo de precipitación efectiva (Estación Cerro de Pasco).	52
Cuadro N° 2.11 Cálculo de caudales medios mensuales para el Año Promedio.	56
Cuadro N° 2.12 Cálculo de descargas medias mensuales (mm) – Quebrada Yanacocha.	57
Cuadro N° 2.13 Descargas medias mensuales generadas (m ³ /s) – Quebrada Yanacocha.	58
Cuadro N° 2.14. Cédula de cultivos.	60
Cuadro N° 2.15 Calendario de siembra.	61
Cuadro N° 2.16 Distribución de áreas.	61
Cuadro N° 2.17 Determinación de la ETo – Método de Hargreaves.	62
Cuadro N° 2.18 Kc de cultivos.	63
Cuadro N° 2.19. Demanda agrícola.	65
Cuadro N° 2.20 Demanda poblacional.	65
Cuadro N° 2.21 Balance hídrico Oferta – Demanda.	67
Cuadro N° 2.22 Análisis de capacidad de embalse – Presa Yanacocha	70
Cuadro N° 2.23 Resultados ecuación en base a información del río Mantaro.	71
Cuadro N° 2.24 Resultados ecuación de Murano.	72
Cuadro N° 2.25 Resultados ecuación de Fleming.	73

	Pág.
Cuadro N° 2.26 Resultados ecuación de relación área de cuenca – Qs.	73
Cuadro N° 2.27 Ubicación de las calicatas exploratorias.	75
Cuadro N° 2.28 Cuadro N° 2.28 Clasificación granulométrica SUCS de los suelos de las calicatas.	81
Cuadro N° 2.29 Límites de consistencia y humedad natural.	82
Cuadro N° 2.30 Resultados de las pruebas de Lefranc.	86
Cuadro N° 2.31 Resultados de permeabilidad obtenida en laboratorio.	87
Cuadro N° 2.32 Resultado de los ensayos de SPT.	88
Cuadro N° 2.33 Clasificación tipo SUCS de las canteras.	89
Cuadro N° 2.34 Granulometría y contenido de humedad de las canteras.	90
Cuadro N° 2.35 Clasificación de suelo según el valor de CBR.	91
Cuadro N° 2.36 Resultados de los ensayos de CBR.	91
Cuadro N° 2.37 Compresión simple testigo de roca.	92
Cuadro N° 3.1 Determinación del ancho de la corona.	98
Cuadro N° 3.2 Determinación del borde libre.	99
Cuadro N° 3.3 Altura de corrimiento.	99
Cuadro N° 3.4 Cota vs Volumen para los niveles de operación de la presa Yanacocha.	102
Cuadro N° 3.5 Factores de seguridad mínimos para análisis de estabilidad en presas de tierra.	104
Cuadro N° 3.6 Valores típicos de parámetros de resistencia para rocas.	105

	Pág.
Cuadro N° 3.7 Propiedades físicas comunes de suelos.	105
Cuadro N° 3.8 Valores de la cohesión para arcillas según su consistencia.	106
Cuadro N° 3.9 Parámetros geotécnicos de resistencia.	106
Cuadro N° 3.10 Resultados de las Permeabilidades – Prueba de Lefranc.	121
Cuadro N° 3.11 Resultados de las permeabilidades determinadas en el laboratorio.	121
Cuadro N° 3.12 Permeabilidad usadas en modelamiento de filtraciones.	129

LISTA DE FIGURAS.

	pág.
Figura N° 1.1 Partes constituyentes de la presa de tierra.	4
Figura N° 1.2 Métodos de cálculo de estabilidad de taludes.	8
Figura N° 1.3 Representación de la división en rebanadas de la masa de terreno desplazada.	9
Figura N° 1.4 Esquema de las fuerzas que actúan sobre una rebanada.	10
Figura N° 1.5 Representación de las fuerzas actuantes en una rebanada consideradas en el método de Spencer y Morgenstein-Price.	13
Figura N° 1.6 Consideraciones de flujo en dos dimensiones, establecidos a través de un elemento de suelo.	19
Figura N° 1.7 Redes de flujo en una presa.	21
Figura N° 1.8 Flujo no confinado a través de una presa.	22
Figura N° 1.9 Condiciones de entrada y salida de la línea superior de flujo.	23
Figura N° 1.10 Determinación de la línea de filtración y flujo de salida para terraplenes sobre fundación impermeable.	24
Figura N° 1.11 Solución de Kozeny para $\alpha=180^\circ$.	26
Figura N° 2.1 Diagrama de precipitación media mensual (mm).	40
Figura N° 2.2 Diagrama de temperatura media mensual (mm).	42
Figura N° 2.3 Diagrama de humedad relativa media mensual (%).	43
Figura N° 2.4 Diagrama de evaporación media mensual (%).	45
Figura N° 2.5 Rosa de vientos.	46

	pág.
Figura N° 2.6 Serie de caudales generados (m ³ /s) durante los años del periodo de registro – Quebrada Yanacocha.	59
Figura N° 2.7 Caudales promedios mensuales generados (m ³ /s) para un año promedio – Quebrada Yanacocha.	59
Figura N° 2.8 Balance hídrico Oferta – Demanda.	67
Figura N° 2.9 Equipo de perforación diamantina.	77
Figura N° 2.10 Tomamuestras o cuchara SPT.	77
Figura N° 3.1 Zonificación del coeficiente sísmico para presas pequeñas y medianas.	80
Figura. N° 3.2 Mapa de iso - aceleraciones del CISMID – UNI.	96
Figura N° 3.3 Diseño considerado para análisis de estabilidad – simulación N°1.	97
Figura N° 3.4 Presa llena con sismo, talud aguas abajo.	107
Figura N° 3.5 Presa llena sin sismo, talud aguas abajo.	109
Figura N° 3.6 Presa llena con sismo, talud aguas arriba.	110
Figura N° 3.7 Presa llena sin sismo, talud aguas arriba.	111
Figura N° 3.8 Término de construcción + sismo, aguas arriba.	111
Figura N° 3.9 Término de construcción sin sismo, aguas arriba.	112
Figura N° 3.10 Término de construcción + sismo, aguas abajo.	112
Figura N° 3.11 Término de construcción sin sismo, aguas abajo.	113
Figura N° 3.12 Diseño considerado para análisis de estabilidad – simulación N° 2.	114
Figura N° 3.13 Presa llena con sismo, talud aguas abajo.	116
Figura N° 3.14 Presa llena sin sismo, talud aguas abajo.	116

	Pág.
Figura N° 3.15 Presa llena con sismo, talud aguas arriba.	117
Figura N° 3.16 Presa llena sin sismo, talud aguas arriba.	117
Figura N° 3.17 Término de construcción con sismo, talud aguas arriba.	118
Figura N° 3.18 Término de construcción sin sismo, talud aguas arriba.	118
Figura N° 3.19 Término de construcción con sismo, talud aguas abajo.	119
Figura N° 3.20 Término de construcción sin sismo, talud aguas abajo.	119
Figura N° 3.21 Filtración en cuerpo de presa con línea de flujo superior trazado con el método de Kozeny.	122
Figura N° 3.22 Filtración en la cimentación de la presa sin impermeabilización de talud ni pantalla.	123
Figura N° 3.23 Filtración en la cimentación de la presa con impermeabilización y pantalla talud aguas arriba.	125
Figura N° 3.24 Verificación del camino de percolación sin pantalla impermeable.	126
Figura N° 3.25 Verificación del camino de percolación con pantalla impermeable.	127
Figura N° 3.26 Modelo utilizado para el análisis de filtración en el programa SEEP/W.	129
Figura N° 3.27 Líneas equipotenciales y de flujo para la presa Yanacocha.	130
Figura N° 3.28 Velocidad de filtración del análisis considerado en el programa SEEP/W.	131

	Pág.
Figura N° 3.29 Velocidad de filtración para la presa Yanacocha.	131
Figura N° 3.30 Caudal de filtración para la presa Yanacocha.	131
Figura N° 3.31 Sección típica que se define para la presa Yanacocha.	133

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la Laguna Yanacocha cuenta con una estructura de almacenamiento muy antigua, la cual se encuentra deteriorada y en mal estado. El Gobierno Regional de Pasco en su afán de incrementar el volumen de almacenamiento de aguas en la represa Yanacocha, realizó diversas obras para su funcionamiento, siendo éstas: la construcción de un canal de alivio y una estructura de descarga de agua de la presa. Las estructuras antes mencionadas presentan problemas en su diseño hidráulico y estructural; incluso se desestabilizó el dique de la presa durante la ejecución de las obras. Esto como consecuencia trajo la aparición de filtraciones en diferentes lugares de la presa, haciendo que las aguas almacenadas en la presa se pierdan hacia la quebrada, disminuyendo su volumen de almacenamiento. Estas filtraciones han causado la inestabilidad en la presa, lo que podría ocasionar el colapso de la presa, por lo que representa un riesgo latente para el centro poblado La Villa de Pasco, por esta razón importante que se tiene que reconstruir la presa Yanacocha. Por lo cual en esta tesis tiene como objetivo principal determinar el tipo de presa y realizar un diseño en base a los estudios de campo y ensayos de laboratorio, además este diseño de la presa deberá cumplir con las condiciones de estabilidad, talud aguas arriba como en la talud aguas abajo para todas las condiciones de operación de la presa, así también verificaremos que la filtración de la presa no afecta su funcionamiento y su estabilidad, para lo cual usaremos el programa de computo Slide 5.0 para analizar la estabilidad del diseño y para verificar la filtración se emplea el programa SEEP/W del Geo Studio 2007.

Esta tesis es una aplicación práctica de la ingeniería de presas pequeñas, orientada a la reconstrucción de la presa Yanacocha. Cuya importancia no solo es económica puesto que ayudara con el desarrollo agrícola de los poblados cercanos al proyecto, sino que también es muy necesaria su reconstrucción ya que representa un riesgo para estas poblaciones porque podría colapsar la actual presa que está deteriorada y con filtraciones en su estructura.

CAPÍTULO I: CONCEPTOS BÁSICOS

1.1 PRESAS DE TIERRA.

Una presa es una barrera artificial para detener, acopiar o encausar el agua, construida generalmente transversal a la corriente de un río. Las presas de tierra constituyen el tipo de presas más común, principalmente por su construcción ya que intervienen materiales en su estado natural que requieren el mínimo de tratamiento. Además, los requisitos para sus cementaciones son menos exigentes que para los otros tipos.

Las presas de tierra requieren estructuras complementarias que sirvan de vertederos de demasías. La principal desventaja de una presa de tierra es que, si no tiene suficiente capacidad, el vertedor de demasías puede dañarse y aún destruirse por el efecto erosivo del agua que llegue a rebasarla.

El planteamiento del tipo de presa y su pre-dimensionamiento es muy distinto en estas presas de tierra que en las de hormigón. Por ejemplo en este último el material fabricado (hormigón) presenta características relativamente uniformes y predecibles y el cimientado ha de ser roca con una cierta consistencia. En las presas de materiales sueltos los componentes pueden ser muy variados (de arcillas a escollera), y aun con un material genérico las características varían entre límites muy amplios y en cuanto al cimientado, puede ser desde arcillas o gravas hasta roca consistente. Por ello el abanico tipológico y de dimensiones es muy extenso: no hay una sección tipo prefijada como para una presa de hormigón, sino que los materiales y el cimientado son determinantes, y su conocimiento imprescindible para hacer el proyecto. (Vallarino Eugenio, Tratado básico de presas, 5ta edición, Tomo I, España, 1998.)

1.1.1 Principios en que se basan las presas de tierra.

El principio básico de todo proyecto es construir una estructura satisfactoria y funcional al mínimo costo total, y en los proyectos de presas es el mismo principio, sin embargo lo más importante es que las presas de tierra deben ser seguras y estables durante el periodo de la construcción y servicio de la misma, para lo cual deben cumplir los siguientes requisitos:

- El terraplén debe estar asegurado contra el rebasamiento durante las avenidas del proyecto, siendo suficiente la capacidad del vertedero de demasías y en las obras de toma.
- Los taludes de los terraplenes deben ser estables durante la construcción y en todas las condiciones que se presente durante la operación de la presa, incluyendo su rápido desembalse.
- El terraplén deberá proyectarse de manera que no produzca esfuerzos excesivos en la cimentación.
- Se deben controlar las filtraciones en el cuerpo de presa, como en la cimentación de la misma para que no se produzca erosión interna o fisuras en la presa.
- El talud aguas arriba debe estar protegido contra la erosión producida por el oleaje, y la corona así como el talud aguas abajo debe estar protegido contra la lluvia y el viento.

1.1.2 Cimentación.

En las cimentaciones de roca, así como las cimentaciones de arcilla laminares duras, no presentan problemas de resistencia para las presas de tierra, sin embargo se tiene que considerar las filtraciones erosivas, la pérdida de agua en las puntas, fisuras, hendiduras, estratos permeables y a largo de los planos de falla. En los casos en los que la roca se encuentre agrietada o fisurada se le tratará, asegurando la impermeabilización con inyecciones de cemento o realizando cabezales.

En las cimentaciones de arena y grava que son cimentaciones permeables, los problemas que se encuentra son básicamente dos: la cantidad de las filtraciones subterráneas y las presiones producidas.

Para solucionar esto, será necesario determinar el coeficiente de permeabilidad de la cimentación permeable y se podrá calcular el caudal de la filtración mediante la fórmula de Darcy.

$$Q = K i A \quad (1.1)$$

Dónde:

Q: descarga en la unidad de tiempo dada.

K: coeficiente de permeabilidad para la cimentación.

i: pendiente hidráulica.

A: área bruta de la cimentación

Las cimentaciones de limo y arcilla presentan como problema principal la estabilidad, así como la resistencia de la cimentación y se debe considerar para este tipo de cimentaciones la saturación de la misma.

Para la presa Yanacocha se considera una cimentación arcillosa con presencia de arenas y gravas, saturada.

1.1.3 Terraplén.

Al proyectar los terraplenes de tierra se proyecta la sección transversal con los materiales disponibles, de tal manera que cumplan con su función para la cual fue diseñada, además de la seguridad y al mínimo costo.

Los suelos aparecen con combinaciones infinitas de granulometría, composición y las correspondientes variaciones en comportamiento bajo diferentes condiciones de saturación y de carga, además de la relación recíproca entre esfuerzo y deformación en un terraplén son muy complejas.

Para proyectos de presas se exige que los taludes de los terraplenes sean estables bajo todas las condiciones de construcción y de la operación del vaso. No tienen que no producir esfuerzos excesivos en la cimentación, además se deben controlar las filtraciones a través del terraplén, de tal manera que esté seguro contra el rebasamiento, y que los taludes permanezcan protegidos contra la erosión.

Los terraplenes de materiales granulares o no cohesivos son más estables que los hechos de suelos cohesivos, porque los materiales granulares tienen una mayor resistencia a la fricción y por su mayor permeabilidad permiten la rápida disipación de las presiones intersticiales que resultan de las fuerzas de compresión. De manera que cuando las condiciones lo permiten, se puede adoptar taludes más inclinados que para los suelos no cohesivos. Los terraplenes de materiales homogéneas, de baja

permeabilidad tienen generalmente taludes más tendidos que los usados en los terraplenes de sección compuesta, que llevan zonas exteriores que drena fácilmente, soportando zonas internas de materiales relativamente permeables. (Bureau of reclamation, Design of small dams, 1981).

1.1.4 Partes de la presa de tierra.

En las presas de materiales sueltos se incluyen todas las que se construyen con elementos muy variados (tierras, gravas, escolleras, etc.) con nula o limitada cohesión, pues en este tipo de presa se emplean los materiales casi tal como se encuentran en la naturaleza sin más elaboración que una elemental clasificación y un apisonado.

En la figura N° 1.1 se muestra las partes que constituyen una presa de tierra con enrocamiento y con núcleo impermeable, sin embargo existen de otro tipo de sección como las de sección graduada con núcleo impermeable, presas pantalla, de sección homogénea, y muchas otras secciones que se puede diseñar dependiendo del material disponible, ya que las presas de tierra son muy variables y no tienen una sección fija definida.

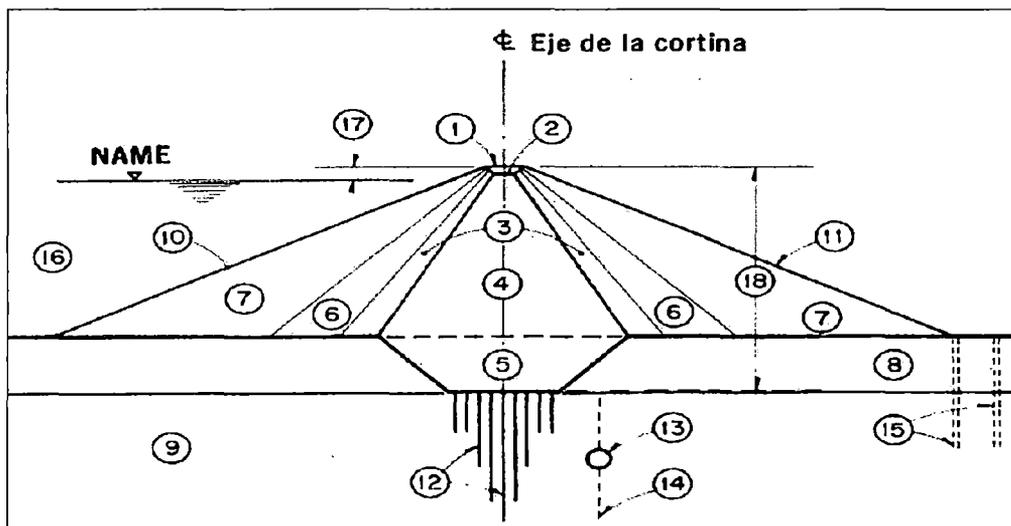


Figura N° 1.1 Partes constituyentes de la presa de tierra (Novak, P., Moffat, A.I.B., Nalluri, C., Narayan, R. Estructuras Hidráulicas, Segunda Edición, Mc Graw Hill).

1. Cresta o corona.
2. Revestimiento de la corona.
3. Filtros.
4. Núcleo o corazón impermeable.
5. Trinchera.
6. Transiciones
7. Enrocamientos
8. Deposito fluvial
9. Roca basal
10. Talud aguas arriba.
11. Talud aguas abajo.
12. Pantalla de inyecciones.
13. Galería.
14. Drenes.
15. Pozos de alivio.
16. Embalse.
17. Borde libre.
18. Altura de la cortina.

1.2 TEORÍA SOBRE ESTABILIDAD DE TALUDES EN PRESAS DE TIERRA.

1.2.1 Análisis de estabilidad de taludes.

Las teorías y los métodos que buscan calcular la estabilidad de las presas de tierra o taludes, se basan en la resistencia al corte de los suelos y en suponer posibles superficies de falla en el terraplén, como por ejemplo suponer una superficie de falla cilíndrica u otras, con la cual se determina un factor de seguridad determinada por una relación de las fuerzas que actúan en el terraplén.

Es una práctica común en ingeniería, definir la estabilidad de un talud en términos de un factor de seguridad (FS), obtenido de un análisis matemático de estabilidad. El modelo a emplear para el análisis de estabilidad, debe tener en cuenta la mayoría de los factores que afectan la estabilidad. Estos factores incluyen geometría del talud, cargas dinámicas por acción de sismos, flujo de agua, propiedades de los suelos, etc.

Los métodos de cálculos de estabilidad sirven para determinar la estabilidad en una determinada sección, sin embargo en las presas de tierra no hay procedimientos para diseñar los taludes o secciones, pues para determinarlos hay que plantear una adecuada sección y no solo eso, hay que comprobarlo con métodos de cálculo como Bishop, Spencer, u

otros, hasta que cumpla con las condiciones necesarias que aseguren su estabilidad, y con un volumen mínimo de terraplén. De no cumplir con las condiciones de estabilidad se replantea la sección del terraplén y se vuelve a analizar con el mismo método hasta que cumpla con las condiciones necesarias de estabilidad.

1.1.2 Métodos de análisis de estabilidad de taludes.

Los métodos de cálculo para analizar la estabilidad de un talud se pueden clasificar en dos grandes grupos:

Métodos de cálculo en deformaciones.

Estos métodos que evitan hipótesis como el de adoptar cierta geometría de la superficie de falla, incluyen relaciones esfuerzo-deformación de los diversos suelos de un talud y permiten simular los procesos de deformación y calcular la deformación de la talud. Dentro de estos métodos destaca el método de elementos finitos (MEF). Estos métodos proporcionan generalmente una solución en términos de tensiones y desplazamientos dentro del talud, que a su vez han de interpretarse en términos de estabilidad. Es decir, no suelen proporcionar en forma directa y con un criterio estandarizado un factor o coeficiente de seguridad.

Método de equilibrio límite.

El análisis de los movimientos de los taludes o laderas durante muchos años se ha realizado utilizando las técnicas del equilibrio límite. Este tipo de análisis requiere información sobre la resistencia cortante del suelo. El sistema de equilibrio límite supone que en el caso de una falla, las fuerzas actuantes y resistentes son iguales a lo largo de la superficie de falla equivalente a un factor de seguridad de 1.0. El análisis se puede realizar estudiando directamente la totalidad de la longitud de la superficie de falla o dividiendo la masa deslizada en tajadas o dovelas. Cada día se han mejorado los sistemas de dovelas desarrollados a inicios del siglo XX además existen software muy fácil de utilizar.

El factor de seguridad es empleado por los ingenieros para conocer cuál es el factor de amenaza, de que el talud falle en las peores condiciones de

comportamiento para el cual se diseña. Fellenius (1927) presentó el factor de seguridad como la relación entre la resistencia al corte real, calculada del material en el talud y los esfuerzos de corte críticos que tratan de producir la falla, a lo largo de una superficie supuesta de posible falla, en superficies circulares donde existe un centro de giro y momentos resistentes y actuantes. Existen, además, otros sistemas de plantear el factor de seguridad, tales como la relación de altura crítica y altura real del talud y método probabilístico.

La mayoría de los sistemas de análisis asumen un criterio de “equilibrio límite” donde el criterio de falla de Coulomb es satisfecho a lo largo de una determinada superficie. Se estudia un cuerpo libre en equilibrio, partiendo de las fuerzas actuantes y de las fuerzas resistentes que se requieren para producir el equilibrio. Calculada esta fuerza resistente, se compara con la disponible del suelo o roca y se obtiene una indicación del factor de seguridad.

Otro criterio es el de dividir la masa en una serie de tajadas llamadas dovelas o bloques y considerar el equilibrio de cada tajada por separado. Una vez realizado el análisis de cada tajada se analizan las condiciones de equilibrio de la sumatoria de fuerzas o de momentos.

Todos estos métodos además exigen tantear varias superficies de falla hasta determinar el mínimo coeficiente de seguridad, que no es otro que el de la presa y supone por supuesto un estado bidimensional haciendo consideraciones para aquellos en los que realmente se da el efecto tridimensional, no siendo necesaria en la mayoría de los casos.

Las presiones intersticiales, que juegan un papel decisivo en la estabilidad se obtienen de la red de filtración, que debe obtenerse previamente. Esto se puede clasificar a su vez en dos grupos:

Métodos exactos

La aplicación de las leyes de la estática proporciona una solución exacta del problema con la única salvedad de las simplificaciones propias de todos los métodos de equilibrio límite (ausencia de deformaciones, factor de seguridad constante en toda la superficie de rotura, etc.). Esto sólo es

posible en taludes de geometría sencilla, como por ejemplo la rotura planar y la rotura por cuñas.

Métodos no exactos

En la mayor parte de los casos la geometría de la superficie de rotura no permite obtener una solución exacta del problema mediante la única aplicación de las leyes de la estática. El problema es hiperestático y ha de hacerse alguna simplificación o hipótesis previa que permita su resolución. Se pueden considerar así los métodos que consideran el equilibrio global de la masa deslizante, hoy en desuso, y los métodos de las dovelas o rebanadas, que consideran a la masa deslizante dividida en una serie de fajas verticales. Los métodos de las dovelas o rebanas pueden clasificarse en dos grupos (Figura 1.2):

- Métodos aproximados: no cumplen todas las ecuaciones de la estática. Se pueden citar por ejemplo los métodos de Fellenius, Janbu y Bishop simplificado.
- Métodos precisos o completos: cumplen todas las ecuaciones de la estática. Los más conocidos son los de Morgenstern-Price, Spencer y Bishop riguroso.

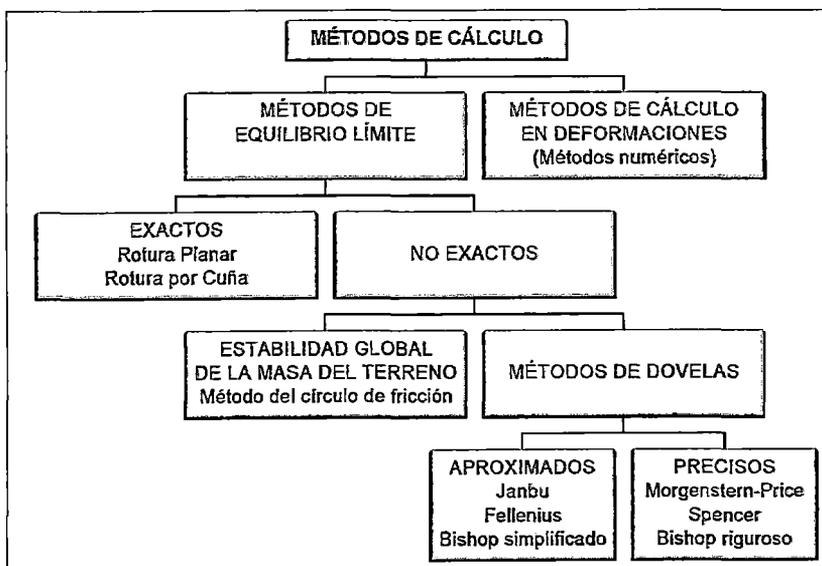


Figura Nº 1.2 Métodos de cálculo de estabilidad de taludes (Herrera Rodríguez Fernando, Análisis de estabilidad de taludes, Geotecnia 2000, Madrid, España).

Métodos de dovelas

Con el objetivo de mejorar los resultados obtenidos con el método de la Masa Total, se presentan los métodos de las rebanadas. En este caso se divide la masa desplazada en distintas rebanadas que pasan a considerarse un sólido rígido. De esta forma, tal y como se observa en la Figura N° 1.3, la masa desplazada queda subdividida, y en cada subdivisión se imponen las condiciones de equilibrio.

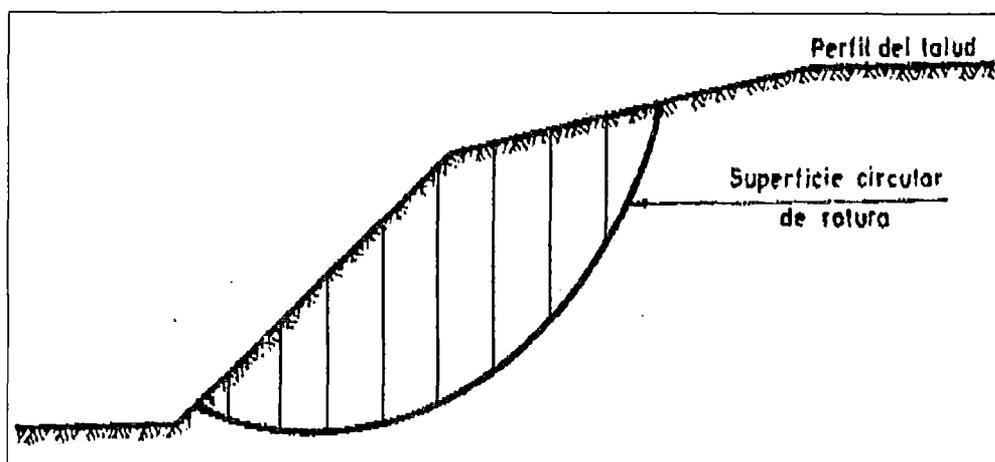


Figura N° 1.3 Representación de la división en rebanadas de la masa de terreno desplazada (Alonso Pérez Eduardo, Estabilidad de Taludes, Edición 2005, Catalunya, España, 2005).

Mediante el uso del método de las rebanadas se consigue por un lado, una mejor aproximación a la distribución de tensiones normales a lo largo de la superficie de rotura. Esta distribución se verá afectada por la altura de terreno que haya en cada rebanada. Por otro lado, mediante el uso del método de las rebanadas, se facilita el análisis de terrenos en el que el material no es homogéneo, puesto que solo es necesario definir las rebanadas de manera adecuada al terreno.

Se aplican dos hipótesis simplificadoras a las rebanadas: en primer lugar, se considera que las rebanadas son suficientemente estrechas para poder considerar que la base de cada rebanada es rectilínea; en segundo lugar, se considera que la base de cada rebanada está afectada únicamente por un tipo de material.

En la figura de a continuación (Figura 1.4.) se muestran las fuerzas aplicadas sobre una rebanada.

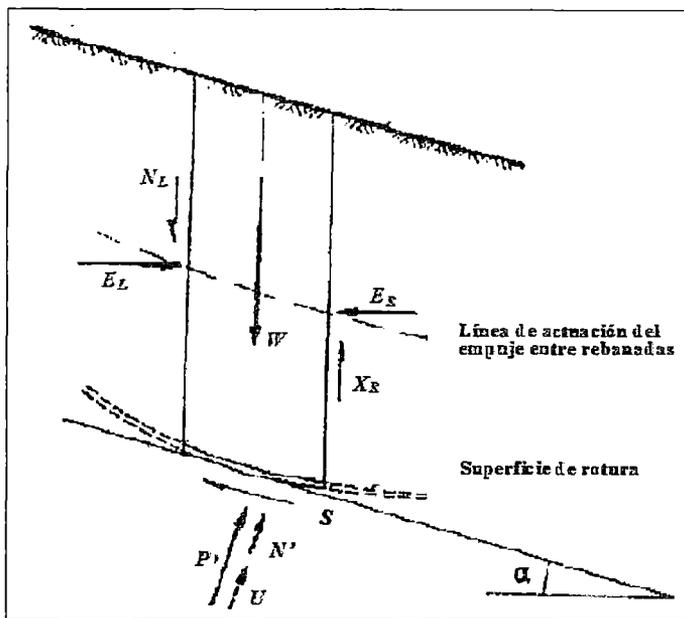


Figura N° 1.4 Esquema de las fuerzas que actúan sobre una rebanada (Alonso Pérez Eduardo, Estabilidad de Taludes, Edición 2005, Catalunya, España, 2005).

ER y XR son las fuerzas actuantes en la parte derecha, y EL XL son las fuerzas actuantes en la parte izquierda. P, N', U y S, son las fuerzas actuantes en la base de la rebanada (Figura N° 1.4).

Desde el punto de vista teórico, los métodos de las rebanadas se pueden clasificar dependiendo de las condiciones de equilibrio estático que se consideran, y dependiendo de las hipótesis sobre las fuerzas entre rebanadas. En el cuadro 1.1 se presentan las condiciones de equilibrio que satisfacen algunos de los métodos utilizados con más frecuencia y que se pueden denominar como casos específicos del método general de equilibrio límite (General Limit Equilibrium method - GLE).

Cuadro Nº 1.1 Ecuaciones de equilibrio satisfechas por los métodos de equilibrio límite más utilizados (Alonso Pérez Eduardo, Estabilidad de Taludes, Edición 2005, Catalunya, España, 2005).

Métodos de Equilibrio Límite	Equilibrio Vertical de Fuerzas	Equilibrio Horizontal de Fuerzas	Equilibrio de Fuerzas	Equilibrio de Momentos
Fellenius (Ordinario) (1927)	Si	No	No	Si
Bishop Modificado (1955)	Si	No	No	Si
Janbu Generalizado (1968)	Si	Si	Si	Si *
Spencer (1967)	Si	Si	Si	Si
Morgenster-Price (1965)	Si	Si	Si	Si
GLE	Si	Si	Si	Si
Corps of Engineers (1970)	Si	Si	Si	No
Lowe-Karafiath (1960)	Si	Si	Si	No
Sarma (1973)	Si	Si	Si	Si

* Se cumple el equilibrio de momentos a nivel de rebanada.

El número de ecuaciones de equilibrio disponibles es menor que el número de incógnitas. Como consecuencia, los métodos que no son rigurosos desde el punto de vista de equilibrio de fuerzas o momentos, emplean hipótesis adicionales para resolver el problema. Se sabe, que en los métodos que satisfacen todas las ecuaciones de equilibrio, las hipótesis que incorporan, en general, no afectan significativamente el valor del factor de seguridad. En el caso de métodos que solo satisfacen el equilibrio de fuerzas y no el de momentos, el valor del factor de seguridad, viene afectado por la hipótesis de inclinación de las fuerzas entre rebanadas. Como consecuencia, estos métodos no dan siempre un grado de precisión tan elevado como los métodos que satisfacen todas las ecuaciones de equilibrio.

En el Cuadro 1.2, se muestra las hipótesis sobre fuerzas entre rebanadas, además del tipo de deslizamiento que se puede aplicar para cada uno de los métodos de rebanadas más utilizados.

Cuadro N° 1.2 Hipótesis de fuerzas entre rebanadas de distintos métodos de equilibrio límite (Alonso Pérez Eduardo, Estabilidad de Taludes, Edición 1989, España, 1989).

Métodos de equilibrio límite	Hipótesis
Fellenius (Ordinario) (1927)	Supone que las fuerzas entre rebanadas se anulan entre sí. Solo para deslizamiento circular.
Bishop Modificado (1955)	La fuerza resultante entre rebanadas es horizontal (significa que no hay fuerza tangencial entre rebanadas) Solo para deslizamiento circular
Janbu Generalizado (1968)	La posición de la fuerza normal entre rebanadas se define con la línea de empuje y se puede variar, es decir cambiar la posición de la fuerzas resultantes entre rebanadas. Para cualquier superficie de deslizamiento.
Spencer (1967)	Las fuerzas resultantes entre rebanadas son paralelas. Cualquier superficie de deslizamiento.
Morgenstern-Price (1965)	La dirección de las fuerzas resultantes entre rebanadas se define mediante la función predeterminada y se puede variar la orientación, el porcentaje de la función utilizada se resuelva mediante equilibrio de fuerzas y momentos. Cualquier superficie de deslizamiento.
GLE	La dirección de las fuerzas resultantes entre rebanadas se define mediante la función predeterminada, el porcentaje de la función requerido para satisfacer el equilibrio de momentos y fuerzas se define buscando el punto de intersección en el diagrama factor de seguridad vs porcentaje de la función.
Corps of Engineers (1970)	Las direcciones de las fuerzas resultantes entre rebanadas se suponen paralelas al ángulo medio de la superficie del talud o a la línea definida por los puntos de entrada y salida de la línea de deslizamiento en el terreno. Cualquier superficie de deslizamiento.
Lowe-Karafiath (1960)	Las direcciones de las fuerzas resultantes entre rebanadas se suponen iguales al promedio de la superficie del terreno y superficie de deslizamiento en la base de cada rebanada. Cualquier superficie de deslizamiento.
Sarma (1973)	Los valores de las fuerza resultantes entre rebanadas siguen ciertas pautas predeterminadas. Cualquier superficie de deslizamiento.

A continuación se explica con detalle las hipótesis y características de los métodos de las rebanadas que usaremos en el análisis de estabilidad de la presa Yanacocha.

Método de Spencer

Inicialmente pensado para el análisis de superficies de rotura circulares, el método de Spencer (1967) puede ser aplicado a superficies no circulares siempre que se adopte un centro de rotación friccional. En este método se suponen todas las fuerzas entre elementos (Figura 1.5).

W cargas verticales externas, EL y ER las fuerzas normales izquierda y derecha entre rebanadas; XL y XR fuerzas verticales entre rebanadas a

izquierda y derecha; P y S son la fuerza normal y tangencial a la base de la rebanada.

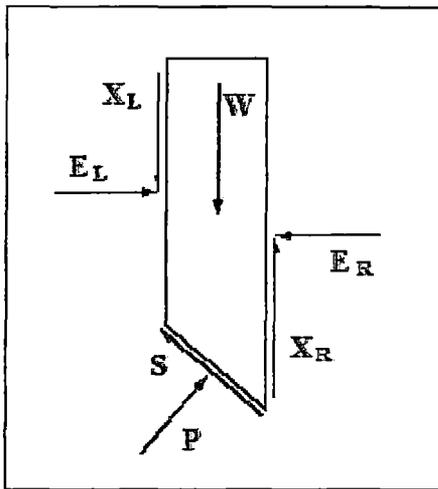


Figura N° 1.5 Representación de las fuerzas actuantes en una rebanada consideradas en el método de Spencer y Morgenstein-Price (Alonso Pérez Eduardo, Estabilidad de Taludes, Edición 1989, España, 1989).

También se supone que las fuerzas entre rebanadas tienen una inclinación constante (θ) a lo largo de toda la recta, de forma que:

$$X / E = \tan\theta \quad (1.2)$$

Dónde X son las fuerzas verticales y E las horizontales. La fuerza normal en la base del elemento se sustenta:

$$P = \left[W(E_R - E_L) * \tan\theta - \frac{1}{FS} (c'l \sin i - ul \tan \varphi' \sin i) \right] / m_i \quad (1.3)$$

$$\text{Dónde} \quad m_i = \cos i \cdot \left(1 + \tan i \cdot \frac{\tan \varphi'}{F} \right) \quad (1.4)$$

Dónde FS es el factor de Seguridad definido como la tensión de corte movilizada respecto a la disponible; ER y EL son las fuerzas horizontales derecha e izquierda respectivamente, entre los elementos de la rebanada. "u" es la presión de poro en la superficie de rotura, "l" es la longitud de la base de la rebanada, "i" la inclinación de la base del elemento, c' y φ' la cohesión y el ángulo de fricción en la superficie de rotura. Suponiendo que el ángulo θ es constante para todos los elementos de la vertiente, se

pueden hacer el equilibrio global de momentos y el de fuerzas, de manera que se encuentran dos valores del Factor de Seguridad, el del equilibrio de fuerzas (F_f) y el de momentos (F_m). Se puede encontrar un valor de θ tal que ambos factores de seguridad coincidan, que será el Factor de seguridad de la vertiente. Spencer estudió la relación entre F_f y F_m en un problema tipo. Dedujo que el factor de seguridad resultante del equilibrio de momentos es relativamente insensible a los fuerzas entre elementos. Esta conclusión es coincidente con la de Bishop.

Método de Morgenstern-Price.

El método de análisis desarrollado por Morgenstern y Price (1965), puede ser aplicado tanto a superficies de roturas circulares como no circulares. Es un método parecido al método de Spencer, pero en el caso de Morgenstern-Price permite la especificación de las fuerzas entre rebanadas. El esquema de fuerzas entre rebanadas es el mismo que para el método de Spencer (Figura 1.5). Considera por ejemplo que las tensiones y las fuerzas varían continuamente en la superficie. Resuelve además las componentes normal y paralela a la base para cada elemento formulando ecuaciones de equilibrio de fuerza generales. Por lo tanto supone que existe la siguiente relación entre esta componente vertical y normal:

$$X E = \lambda \cdot f(x) \quad (1.5)$$

Dónde $f(x)$ es la función que varía de forma continua a lo largo de la línea, y λ es un valor escala. Para una función dada $f(x)$, los valores de λ y F se encuentran de forma que se cumplan los equilibrios globales de Momentos y Fuerzas. De esta forma $F=F_m=F_f$.

Para escoger $f(x)$ se puede hacer considerando la distribución de tensiones normales a los límites de los elementos. En general no tiene que haber tensiones efectivas de tracción y las tensiones de corte deben ser menores a las requeridas por el equilibrio crítico local.

1.3 TEORÍA SOBRE FILTRACIÓN EN REPRESAS DE TIERRA.

Los suelos tienen vacíos interconectados a través de los cuales el agua puede fluir de un punto de alta energía a puntos de baja energía. El estudio del flujo de agua a través de un suelo con medio poroso es importante en la mecánica de suelos, siendo necesario para estimar la cantidad de infiltración subterránea bajo varias condiciones hidráulicas, esto para investigar problemas que implican el bombeo del agua para construcciones subterráneas y para el análisis de estabilidad de las presas de tierra. (Braja M. Das, Fundamentos de ingeniería geotécnica, segunda edición, México, pag. 79).

El flujo de agua infiltrada a través de una presa de materiales sueltos o de su cimiento produce los siguientes efectos:

Uno directo que es de pérdida de agua, que suele ser el menos importante y más fácil de controlar y subsanar.

Un estado de presiones internas con componentes opuestas al efecto estabilizador del peso. Además, al estar mojados los materiales, disminuye su cohesión y su resistencia al rozamiento, añadiéndose así estos efectos al de las componentes desestabilizadoras de las presiones internas.

El paso de las aguas a través de las zonas con materiales finos tienden a arrastrar esas partículas, esto con el consiguiente peligro de erosión interna progresiva. Dicho fenómeno se llama sifonamiento. (Vallarino Eugenio, Tratado básico de presas, 5ta edición tomo, España, pag. 377.)

De los efectos mencionados anteriormente, el más peligroso es el sifonamiento que afecta directamente a la integridad de la presa. Siendo así una de las principales causas de la rotura de este tipo de presa.

1.3.1 Flujo de agua en los suelos.

Al tratar con el tema de permeabilidad de los suelos, es necesario mantener en mente los conceptos más importantes referentes al estado energético del agua.

Existen varios fenómenos que tienen relación directa con la permeabilidad de los suelos; ya que es un valor altamente alterable que depende de la naturaleza del suelo, de sus características mecánicas y de las fuerzas de la superficie cuando el tamaño de partículas principal es el correspondiente a finos.

Fenómeno capilar en suelos.

El fenómeno capilar en suelos es la respuesta a las fuerzas de cohesión y adhesión que se generan en los líquidos de la interface con un cuerpo sólido.

Cohesión y adhesión.

Las fuerzas básicas responsables de la retención y movimiento del agua en el suelo, se define como cohesión y adhesión. La fuerza de cohesión es la atracción entre moléculas de agua, mientras la adhesión es la atracción de las moléculas con la superficie sólidas. En tal sentido la fuerza de adhesión hace que algunas moléculas de agua estén rígidamente unidas a las partículas de suelo llamándose agua absorbida, en cambio las moléculas unidas por fuerzas de cohesión sobre superficie de los granos de suelo pueden ser fácilmente removidas. Así las fuerzas de cohesión y adhesión juntas regulan el movimiento del agua, de tal forma que en suelos arcillosos la adhesión y cohesión ejercen sus fuerzas sobre sus propiedades de plasticidad.

Permeabilidad en los Suelos.

La permeabilidad de los suelos dependen de varios factores: viscosidad de fluido, distribución del tamaño de poros, distribución granulométrica, relación de vacíos, rugosidad de las partículas minerales y grado de saturación del suelo. En los suelos arcillosos, la estructura juega un papel importante en la permeabilidad. (Braja M. Das, Fundamentos de ingeniería geotécnica, segunda edición, pag. 83). En tal sentido es la facilidad o dificultad que tiene un suelo de permitir que lo atraviese el agua a través de

sus vacíos. Esto permite clasificar los suelos en: suelos permeables y suelos impermeables, la permeabilidad está influenciada por el tamaño de las partículas, espacio de los vanos y la estructura del suelo. El cuadro N° 1.3 muestran los valores típicos de permeabilidad para diferentes tipos de suelos.

Cuadro N° 1.3 Valores de permeabilidad por tipo de suelo: A. Casagrande (Juárez Badillo, Mecánica de Suelos, Pág.198)

Tipos de suelo	Grado relativo de permeabilidad	Coefficiente de permeabilidad K (cm./seg.)	Propiedades de drenajes
Grava limpia	Alto	1×10^{-1}	Buena
Arena limpia	Medio	1×10^{-3}	Buena
Grava arenosa	Medio	1×10^{-3}	Buena
Arena fina	Bajo	1×10^{-3} a 1×10^{-5}	Franca a pobre
Limos	Bajo	1×10^{-3} a 1×10^{-5}	Franca a pobre
Arena limo arcilloso	Muy bajo	1×10^{-4} a 1×10^{-7}	Pobre o prácticamente imperceptible
Arcilla homogénea	Muy bajo a prácticamente impermeable	$< 1 \times 10^{-7}$	Prácticamente imperceptible

Los factores más importantes que intervienen en la permeabilidad.

La relación de vacíos del suelo.

El espacio de los vanos es proporcional al tamaño de la partícula. En otras palabras, a mayor tamaño mayor cantidad de vanos.

La estructura y estratificación del suelo.

En un suelo se pueden encontrar diferentes permeabilidades en estado inalterado y remoldeado, aun cuando la relación de vacíos sea la misma en ambos casos. Esto puede ser debido a los cambios en la estructura y estratificación del suelo inalterado o una combinación de los factores. La permeabilización sufre variaciones debido a que en el remoldeo quedan libres algunas partículas del suelo y al fluir el agua, ésta las mueve y las reacomoda, tapando los canales o arrastrándolas a la superficie o al exterior de la muestra causando turbidez en el agua.

Tamaño de las partículas.

La permeabilidad de un suelo será más baja cuando más pequeñas sean sus partículas, pues menor serán los vacíos que forman los canales de flujo. Además la permeabilidad en algunos suelos es provocada por arrastre de sus finos, causando filtración.

Grado de saturación.

Es la relación entre el volumen de agua y el volumen de vacíos de una muestra de suelo; mientras mayor sea el grado de saturación mayor será la permeabilidad, debido a la reducción en los canales disponibles al flujo del agua (Lambe William, Mecánica de suelos, Pág. 309)

Polaridad.

Depende de la movilidad del flujo que rodea a las partículas de suelo y del movimiento del fluido en dirección opuesta al flujo neto debido al potencial eléctrico generado por la filtración. En el intercambio catiónico se produce procesos reversibles en las cuales las partículas sólidas del suelo se unen a iones de la fase acuosa expulsando al mismo tiempo cantidades iguales de otro catión generando así un equilibrio entre estos dos procesos y, una compensación de cargas positivas por parte de los aniones que están presentes en la masa del suelo.

Densidad del suelo.

La densidad relativa es una propiedad índice de los suelos y se emplea normalmente en gravas y arenas, es decir, en suelos que contienen casi exclusivamente partículas mayores a 0.074 mm (malla #200). La densidad relativa es una manera de indicar el grado de compacidad (compactación) de un suelo y se puede emplear tanto para suelos en estado natural como para rellenos compactados artificialmente.

Peso específico.

En un suelo real es normal que los minerales de fracciones muy finas y coloidales tengan su peso específico mayor que los minerales de la fracción más gruesa. (Juárez Badillo Eulalio y Rico Rodríguez Alfonso,

Mecánica de suelos: Fundamentos de la mecánica de suelos I, tomo 1, 1980, Pág. 77) A mayor peso específico será menor la permeabilidad.

Redes de flujo.

Si se considera el flujo que pasa por el elemento de suelo mostrado en la Figura N° 1.6 se observa lo siguiente:

$$q_x + dq_x = k_x \frac{\delta h}{\delta x} dy + k_x \frac{\delta^2 h}{\delta x^2} dy dx \quad (1.6)$$

$$q_y + dq_y = k_y \frac{\delta h}{\delta y} dx + k_y \frac{\delta^2 h}{\delta y^2} dx dy \quad (1.7)$$

Donde h es la carga hidráulica y "x" e "y" son las coordenadas correspondientes en un sistema bidimensional.

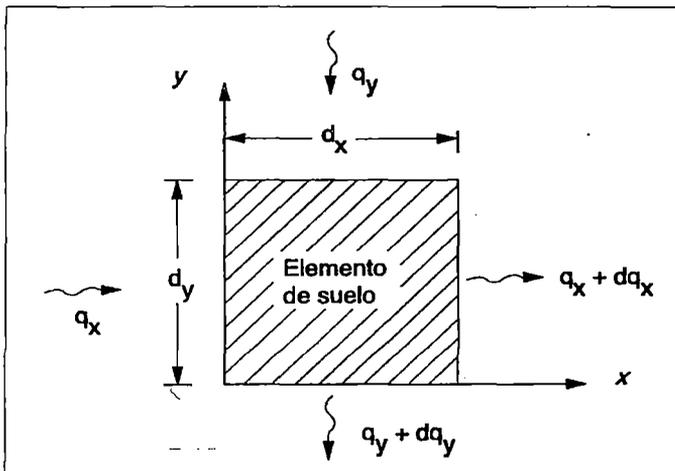


Figura N° 1.6 Consideraciones de flujo en dos dimensiones, establecidos a través de un elemento de suelo (Flores Berrones Raúl, Flujo de agua a través de suelos, 4ª. Edición, México, 2000, pág. 27).

Si el flujo se establece, la diferencia entre el gasto que sale de las caras del elemento y el que entra, debe ser igual a cero, es decir por condición de continuidad se tiene:

$$k_x \frac{\delta^2 h}{\delta x^2} dy dx + k_y \frac{\delta^2 h}{\delta y^2} dx dy = 0 \quad (1.8)$$

Al reducir la expresión anterior queda:

$$k_x \frac{\delta^2 h}{\delta x^2} + k_y \frac{\delta^2 h}{\delta y^2} = 0 \quad (1.9)$$

Si el suelo es isotrópico $k_x = k_y$, y la expresión anterior queda:

$$\frac{\delta^2 h}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 h}{\delta y^2} = 0 \quad (1.10)$$

Que es la ecuación de Laplace. Si las condiciones mostradas en la Figura N° 1.6, las extendemos a tres dimensiones, tendremos la condición mas general de flujo establecido estará dada por:

$$\frac{\delta^2 h}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 h}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 h}{\delta z^2} = 0 \quad (1.11)$$

Para el caso más común en presas, el problema de flujo se puede simplificar en un sistema bidimensional, por lo que la expresión a considerar es la Ec. Núm. 1.10.

La solución a esta última ecuación está representada gráficamente por un par de familias de curvas que se intersectan entre sí en ángulos rectos (Figura N° 1.7). Esa solución, con condiciones de frontera apropiadas da la variación de carga hidráulica y, por lo tanto la dirección de escurrimiento en todo punto de la zona de flujo. En hidromecánica estas curvas se conocen como líneas de flujo y líneas equipotenciales (o de igual carga hidráulica), respectivamente. (Flores Berrones Raúl, Flujo de agua a través de suelos, 4ª. Edición, México, 2000, pág. 28).

Una combinación de varias líneas de flujo y equipotenciales se llama red de flujo (Figura N° 1.7). Las redes de flujo se calculan para determinar el flujo del agua en el medio considerado. Para completar la construcción de una red de flujo, se deben dibujar las líneas de flujo y equipotenciales de manera que las equipotenciales crucen a las de flujo según ángulos rectos y que los elementos de flujo formados sean aproximadamente cuadrados

(Braja M. Das, Fundamentos de ingeniería geotécnica, segunda edición, pag. 99).

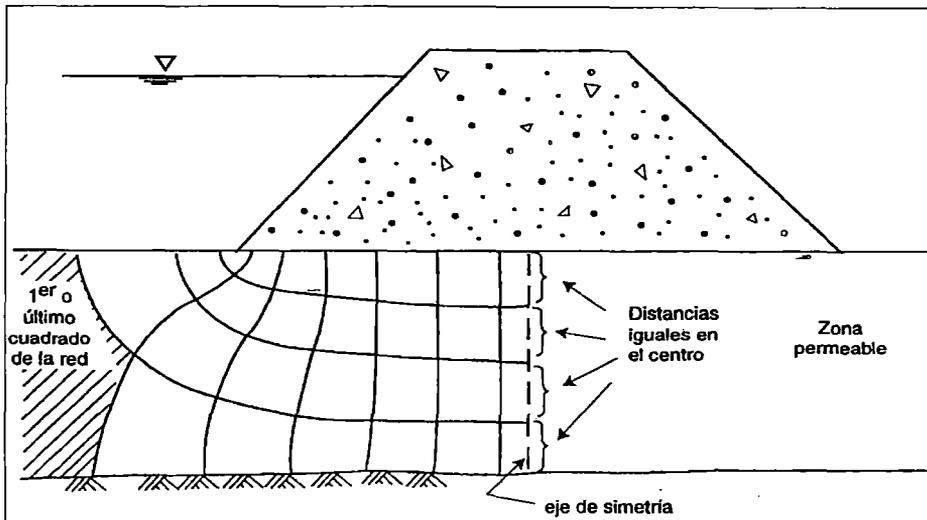


Figura N° 1.7 Redes de flujo en una represa (Flores Berrones Raúl, Flujo de agua a través de suelos, 4ª. Edición, México, 2000, pág. 32).

Condiciones de frontera.

El primer paso para resolver un problema de flujo es la especificación de las condiciones de frontera, para lo cual es necesario determinar las características geométricas e hidráulicas de las superficies externas que delimitan el dominio de flujo. En los casos de flujo bidimensional, una sección del medio en la dirección del flujo es representativa de las condiciones de cualquier otra, y aquellas superficies se reducen a líneas. Se presenta a continuación un resumen de las condiciones de frontera:

Frontera suelo infiltrado – suelo impermeable (frontera impermeable).- A través de una frontera de este tipo el agua no puede fluir. Por lo tanto, los componentes normales de la velocidad son nulos a lo largo de ella y dicha frontera define una línea de flujo.

En las figuras 1.7 y 1.8, se muestran ejemplos frontera impermeable, pues se supone que la permeabilidad del material que constituye la estructura de la figura 1.7 es despreciable en comparación con la del suelo de cimentación, en la figura 1.8 la permeabilidad del suelo o roca de igual

forma se considera despreciable en comparación con la del suelo que constituye la presa.

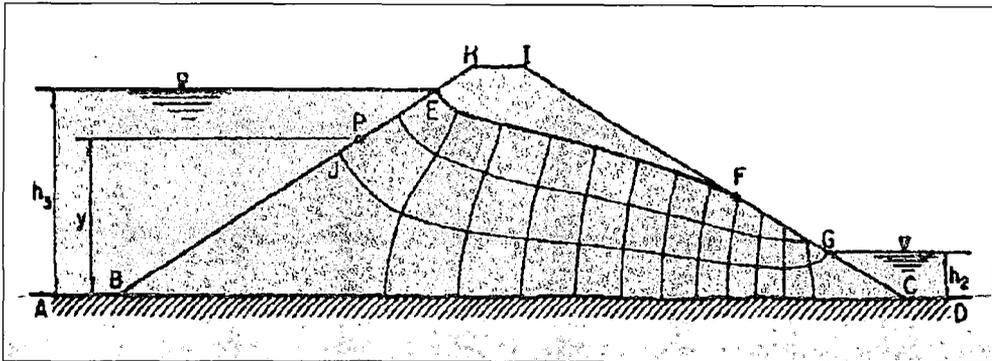


Figura N° 1.8 Flujo no confinado a través de una presa (Marsal y Resendiz Núñez, 1975).

Frontera agua – suelo infiltrado.- Estas fronteras son ejemplificadas en la figura N° 1.8 por “BE” y “CG”. En vista de que el flujo de agua en suelos, la altura de la velocidad es despreciable, la distribución de presión en las fronteras agua – suelo infiltrado puede considerarse hidrostática. Entonces en un punto cualquiera de ellas, por ejemplo en el punto “P” de la figura N° 1.8, la altura de la presión ($h_3 - y$) y la altura de posición es “y”, por lo tanto en cualquier punto de la frontera “BE” la carga hidráulica total será: $(h_3 - y) + y = h_3$. Por lo tanto en toda la frontera agua suelo infiltrado es constante, así pues cada una de estas fronteras es una línea equipotencial.

Frontera suelo infiltrado – suelo no infiltrado (línea superior de flujo).- En la figura N° 1.8 la línea “EF” separa, dentro de la misma masa de suelo “BHIC”, la zona de flujo “BEFGC” de la porción de suelo que teóricamente no es infiltrado por el agua que fluye de un lado a otro de la presa. La presión en la línea “EF” es constante (igual a la atmosférica) y, siendo despreciable la altura de la velocidad, la carga hidráulica total de dicha línea es $h = y$, lo que indica que la carga hidráulica de las líneas equipotenciales que corten con la línea superior de flujo será idéntica a la elevación del punto de intersección.

Frontera suelo infiltrado – aire (línea de descarga libre).- La línea “FG” de la figura N° 1.8 es una frontera de este tipo. En ella, como en la línea superior de flujo, la caga hidráulica es igual a la de la posición, se cumple $h = y$. sin embargo, “FG” no es línea de flujo, aunque tampoco es equipotencial, es simplemente una cara de descarga libre.

Líneas Equipotenciales y líneas de corriente.

Este método grafico de redes de flujo es aplicable para flujo bidimensional y en ciertos casos de flujo tridimensional con simetría axial. Este método tiene la ventaja de desarrollar en quien lo utiliza sistemáticamente una clara concepción física de las características generales del flujo de agua en los suelos y sus detalles más significativos.

La solución en un dominio de flujo homogéneo e isotrópico esta representada geoméricamente por lo que se llama red de flujo, formada por una infinidad de curvas pertenecientes a dos familias mutuamente ortogonales: las de flujo o corriente y las equipotenciales. De este modo se obtiene una red formada por $n_f = q/\Delta q$ canales de flujo y $n_e = h/\Delta q$ caídas de potencial, donde q es el caudal total a través de la zona de flujo y h es la diferencia de carga hidráulica entre las equipotenciales extremas. Considérese una un rectángulo cualquiera de la red de flujo resultante (Figura N° 1.9).

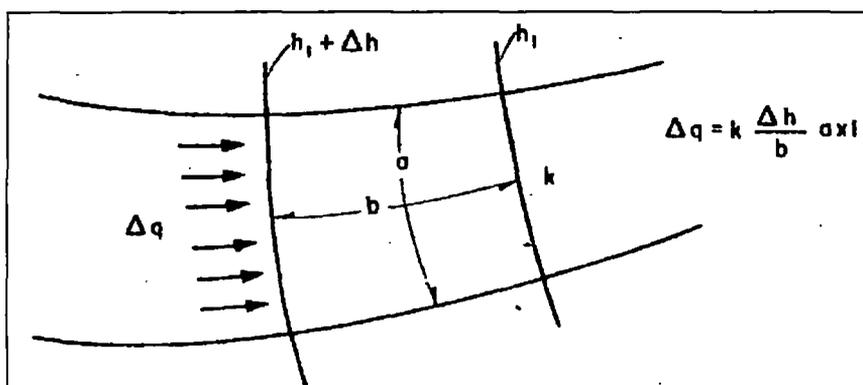


Figura N° 1.9 Condiciones de entrada y salida de la línea superior de flujo (Casagrande, 1925-1940).

Por la ley de Darcy, el caudal que pasa a través de él es:

$$\Delta q = K \frac{\Delta h}{b} ax1 = K \frac{h}{n_e} \frac{a}{b} \quad (1.12)$$

Se considera que el espesor del tubo de flujo en la dirección perpendicular al plano de la figura es unitario. Dónde:

$$q = n_f \Delta q = Kh \frac{n_f}{n_e} \frac{a}{b} \quad (1.13)$$

Determinación de la línea superior de flujo y línea de descarga.

En el caso de flujo no confinado, deben definirse en primer lugar las líneas de saturación y la descarga libre. Existen distintos métodos para la determinación de ambas líneas se muestran a continuación los distintos métodos propuestos por el U.S Army Corps of Engineers (1986).

En la figura N° 1.10 se muestra las características básicas de los métodos para determinación de la línea superior de flujo y la línea de descarga.

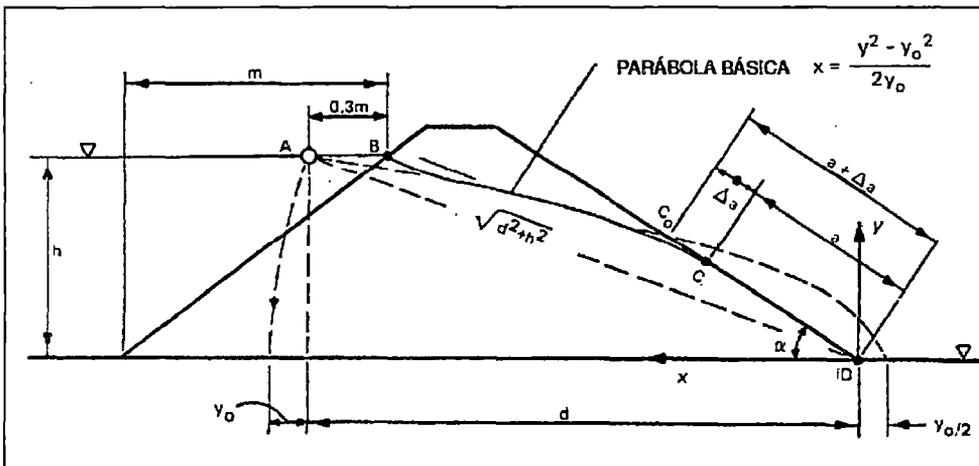


Figura N° 1.10 Determinación de la línea de filtración y flujo de salida para terraplén sobre fundación impermeable (U.S Army Corps of Engineers, 1986).

En el cuadro N° 1.4 se muestra los diferentes métodos de cálculo para la determinación de la línea superior de flujo y la línea de descarga, para el presente trabajo solo se explicara el método de Kozeny.

Cuadro N° 1.4 Diferentes métodos de cálculo para la determinación de la línea superior de flujo y la línea de descarga (adaptada de la New England Waterworks Association).

α	Método	Ecuaciones
$< 30^\circ$	Schaffernak Van Iterson	$a = \frac{d}{\cos \alpha} - \sqrt{\frac{d^2}{\cos^2 \alpha} - \frac{h^2}{\sin^2 \alpha}}$ $q = k a \operatorname{sen} \alpha \tan \alpha$
$\leq 90^\circ$	L Casagrande	$a = S_0 - \sqrt{S_0^2 - \frac{h^2}{\sin^2 \alpha}}$ Para $\alpha \leq 60^\circ$ usar $S_0 = \sqrt{d^2 + h^2}$ Para $60^\circ < \alpha < 90^\circ$ usar $S_0 = AC \div CD$ $q = k a \operatorname{sen}^2 \alpha$
180°	Kozeny	$a_0 = \frac{y_0}{2} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{d^2 + h^2} - d \right)$ $q = 2ka_0 = ky_0$
30° a 180°	A. Casagrande	Determine $(a + \Delta a)$ como la intersección de la parábola básica y el talud de la presa. Luego determine Δa desde el valor C de la Figura 2.10 $q = k a \operatorname{sen}^2 \alpha$ ó $q = ky_0 = k \left(\sqrt{d^2 + h^2} - d \right)$

Formula de Kozeny para $\alpha=180^\circ$.

Para el caso de una horizontal de descarga (figura N° 1.11 a) existe una solución rigurosa de la ecuación de Laplace, dada por kozeny en 1931. En este caso las líneas de flujo y las líneas equipotenciales son parábolas con foco común en el O (figura N° 1.11 a). Excepto por la corrección a la entrada, la ecuación de la línea superior de flujo es:

$$x = \frac{y^2 - y_0^2}{2y_0} \quad (1.14)$$

Dónde:

$$q = K y_0 \left. \frac{dy}{dx} \right|_{x=0} = K y_0 = 2K a_0 \quad (1.15)$$

Los puntos D y E determinados por la ecuación 1.15 pueden hallarse por el procedimiento gráfico que se indica en la figura N° 1.11 b.

En este caso, el caudal por unidad de longitud resulta la siguiente:

$$y_0 = 2a_0 = \sqrt{d^2 + h^2} - d \quad (1.16)$$

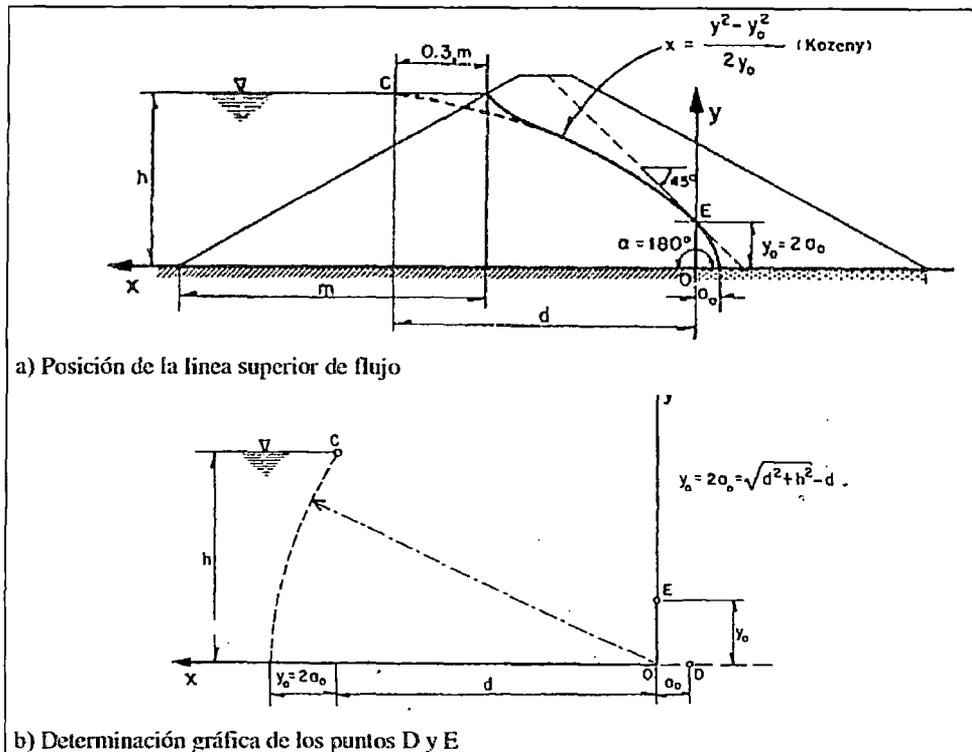


Figura N° 1.11 Solución de Kozeny para $\alpha=180^\circ$ (Marsal y Resendiz Núñez, 1975).

1.3.2 Filtraciones en la cimentación.

Las fallas que se pueden presentar en estructuras hidráulicas de los tipos usados en los sistemas de riego, drenaje, suministro de agua, et., suelen causar perjuicios en general nada despreciables. Las fallas como las socavaciones bajo las estructuras se advierten desafortunadamente en épocas críticas de niveles altos de crecientes o en situaciones semejantes,

cuando el deterioro está muy avanzado y en circunstancias en las que ya es muy difícil adelantar reparaciones seguras.

Una estructura como un dique o azud con carga hidráulica delante de ella (H), induce un flujo a través del suelo de la fundación y el fluido aparecerá aguas abajo, a menos que se interponga una barrera totalmente impermeable, que una la estructura con un estrato igualmente impermeable. Este flujo es de tipo laminar. En este medio el suelo de fundación se comporta como una red de innumerables conductos irregulares, de diferentes longitudes y de secciones transversales muy pequeñas, que presentan una gran resistencia al flujo, con pérdidas de carga por fricción muy altas. Con el tiempo se puede presentar el fenómeno de erosión de estos. Muchos diques y estructuras han fallado por la formación, aparentemente súbita, de un túnel o sifón de descarga que ha aparecido en el suelo de su fundación. El torrente erosiona progresivamente el túnel y aumenta sus dimensiones hasta que la estructura se queda sin apoyo, se desploma y se destruye. Esta falla se conoce como "rotura por tubificación" o por "sifonaje".

Partiendo de una masa de suelo en equilibrio y de una carga estática de agua "H" aguas arriba de la estructura, el peso mismo del suelo ejerce aguas abajo una presión que se opone a la presión de filtración del agua. Cuando el suelo de aguas abajo, en el pie de la estructura, se erosiona y es lavado por la corriente del cauce, se elimina el equilibrio y se inicia el arrastre de las partículas más finas y la tubificación avanza hacia aguas arriba hasta atravesar totalmente el suelo de fundación; finalmente se presenta el colapso del suelo y de la estructura.

El fenómeno de la filtración o percolación no deja de ser complejo y existen dos escuelas o tendencias para analizarlo. Una sostiene que el flujo se presenta principalmente a través del suelo mismo. La otra asegura que la trayectoria que ofrece la menor resistencia al flujo es la que sigue la superficie de contacto entre la estructura y el suelo, por ser allí menor la adherencia suelo-estructura.

La segunda escuela ha ido evolucionando con el tiempo, fue de amplio uso y aún se presenta en la literatura técnica, como es el propuesto por Bligh. Actualmente se aplica con resultados satisfactorios la Teoría de Lane, en estructuras corrientes de hormigón y en presas bajas. Para presas grandes debe hacerse un estudio más detallado.

La cota del suelo que actúa como fuerza favorable para evitar el fenómeno de la tubificación, es aquella que no considera la socavación propia que genera la estructura sobre el cauce mismo; cuando ya existe o se estima su magnitud, la carga "H" de agua deberá considerar la profundidad de socavación, generalmente para la condición más crítica, aquella cuando no hay vertimiento del fluido sobre la presa.

Para que un flujo que inicia su recorrido en el punto "A" llegue al punto final "h", sin energía que pueda arrastrar las partículas finas del suelo, se debe consumir la totalidad de la carga hidráulica "H" en su recorrido, en la forma de pérdidas por fricción. Esta pérdida total se puede expresar como: $H = S \times L$ en la cual "S" es la pendiente hidráulica y "L" el recorrido total.

Lane recomienda tomar como "L", no la longitud real del trayecto, sino una longitud efectiva "Lp", llamada "longitud ponderada de percolación", que es la suma de todos los recorridos verticales o de inclinación no menor de 45 grados con respecto a la horizontal, más un tercio de la suma de todos los recorridos horizontales o de pendiente menor de 45 grados:

$$LP = L_v + \frac{L_h}{3} \quad (1.17)$$

Dónde:

Lv= Suma de las distancias verticales o muy inclinadas.

Lh= Suma de las distancias horizontales o muy tendidas.

El coeficiente de Lane "C" varía según el tipo de suelo de fundación. Introduciendo en la función de pérdida total el coeficiente de Lane, el concepto de longitud ponderada queda $H = S \times L = L_p / C$, de donde: $L_p = C \times H$.

En el caso en que "H" y "C" estén definidos, se deduce la magnitud del camino ponderado requerido "Lp". Debe entenderse este como un valor mínimo. Desde luego, una magnitud mayor brindará más seguridad a la estructura, casi siempre condicionada por el cálculo hidráulico, se le pueden agregar dos o más dientes para alcanzar el valor deseado de Lp.

Método de Bligh.

El objetivo de este método es alargar el recorrido del agua lo suficiente para conseguir una velocidad inofensiva.

La velocidad del flujo subterráneo se calcula como:

$$V = K * (Z/L); V = Ki, \text{ donde: } \quad (1.18)$$

V = Velocidad.

i = Z/L = Gradiente hidráulico.

K = Coeficiente de permeabilidad del suelo.

Se asume que la permeabilidad del suelo es igual en sentido horizontal y vertical. En Cuadro N° 1.5 se presentan algunos coeficientes de permeabilidad para diferentes tipos de suelos.

Se debe cumplir la condición $L = (K/L) * Z = C * Z$, donde "C" es el coeficiente que depende de la clase de terreno y de la fundación usada.

Cuadro N° 1.5 Valores del coeficiente "C" para los métodos de Bligh, lane y Komov (García Vélez José, Diseño hidráulico de estructuras, Universidad del Valle).

Material	Bligh	Lane	Komov
Árenas finas y limos.	15 - 18	7 - 8.5	8 - 10
Árenas comunes.	9 - 12	5 - 6	6 - 7
Canto rodado, grava y arena.	4 - 9	2.5 - 4	3 - 6
Suelos arcillosos.	6 - 7	1.6 - 3	3 - 6

Método de Lane (Filtración Compensada).

La permeabilidad de un suelo es diferente en sentido vertical y horizontal. Los suelos sedimentados se forman por depósitos sucesivos de diferentes materiales y generalmente consisten en capas horizontales de diferente espesor y diferente permeabilidad (K_h y K_v).

Lane (1935) propuso para calcular la longitud total de la fundación de recorrido del agua (L), la siguiente expresión:

$$L = \frac{1}{3}N + V \geq C * Z \quad (1.19)$$

N = Longitud de contactos horizontales o que hacen un ángulo menor de 45° con la horizontal.

V = Longitud de contactos verticales o que hacen un ángulo mayor de 45° con la horizontal.

C = Coeficiente de Lane que depende del terreno.

Al calcular la disipación de la presión se debe tomar en cuenta las pérdidas de presión tanto vertical como horizontal, calculadas así:

$$H_v = \frac{V}{C} \quad (1.20)$$

$$H_h = \frac{N}{3C} \quad (1.21)$$

CAPÍTULO II: ESTUDIOS BÁSICOS DE LA PRESA YANACOCHA

2.1 ESTUDIO DE GEOLOGÍA LOCAL Y REGIONAL DE LA PRESA YANACOCHA.

2.1.1 Geología regional.

El Departamento de Pasco se ubica en la región natural andina, sobre la cordillera de los andes centrales, donde el sistema orogénico andino por efecto de los plegamientos geológicos forma el llamado «Nudo de Pasco». Los movimientos orogénicos de la Edad Cretácico Terciaria han sido los principales responsables del modelado actual de la Región con la deformación de las rocas Paleozoicas y Mesozoicas, como resultado se tienen elevados cerros. Posteriormente en determinadas zonas de debilidad formadas por fallas tectónicas y geológicas se han erosionado formando terrazas de materiales cuaternarios.

En la provincia de Pasco se observa la presencia de las cadenas de montaña, que sirve de límite natural entre los departamentos de Pasco y Lima. Delimita los Sistemas Hidrográficos del Pacífico y del Atlántico, definiendo así las características geográficas locales.

La Cordillera Occidental, atraviesa la provincia con altitudes que varían entre los 2300 a 6000 m.s.n.m. su presencia da origen a una variedad de nevados, lagunas y ríos que se expanden por el territorio provincial.

2.1.2 Geología local

El área de estudio se encuentra dentro de la zona de influencia de las rocas sedimentarias del grupo Pucará, específicamente del último miembro que es la formación Condorsinga, conformada por calizas micríticas de color gris a beige, generalmente dispuesta en estratos delgados entre 10 a 30 cm de grosor, con superficies de estratificación algo onduladas, paralelas y discontinuas. En algunos casos, tienen intercalaciones de limo arcillosas delgadas, con grosores menores de 10 cm, de colores gris claro, verdoso a amarillentas.

Geomorfología local

Regionalmente y de acuerdo a las unidades geomorfológicas mencionadas, se pueden diferenciar las siguientes unidades:

Valle estrecho: Unidad morfogénica con una altitud que varía entre los 4000 y 2300 m.s.n.m. Se caracteriza por presentar paisajes de valle aluvial encajonado y cañón; con un relieve de superficie pobremente desarrollado y pendientes fuertemente disectadas.

Cadenas de montaña: Unidad morfogénica con una altitud que varía entre los 4600 y 3300 m.s.n.m. Se caracteriza por presentar paisajes de laderas rocosas, gargantas, barrancos y montañas erosionables; con un relieve de pendiente moderada.

Áreas glaseadas: Unidad morfogénica con una altitud que varía entre los 3900 y 6000 m.s.n.m. Se caracteriza por presentar paisajes de valle fluvio-glaciales, áreas lacustres, circo glacial y morrenas.

Superficie puna: Esta unidad morfogénica tiene una altitud que varía entre los 3800 y 5000 m.s.n.m. Se caracteriza por presentar paisajes de colina erosionadas, cima o cumbre, colinas contiguas, colinas discontinúas, altiplanicie andinas propia de la superficie puna.

Presenta un relieve de superficie que no ha logrado ser superficie llana por completo y ha sido reconocida principalmente por la concordancia de sus cumbres.

Estratigrafía y litología local

En la zona de estudio se pueden identificar las siguientes formaciones geológicas:

Grupo pucará

Esta formación está compuesta por tres sub-formaciones que se ordenan desde la base hasta la parte superior:

Formación Aramachay: Representa la parte intermedia del Grupo Pucará, constituida por calizas y limo arcillitas color marrón oscuro intercalada con calizas grises y negras. Diferenciada por su menor resistencia a la erosión y sobre ella se han desarrollado cultivos y pastos naturales.

Formación Condorsinga: Es la cima del grupo Pucará, este es de estratificación delgada en su base y gruesa hacia la parte superior su resistencia a la erosión es mejor que la unidad inferior. Está constituida por una secuencia de calizas micríticas de color beige, en algunos casos tiene intercalaciones de limo arcillitas delgadas de color amarillento. El grosor de este miembro es de casi 100 metros en toda la región.

Depósitos fluvioglaciares.

Son acumulaciones de gravas semi redondeadas que tienen mayoritariamente de 2 a 6 cm de diámetro. Estas aparecen embaladas en gruesas matrices arenosas y limo arcillosas de depósitos semiconsolidados, que incluyen frecuentes bloques rocosos de varios centímetros a algunos decímetros de grosor. Los depósitos fluvioglaciares se originan a partir de los frentes de acumulación glacial, precisamente cuando las morrenas son retocadas por voluminosas corrientes de fusión, que les dan cierto carácter aluvial, de acumulación semi estratificada y semi redondeada.

Geología estructural.

Estructuralmente, el área de estudio está afectada por una secuencia de pliegues y fallas regionales que tienen una orientación preponderante de noroeste a sureste y las fallas secundarias son casi perpendiculares a las regionales, formando un enrejado.

La geología de la zona de estudio comprende una terraza de materiales fluvio-glaciares donde se ha formado la Laguna Yanacocha y delimitada en ambos lados por afloramientos rocosos (cerros) de la Formación Pucará que tienen una inclinación de 25° Nor oeste en su lado izquierdo y 85° en su lado derecho. Ya casi al final del estancamiento en mención se puede observar en los cerros la presencia de un sinclinal simétrico que hace un corte de orientación de la inclinación de los cerros orientándolos hacia el nor este.

Se presume, que en algún momento de la evolución geológica de la zona de estudio, existió una falla geológica que separó esta cadena de cerros y formó una terraza donde se fueron depositando materiales cuaternarios fluvio-glaciares. Actualmente esta falla es pasiva pues no provoca procesos de fracturamiento del terreno que acarrearían problemas de estancamiento de las aguas de la laguna.

Geología de la laguna Yanacocha

El área del vaso cuenta con un relieve ondulado a seminal, presentando una morfología de depresión cerrada con desagüe hacia la quebrada Yanacocha, esto sobre una base de roca caliza, precisamente donde se originó la laguna Yanacocha.

La forma de la laguna es irregular (arriñonada), cuyo perímetro está conformada por gravas arcillo limosas con vegetación típica de la zona, así mismo se encuentran las morrenas laterales con afloramiento de rocas del basamento. Las pendientes del perímetro del vaso son moderadas con una ligera inclinación hacia el sur oeste. El relieve actual es el resultado de la erosión de las rocas calcáreas por acción glacial y procesos tectónicos de fallamiento y plegamiento.

El basamento rocoso en la zona de la laguna corresponde a la formación Condorsinga del jurásico inferior, con una cobertura de depósitos inconsolidados del cuaternario reciente, cuyos orígenes son principalmente

del proceso de glaciación y desglaciación, originando depósitos fluvio glaciares que se interdigitan con los coluviales en las faldas de los cerros. En base a una prueba de campo que se basó en la aplicación de ácido sulfúrico a los materiales existentes en la zona de estudio (basamento rocoso, depósitos fluvioglaciares, cantera de arcilla, canteras de agregado), se puede notar que todos reaccionaban positivamente lo que indica que son calcáreos.

La falla probable que cruza a la laguna de este a oeste se encuentra cubierta por sedimentos del cuaternario, el cual le sirve de sello e impermeabiliza la cubeta de la laguna, evitando así las infiltraciones que podrían generarse.

De acuerdo a las evaluaciones geológicas realizadas y en base a los resultados de los ensayos de perforación diamantina, se ha encontrado en la parte central del eje de la presa, materiales arcillosos con una permeabilidad muy baja, las cuales sirven como sellado de las fallas y fisuras, además impiden la filtración del agua hacia estratos inferiores provocando una situación de estanque impermeable. En los extremos del vaso se ha encontrado en las perforaciones diamantinas, la presencia de un horizonte morrénico compuesto por arcilla y grava de permeabilidad media, este se encuentra a 15.00 metros de profundidad en el lado izquierdo y a 1.00 metros de profundidad en el lado derecho.

Geología de las canteras

Para el presente estudio se está considerando la utilización de dos tipos de canteras: las de arcilla y las de material grueso o grava. La descripción de la geología de las zonas donde se ubican estas canteras se describe a continuación.

Cantera de arcilla.

Se trata de una terraza con presencia de una capa de depósito de material arcilloso proveniente de capas presentes en la Formación Condorsinga.

La Formación Condorsinga es la cima del Grupo Pucará, es de estratificación delgada en su base y gruesa hacia la parte superior. Está constituida por una secuencia de calizas micríticas de color beige, en algunos casos tiene intercalaciones de arcillitas delgadas de color amarillento. El grosor de este miembro es de casi 100 metros en toda la región

Cantera de material grueso.

Se trata de una terraza de depósitos recientes del cuaternario, es decir material aluvial. Los depósitos aluviales de esta cantera son producto de la meteorización y erosión de los afloramientos o depósitos antiguos que han sido trasladados constantemente por la corriente de ríos formando terrazas. Están constituidos por gravas mal graduadas, arenas, fragmentos redondeados o sub redondeados de bloques, bolones y clastos en matriz arenosa.

2.2 ESTUDIO HIDROLÓGICO.

2.2.1 Características físicas y climatológicas del proyecto.

Características fisiográficas.

Las características fisiográficas de las subcuencas pueden ser explicadas a partir de ciertos parámetros o constantes que se obtienen del procesamiento de la información cartográfica y conocimiento de la topografía de la zona de estudio. La microcuenca de estudio tiene una longitud de máximo recorrido de 5.52 km. En el cuadro N° 2.1 se presenta los valores de las características fisiográficas de la microcuenca Yanacochoa.

Cuadro N° 2.1 Características fisiográficas de la microcuenca Yanacochoa (Elaboración propia).

DESCRIPCIÓN	SÍMBOLO	VALORES	UNIDAD
Área	A	14.04	Km ²
Longitud máx. Recorrido	L	5.52	Km
Coef. De forma	Kf	0.46	
Perímetro	P	16.58	Km
Coef. De compacidad	Kc	1.25	
Distr. entre curvas	C	0.025	Km
Pendiente de la cuenca	Sc	0.20	
Sumatoria long. De curva	Li	112.34	Km
Cota máxima		4475.00	m.s.n.m
Altitud media	E	4356.00	m.s.n.m
Cota mínima		4247.00	m.s.n.m
Pendiente del cauce principal	So	0.04	
Longitud total red drenaje	Lt	8.94	Km
Densidad de drenaje	Dd	0.64	

Clima y Meteorología.

El clima, definido como los procesos de intercambio de calor y humedad entre la tierra y la atmósfera a través de un largo período de tiempo,

constituye un aspecto importante en el presente estudio y en Cuadro N° 2.2 se muestra los periodos de las variables meteorológicas de la estación Cerro de Pasco.

Cuadro N° 2.2 Información meteorológica para el estudio de la presa Yanacocha (Estación meteorológica Cerro de Pasco).

Estación	Ubicación					Altitud (msnm)	Variables	Período de registro
	Latitud	Longitud	Distrito	Provincia	Departamento			
Cerro de Pasco	10°41'S	76°15'W	Chaupimarca	Pasco	Pasco	4260	Precipitación total mensual	1975-2008
							Temperatura	1993-2008
							Humedad relativa	2001-2008
							Evaporación	1955-1964
							Velocidad del viento	2001-2008

Precipitación.

Es una componente fundamental del ciclo hidrológico y se toma como el inicio de los análisis de las componentes. La precipitación al igual que la temperatura es un parámetro dependiente de la variación altitudinal.

Para la determinación de la precipitación total mensual y anual se ha hecho el análisis de los datos de la estación Cerro de Pasco, cuyos registros a nivel mensual se pueden apreciar en el Cuadro N° 2.3.

Cuadro N° 2.3 Precipitación total mensual y anual (mm) (Estación meteorológica Cerro de Pasco).

AÑO	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SET.	OCT.	NOV.	DIC.	TOTAL
1975	122.0	207.0	166.0	65.0	S/D	18.5	15.5	30.0	52.5	59.0	62.3	145.5	943.30
1976	S/D	41.8	S/D	S/D	340.0	211.0	63.0	191.0	180.0	123.0	86.0	213.0	1,448.80
1977	256.0	276.0	223.0	76.0	57.0	17.0	14.0	95.0	50.0	90.0	180.0	72.0	1,406.00
1979	S/D	134.0	304.0	S/D	59.0	3.0	S/D	S/D	88.0	97.0	209.0	152.0	1,046.00
1980	215.0	272.0	287.0	S/D	69.0	S/D	67.4	39.0	64.0	314.0	260.0	289.0	1,876.40
1981	381.0	543.0	231.0	171.0	40.0	26.0	6.0	159.0	94.0	250.0	438.0	230.0	2,569.00
1983	309.0	197.0	310.0	178.0	S/D	92.0	30.0	46.0	110.0	206.0	269.6	226.0	1,973.60
1984	252.0	434.0	272.0	102.0	42.0	55.0	31.0	57.0	68.0	132.0	220.0	90.0	1,755.00
1985	136.0	92.0	142.0	S/D	26.0	48.0	68.0	44.0	S/D	10.0	161.0	139.0	866.00
1986	261.0	202.0	200.0	85.0	69.0	24.0	15.0	119.0	174.0	222.0	234.0	262.4	1,867.40
1987	239.9	157.9	150.9	51.9	73.9	36.7	41.2	31.4	67.9	88.3	101.3	164.6	1,205.90
1988	232.2	153.1	122.7	140.8	33.7	7.2	0.0	12.6	46.8	210.6	165.2	241.7	1,366.60
1989	195.5	162.2	222.0	102.4	31.9	91.4	24.9	36.4	110.4	114.0	96.3	75.8	1,263.20
1990	60.2	157.1	129.0	69.1	52.5	74.3	7.3	12.6	97.1	102.7	172.7	179.1	1,113.70
1991	89.5	44.2	219.7	66.7	44.7	47.5	12.1	0.7	57.6	163.0	128.2	58.4	932.30
1992	100.0	78.1	106.0	76.0	8.5	29.9	3.2	48.5	60.8	93.2	S/D	S/D	604.20
1993	S/D	140.5	170.7	139.9	64.9	1.9	12.0	41.9	53.6	218.1	254.1	207.4	1,305.00
1994	234.8	194.6	149.2	109.1	69.2	47.5	51.8	32.0	54.4	121.0	103.1	133.2	1,299.90
1995	109.0	109.1	196.7	72.2	40.2	6.2	7.4	0.6	48.4	88.4	129.1	105.9	913.20
1998	91.5	214.2	112.0	72.2	15.7	11.4	0.0	1.5	25.4	130.5	103.7	69.0	847.10
1999	135.6	176.8	146.3	68.9	32.5	21.6	5.9	3.3	87.4	70.7	116.6	124.0	989.60
2000	189.1	153.1	132.5	42.8	43.6	5.5	11.4	29.0	25.1	118.2	48.2	114.0	912.50
2001	178.9	142.9	160.0	52.7	62.0	5.7	32.4	13.3	34.5	97.8	88.9	163.6	1,032.70
2002	37.0	172.5	150.1	72.8	44.3	10.9	41.7	11.6	52.0	136.2	102.3	131.8	963.20
2003	124.2	125.6	174.7	114.0	39.2	26.2	5.0	20.2	50.7	24.8	98.4	141.9	944.90
2004	69.6	163.9	69.1	62.0	36.7	30.6	24.0	29.6	112.6	88.7	130.8	151.5	969.10
2005	93.6	138.4	159.2	53.3	12.2	6.8	7.8	20.3	32.2	79.7	85.9	85.3	774.70
2006	97.2	110.4	150.4	97.0	13.3	37.9	5.6	15.1	62.7	169.0	134.2	126.4	1,019.20
2007	92.8	76.4	183.9	80.5	63.9	0.0	17.1	5.4	30.4	88.0	101.1	97.4	836.90
2008	135.8	94.1	50.2	63.7	11.6	26.8	6.2	13.2	58.4	103.3	S/D	S/D	563.30
MAXIMO	381.0	543.0	310.0	178.0	340.0	211.0	68.0	191.0	180.0	314.0	438.0	289.0	2569.0
PROMEDIO	164.39	172.13	175.53	87.88	53.45	35.19	21.62	39.97	70.65	126.97	152.86	149.64	1186.96
MINIMO	37.00	41.80	50.20	42.80	8.50	0.00	0.00	0.60	25.10	10.00	48.20	58.40	563.30

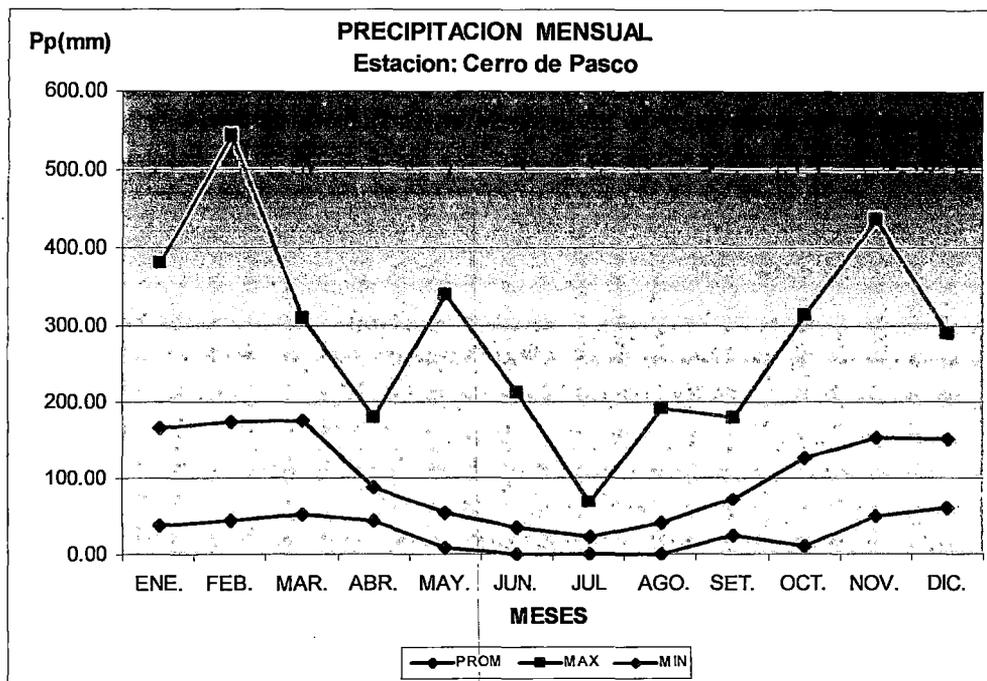


Figura Nº 2.1 Diagrama de precipitación media mensual (mm) (Estación meteorológica Cerro de Pasco).

De la Figura Nº 2.1 se observa que la estación más lluviosa se da entre los meses de octubre a marzo y la estación seca o de estiaje se produce entre los meses de abril a setiembre. A nivel medio mensual se registran precipitaciones que van desde 21.62 mm (Julio) hasta 175.53 mm (Marzo). Así se tiene valores máximos que ascienden hasta 543.0 mm (Febrero) y valores mínimos que descienden hasta 0 mm a lo largo del año. El promedio anual es de 1186.96 mm.

Temperatura.

Ejercen influencia sobre la temperatura: la variación diurna, distribución latitudinal, variación estacional, tipos de superficie terrestre y la variación con la altura. A través de la primera parte de la atmósfera, llamada troposfera, la temperatura decrece normalmente con la altura.

Este decrecimiento de la temperatura con la altura recibe la denominación de Gradiente Vertical de Temperatura (G.V.T.), definido como un cociente entre la variación de la temperatura y la variación de altura, entre dos

niveles. En la troposfera el G.V.T. medio es de aproximadamente 6,5° C / 1000 m.

Para el análisis de la temperatura media mensual se ha hecho uso de la estación Cerro de Pasco cuyos registros a nivel mensual se pueden apreciar en el Cuadro N° 2.4 y Figura N° 2.2.

Cuadro N° 2.4 Temperatura media mensual y anual (°C) (Estación meteorológica Cerro de Pasco).

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1993	S/D	5.2	4.2	4.7	4.8	4.7	4.2	3.9	4.1	3.7	4.8	5.1	4.49
1994	5.1	4.5	5.1	5	4.6	3.2	3.4	3.4	4.7	4.9	5.4	6.2	4.63
1995	5.6	5.9	5.6	5.8	5.3	5	5	5	5	5.8	5.7	5.6	5.44
1996	6.7	7.2	7.4	7.5	6.4	5.1	4.1	5.1	5.6	6.1	5.9	6	6.09
1999	5.6	5.3	5.4	5.1	5	4.6	3.6	4.1	4.5	4.7	5.7	5.5	4.93
2000	4.8	4.4	4.7	4.5	4.6	5.2	4	4.4	5.4	5.3	6	5.4	4.89
2001	5.1	5.6	5.6	5.1	5.3	3.6	4.1	3.3	4.8	6.1	6.2	6.2	5.08
2002	6.5	5.9	5.8	5.8	5.3	4.1	4.2	4.2	5.1	5.4	5.7	6	5.33
2003	6.5	6.1	5.5	5.9	5.5	4.9	4.1	4.2	5	5.9	5.9	5.8	5.44
2004	6.2	6.2	6.2	5.8	5.6	3.8	4.1	3.6	4.2	5.6	6.1	6.2	5.30
2005	6.4	6.5	6.2	6.2	5.9	5	4.4	4.5	5.6	6	6.1	5.9	5.73
2006	6.1	6.3	6	5.8	5.2	4.7	3.8	5	4.9	5.9	6	6.1	5.48
2007	6	5.6	5.1	5.2	5	4.2	3.8	4.6	4.3	5	5.3	5.4	4.96
2008	5.1	5	4.8	4.9	4.6	4.3	4	4.8	4.9	5.4	S/D	S/D	4.78
MAXIMO	6.70	7.20	7.40	7.50	6.40	5.20	5.00	5.10	5.60	6.10	6.20	6.20	6.09
PROMEDIO	5.82	5.69	5.54	5.52	5.22	4.46	4.06	4.29	4.86	5.41	5.75	5.80	5.18
MINIMO	4.80	4.40	4.20	4.50	4.60	3.20	3.40	3.30	4.10	3.70	4.80	5.10	4.49

De la Figura N° 2.2 se aprecia que las mayores temperaturas medias se presentan en los meses de diciembre a marzo, mientras que la estación más fría corresponde a los meses de junio a agosto, siendo el mes de julio el que presenta las menores temperaturas entre 4.06 °C. Estas temperaturas bajas generan en las noches las heladas típicas del clima de la sierra.

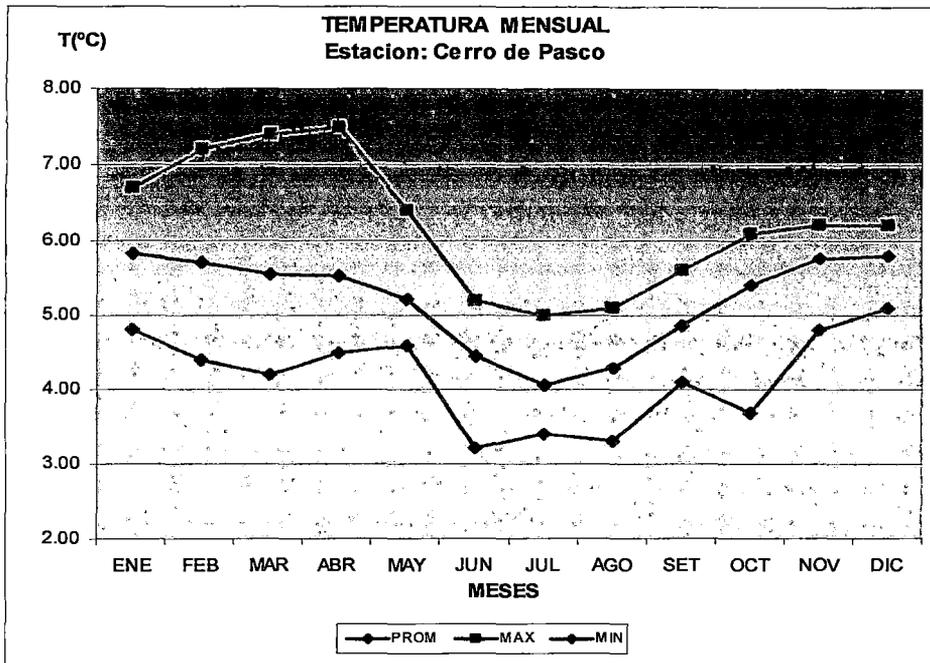


Figura N° 2.2 Diagrama de temperatura media mensual (mm) (Estación meteorológica Cerro de Pasco).

Humedad Relativa.

La humedad relativa es la humedad que contiene una masa de aire, en relación con la máxima humedad absoluta que podría admitir sin producirse condensación, conservando las mismas condiciones de temperatura y presión atmosférica.

Debido a que durante los meses de invierno se presentan cielos muy despejados, éste parámetro está fuertemente influenciado por la estacionalidad y es inversamente proporcional a la temperatura, presentando así los valores más altos en los meses de Enero a Marzo, mientras que los valores mínimos ocurren en la época de estiaje.

Para el análisis de la humedad relativa promedio mensual se ha hecho uso de la estación Cerro de Pasco, cuyos registros a nivel mensual se pueden apreciar en el Cuadro N° 2.5 y Figura N° 2.3.

Cuadro N° 2.5 Humedad relativa media mensual y anual (%) (Estación Cerro de Pasco).

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	ANUAL
2001	88	88	87	84	84	83	84	83	84	83	85	83	84.7
2002	83	88	88	86	86	86	87	86	86	87	87	86	86.3
2003	86	87	88	88	87	85	86	86	85	83	83	87	85.9
2004	83	86	86	86	84	83	83	81	83	84	84	83	83.8
2005	82	84	86	85	83	82	80	80	82	84	83	85	83.0
2006	85	86	87	86	84	85	85	85	84	85	85	85	85.2
2007	76.8	75.1	79.4	77	72.9	71.3	72.3	70.6	75.6	75.4	74.6	74	74.6
2008	78.9	77.7	77.2	75.1	72.4	72	72.1	68.1	70.9	74.5	S/D	S/D	73.9
MAXIMO	88.0	88.0	88.0	88.0	87.0	86.0	87.0	86.0	86.0	87.0	87.0	87.0	86.3
PROMEDIO	82.8	84.0	84.8	83.4	81.7	80.9	81.2	80.0	81.3	82.0	83.1	83.3	82.2
MINIMO	76.8	75.1	77.2	75.1	72.4	71.3	72.1	68.1	70.9	74.5	74.6	74.0	73.9

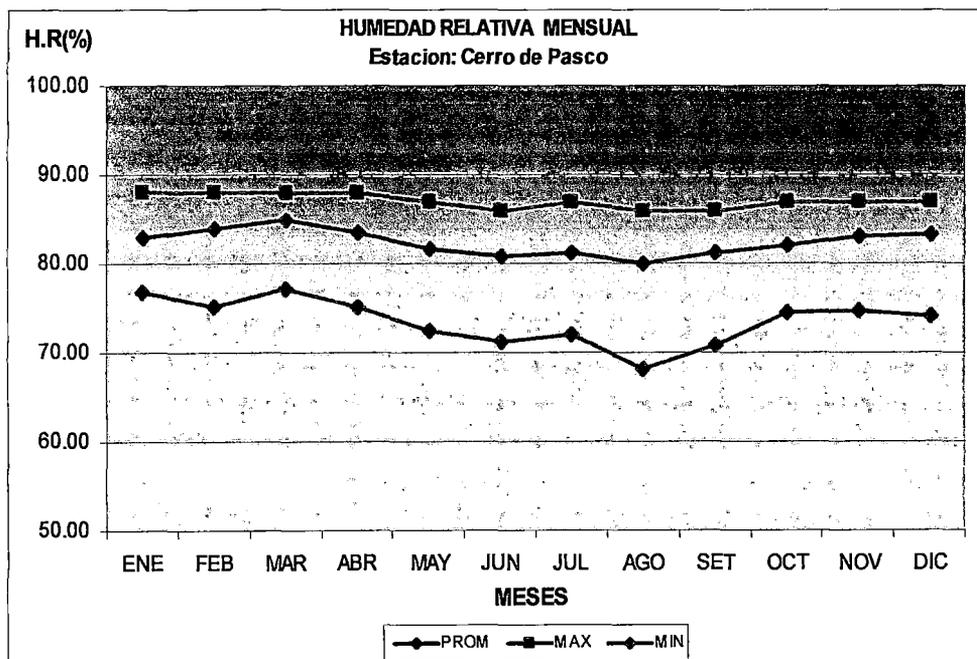


Figura N° 2.3 Diagrama de humedad relativa media mensual (%) (Estación Cerro de Pasco).

De la Figura N° 2.3 se entiende que los mayores porcentajes de humedad relativa se presentan en los meses de enero a marzo, debido a que en estos meses se presenta una radiación solar alta, la cual evapora gran cantidad del agua precipitada y de escorrentía superficial, lo que aumenta

la cantidad de vapor de agua en el aire circundante. Los menores porcentajes de humedad relativa se presentan entre los meses de julio a septiembre.

Evaporación.

Este proceso presenta dos aspectos: el físico y el fisiológico. El primero es el que se conoce mejor y tiene lugar en todos los puntos en que el agua está en contacto con el aire no saturado, sobre todo en las grandes superficies líquidas: mares, lagos, pantanos, estanques, charcas y ríos. Por su parte, la evaporación fisiológica también es importante y corresponde a la transpiración de los vegetales, la cual restituye a la atmósfera una gran cantidad de agua, que primero había sido absorbida.

Para el análisis de la evaporación total mensual se ha hecho uso de la estación Cerro de Pasco, cuyos registros a nivel mensual se pueden apreciar en el Cuadro N° 2.6 y Figura N° 2.4.

Cuadro N° 2.6 Evaporación media mensual y anual (mm) (Estación Cerro de Pasco).

AÑO	ENE	FEB.	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1955	43.1	28.5	18.8	20.3	28.1	33.3	32.9	32.7	37.1	38.9	34.7	32.5	380.9
1956	27.1	19.9	25.3	21.3	38.6	41.2	45.8	53.9	39.1	35.8	48.1	51.5	447.6
1957	33.8	20.9	33.6	28.7	35.9	39.5	52.6	S/D	S/D	S/D	39.7	37.3	322.0
1958	34.7	22.5	25.6	31	35.3	47.5	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D	196.6
1959	S/D	S/D	28.8	21.9	28.6	36.6	47.8	43.4	31.7	29.7	34.1	26.7	329.3
1960	31.5	24.5	32.4	20.9	31.6	40.2	40	40.4	31.9	36.7	26.9	40.9	397.9
1962	24.1	20.3	23.6	28.3	38.1	49	41.7	44.1	34.1	40.6	34.6	34.5	413.0
1963	22.1	19.8	25.4	28.8	38.3	S/D	47.8	49.9	36.3	30.9	24.3	35.6	359.2
1964	32.6	31.5	24.6	34.7	37.8	43.4	46.6	38.1	40.2	32.1	27	S/D	388.6
MAXIMO	43.1	31.5	33.6	34.7	38.6	49.0	52.6	53.9	40.2	40.6	48.1	51.5	447.6
PROMEDIO	31.1	23.5	26.5	26.2	34.7	41.3	44.4	43.2	35.8	35.0	33.7	37.0	359.5
MINIMO	22.1	19.8	18.8	20.3	28.1	33.3	32.9	32.7	31.7	29.7	24.3	26.7	196.6

En la Figura N° 2.4 se aprecia que mayor evaporación promedio corresponde al período de junio a agosto con valores del orden de 41.3 a

44.4 mm. Mientras que las menores evaporaciones promedio corresponde al período de febrero a abril que es la época de avenidas donde las constantes lluvias disminuyen la capacidad de evaporación de los cuerpos de agua.

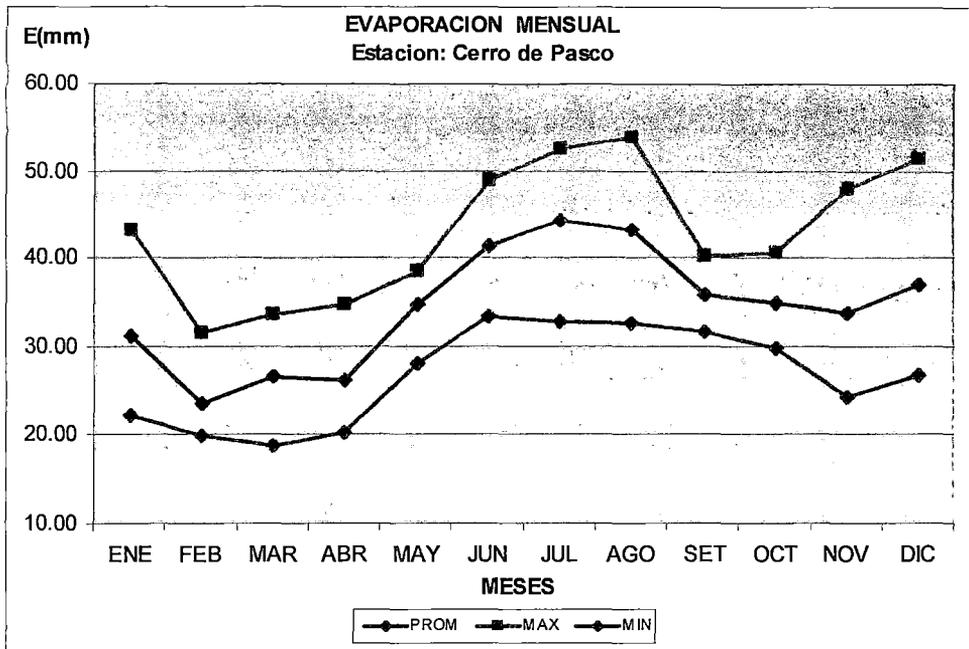


Figura N° 2.4 Diagrama de evaporación media mensual (%) (Estación Cerro de Pasco).

Velocidad del viento.

El viento es el movimiento de aire en la superficie terrestre. Es generado por la acción de gradientes de presión atmosférica producida por el calentamiento diferencial de las superficies y masas de aire. La superficie de la tierra se calienta por la radiación solar, que por cierto no se recibe con la misma intensidad en todas las zonas del planeta como lo observamos en el capítulo de radiación, lo que origina un calentamiento desigual de las masas de aire.

El aire de las capas atmosféricas más bajas se calienta bajo la influencia de la superficie terrestre, siendo su calentamiento más o menos intenso según la temperatura que alcanzan las diferentes zonas de la superficie terrestre con las que se mantiene en contacto.

Las dos características fundamentales del viento son la dirección y la velocidad. La dirección es el punto del horizonte de donde viene el viento y la velocidad es espacio recorrido por unidad de tiempo (m/s; Km/h).

Para el análisis de la velocidad del viento se ha hecho uso de la estación Cerro de Pasco, cuyos registros a nivel mensual se pueden apreciar en el cuadro N° 2.7.

Cuadro N° 2.7 Dirección predominante y velocidad media mensual del viento (m/s) (Estación Cerro de Pasco).

AÑO	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
2001	NE 2,1	NE 2,3	NE 2,1	NE 2,1	NE 2,3	NE 2,6	NE 2,4	NE 2,7	NE 2,4	NE 2,9	NE 2,0	NE 2,0
2002	NE 2,6	NE 2,7	NE 2,2	NE 2,4	NE 2,2	NE 2,8	NE 3,3	NE 3,2	NE 3,0	NE 2,2	NE 2,6	NE 1,5
2003	NE 2,2	NE 2,4	NE 1,8	NE 2,3	NE 2,3	NE 2,5	NE 2,7	NE 2,7	NE 2,3	NE 2,5	NE 2,4	NE 2,1
2004	NE 1,9	NE 2,1	NE 2,3	NE 1,5	NE 2,0	NE 3,1	NE 2,0	NE 3,4	NE 1,5	NE 2,5	NE 2,3	NE 2,2
2005	NE 2,1	NE 2,4	NE 2,1	NE 2,9	NE 2,7	NE 2,6	NE 3,6	NE 2,9	NE 3,6	NE 2,4	NE 2,5	NE 2,5
2006	NE 3,0	NE 2,1	NE 1,9	NE 1,8	NE 2,1	NE 2,2	NE 2,8	NE 2,8	NE 2,4	NE 2,1	NE 1,9	NE 1,8
2007	NE 1,7	NE 2,3	NE 1,7	NE 1,9	NE 1,7	NE 2,1	NE 2,8	NE 2,3	NE 2,2	NE 1,4	NE 1,5	NE 1,7
2008	NE 1,8	NE 1,8	NE 1,9	NE 2,0	NE 1,8	NE 1,9	NE 2,2	NE 2,2	NE 1,9	NE 1,9	S/D	S/D

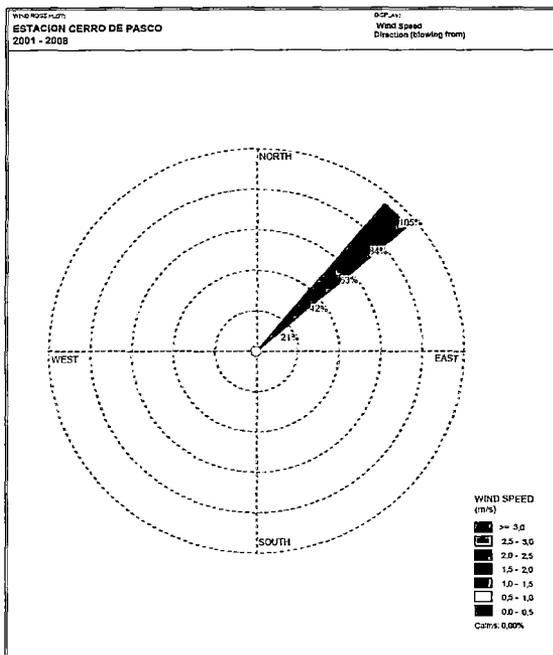


Figura N° 2.5 Rosa de vientos (Estación Cerro de Pasco).

2.2.2 Oferta hídrica superficial.

Análisis de precipitaciones.

La precipitación en la zona de estudio es la fuente de agua más importante para la agricultura, dentro de la microcuenca, ya que la mayor parte de áreas agrícolas se encuentran bajo secano. Por consiguiente, estudiar la distribución de la precipitación en el espacio y en el tiempo constituye uno de los aspectos más importantes del estudio hidrológico. Para el presente análisis se ha utilizado la información registrada en la estación pluviométrica de Cerro de Pasco ubicada a 4260 m.s.n.m., estación que esta próxima a la microcuenca analizada, para un periodo de registro de 30 años (Ver cuadro N° 2.8).

Análisis de homogeneidad de serie de datos.

Los datos climáticos recogidos en una determinada estación meteorológica durante un periodo de varios años puede que no sean homogéneos, es decir, el registro de una variable climática en particular puede presentar un cambio repentino en su medio y por tanto una variación en lo referente a los valores previos. Este Fenómeno puede ocurrir a causas como:

Cambio en la localización del pluviómetro.

Cambio en la forma de exposición o reposición del aparato.

Cambio en el procedimiento de observación o reemplazo del operador.

Construcción de embalses en las cercanías.

Deforestaciones y reforestaciones en la zona.

Desecación de pantanos.

Apertura de nuevas áreas de cultivos en los alrededores.

Industrialización en áreas circundantes.

Todas estas acciones traen consigo una alteración en la cantidad de lluvia captada por el pluviómetro. También existen los errores de tipo accidental o aleatorio que se deben al observador o se generan en la transcripción, copia o impresión de los registros pluviométricos.

Cuadro N° 2.8. Registro de precipitaciones mensuales (Estación Cerro de Pasco).

ESTACION : CERRO DE PASCO

LAT : 10°41' S

DPTO : Pasco

PARAMETRO : PRECIPITACION TOTAL MENSUAL (mm)

LONG 76°15' W

PROV : Pasco

ALT : 4260

DIST : Chaupimarca

AÑO	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SET.	OCT.	NOV.	DIC.	TOTAL
1975	122.0	207.0	166.0	65.0	S/D	18.5	15.5	30.0	52.5	59.0	62.3	145.5	943.30
1976	S/D	41.8	S/D	S/D	340.0	211.0	63.0	191.0	180.0	123.0	86.0	213.0	1,448.80
1977	256.0	276.0	223.0	76.0	57.0	17.0	14.0	95.0	50.0	90.0	180.0	72.0	1,406.00
1979	S/D	134.0	304.0	S/D	59.0	3.0	S/D	S/D	88.0	97.0	209.0	152.0	1,046.00
1980	215.0	272.0	287.0	S/D	69.0	S/D	67.4	39.0	64.0	314.0	260.0	289.0	1,876.40
1981	381.0	543.0	231.0	171.0	40.0	26.0	6.0	159.0	94.0	250.0	438.0	230.0	2,569.00
1983	309.0	197.0	310.0	178.0	S/D	92.0	30.0	46.0	110.0	206.0	269.6	226.0	1,973.60
1984	252.0	434.0	272.0	102.0	42.0	55.0	31.0	57.0	68.0	132.0	220.0	90.0	1,755.00
1985	136.0	92.0	142.0	S/D	26.0	48.0	66.0	44.0	S/D	10.0	161.0	139.0	866.00
1986	261.0	202.0	200.0	85.0	69.0	24.0	15.0	119.0	174.0	222.0	234.0	262.4	1,867.40
1987	239.9	157.9	150.9	51.9	73.9	36.7	41.2	31.4	67.9	88.3	101.3	164.6	1,205.90
1988	232.2	153.1	122.7	140.8	33.7	7.2	0.0	12.6	46.8	210.6	165.2	241.7	1,366.60
1989	195.5	162.2	222.0	102.4	31.9	91.4	24.9	36.4	110.4	114.0	96.3	75.8	1,263.20
1990	60.2	157.1	129.0	69.1	52.5	74.3	7.3	12.6	97.1	102.7	172.7	179.1	1,113.70
1991	89.5	44.2	219.7	66.7	44.7	47.5	12.1	0.7	57.6	163.0	128.2	58.4	932.30
1992	100.0	78.1	106.0	76.0	8.5	29.9	3.2	48.5	60.8	93.2	S/D	S/D	604.20
1993	S/D	140.5	170.7	139.9	64.9	1.9	12.0	41.9	53.6	218.1	254.1	207.4	1,305.00
1994	234.8	194.6	149.2	109.1	69.2	47.5	51.8	32.0	54.4	121.0	103.1	133.2	1,299.90
1995	109.0	109.1	196.7	72.2	40.2	6.2	7.4	0.6	48.4	88.4	129.1	105.9	913.20
1998	91.5	214.2	112.0	72.2	15.7	11.4	0.0	1.5	25.4	130.5	103.7	69.0	847.10
1999	135.6	176.8	146.3	68.9	32.5	21.6	5.9	3.3	87.4	70.7	116.6	124.0	989.60
2000	189.1	153.1	132.5	42.8	43.6	5.5	11.4	29.0	25.1	118.2	48.2	114.0	912.50
2001	178.9	142.9	160.0	52.7	62.0	5.7	32.4	13.3	34.5	97.8	88.9	163.6	1,032.70
2002	37.0	172.5	150.1	72.8	44.3	10.9	41.7	11.6	52.0	136.2	102.3	131.8	963.20
2003	124.2	125.6	174.7	114.0	39.2	26.2	5.0	20.2	50.7	24.8	98.4	141.9	944.90
2004	69.6	163.9	69.1	62.0	36.7	30.6	24.0	29.6	112.6	88.7	130.8	151.5	969.10
2005	93.6	138.4	159.2	53.3	12.2	6.8	7.8	20.3	32.2	79.7	85.9	85.3	774.70
2006	97.2	110.4	150.4	97.0	13.3	37.9	5.6	15.1	62.7	169.0	134.2	126.4	1,019.20
2007	92.8	76.4	183.9	80.5	63.9	0.0	17.1	5.4	30.4	88.0	101.1	97.4	836.90
2008	135.8	94.1	50.2	63.7	11.6	26.8	6.2	13.2	58.4	103.3	S/D	S/D	563.30
MAXIMO	381.0	543.0	310.0	178.0	340.0	211.0	68.0	191.0	180.0	314.0	438.0	289.0	2569.0
PROMEDIO	164.39	172.13	175.53	87.88	53.45	35.19	21.62	39.97	70.65	126.97	152.86	149.64	1186.96
MINIMO	37.00	41.80	50.20	42.80	8.50	0.00	0.00	0.60	25.10	10.00	48.20	58.40	563.30

Esta inconsistencia y falta de homogeneidad se pone de manifiesto con la presencia de saltos y/o tendencias en las series hidrológicas afectando las características estadísticas de dichas series, tales como la media, desviación estándar y correlación serial. Es por lo tanto necesario aplicar técnicas apropiadas para evaluar si un registro dado se puede considerar homogéneo y, si no, introducir las correcciones necesarias. El análisis de homogeneidad de la información hidrológica, se realizó mediante los siguientes procesos:

Completación de datos.

Los datos faltantes del registro de precipitación y de otras variables hidrológicas fueron completados, en algunos casos con promedios y en los meses donde faltaban más de dos años consecutivos mediante técnicas de generación aleatoria, de acuerdo al siguiente modelo matemático propuesto:

$$P_i = \bar{P} + S\xi \quad (2.1)$$

P_i : Precipitación generada en el mes i

\bar{P} : Precipitación promedio del mes

S : Desviación estándar de la precipitación del mes correspondiente

ξ : Número aleatorio con distribución normal: media 0 y desviación estándar 1.

Se debe resaltar que el periodo de registro a tomar en cuenta para la completación de datos será el de 1986-2008 (Cuadro N° 2.9), debido a que en este periodo se presenta menor falta de datos, muestran aleatoriedad y no presentan saltos en la media. En el cuadro N° 2.9, se muestra el registro de precipitaciones total mensual de la estación Cerro de Pasco completada en forma consistente de acuerdo la ecuación (2.1), y cuyo registro servirá como base para la generación de descargas en la microcuenca de la laguna Yanacocha.

Cuadro N° 2.9. Precipitación total mensual completada y consistente (Estación Cerro de Pasco).

AÑO	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL	AGO.	SET.	OCT.	NOV.	DIC.	TOTAL
1986	261.00	202.00	200.00	85.00	69.00	24.00	15.00	119.00	174.00	222.00	234.00	262.40	1,867.40
1987	239.90	157.90	150.90	51.90	73.90	36.70	41.20	31.40	67.90	88.30	101.30	164.60	1,205.90
1988	232.20	153.10	122.70	140.80	33.70	7.20	0.00	12.60	46.80	210.60	165.20	241.70	1,366.60
1989	195.50	162.20	222.00	102.40	31.90	91.40	24.90	36.40	110.40	114.00	96.30	75.80	1,263.20
1990	60.20	157.10	129.00	69.10	52.50	74.30	7.30	12.60	97.10	102.70	172.70	179.10	1,113.70
1991	89.50	44.20	219.70	66.70	44.70	47.50	12.10	0.70	57.60	163.00	128.20	58.40	932.30
1992	100.00	78.10	106.00	76.00	8.50	29.90	3.20	48.50	60.80	93.20	152.86	149.64	906.70
1993	164.39	140.50	170.70	139.90	64.90	1.90	12.00	41.90	53.60	218.10	254.10	207.40	1,469.39
1994	234.80	194.60	149.20	109.10	69.20	47.50	51.80	32.00	54.40	121.00	103.10	133.20	1,299.90
1995	109.00	109.10	196.70	72.20	40.20	6.20	7.40	0.60	48.40	88.40	129.10	105.90	913.20
1998	91.50	214.20	112.00	72.20	15.70	11.40	0.00	1.50	25.40	130.50	103.70	69.00	847.10
1999	135.60	176.80	146.30	68.90	32.50	21.60	5.90	3.30	87.40	70.70	116.60	124.00	989.60
2000	189.10	153.10	132.50	42.80	43.60	5.50	11.40	29.00	25.10	118.20	48.20	114.00	912.50
2001	178.90	142.90	160.00	52.70	62.00	5.70	32.40	13.30	34.50	97.80	88.90	163.60	1,032.70
2002	37.00	172.50	150.10	72.80	44.30	10.90	41.70	11.60	52.00	136.20	102.30	131.80	963.20
2003	124.20	125.60	174.70	114.00	39.20	26.20	5.00	20.20	50.70	24.80	98.40	141.90	944.90
2004	69.60	163.90	69.10	62.00	36.70	30.60	24.00	29.60	112.60	88.70	130.80	151.50	969.10
2005	93.60	138.40	159.20	53.30	12.20	6.80	7.80	20.30	32.20	79.70	85.90	85.30	774.70
2006	97.20	110.40	150.40	97.00	13.30	37.90	5.60	15.10	62.70	169.00	134.20	126.40	1,019.20
2007	92.80	76.40	183.90	80.50	63.90	0.00	17.10	5.40	30.40	88.00	101.10	97.40	836.90
2008	135.80	94.10	50.20	63.70	11.60	26.80	6.20	13.20	58.40	103.30	152.86	149.64	865.80
MAXIMO	261.0	214.2	222.0	140.8	73.9	91.4	51.8	119.0	174.0	222.0	254.1	262.4	1867.4
PROMEDIO	139.61	141.29	150.25	80.62	41.12	26.19	15.81	23.72	63.92	120.39	128.56	139.65	1071.14
MINIMO	37.00	44.20	50.20	42.80	8.50	0.00	0.00	0.60	25.10	24.80	48.20	58.40	774.70
DESV. EST.	65.42	43.55	43.87	27.32	20.92	23.97	14.77	25.88	35.66	50.90	48.37	52.87	261.67

Generación de caudales medios mensuales.

Debido a que en la microcuenca Yanacocha no existe información histórica de registro de caudales, ha sido necesario generar un registro sintético de caudales en el punto de captación de la quebrada (Presa Yanacocha). Para tal fin se ha empleado el modelo hidrológico Lutz Sholtz, desarrollado para cuencas de la sierra peruana, entre los años 1979-1980. Este modelo combina una estructura determinística para el cálculo de los caudales mensuales para el año promedio (Balance Hídrico - Modelo determinístico) y una estructura estocástica para la generación de series extendidas de caudal (Proceso markoviano - Modelo Estocástico); mediante el cual en base al conocimiento del proceso del ciclo hidrológico, entradas meteorológicas y las características de la cuenca, se obtiene la escurriente de la cuenca en estudio.

Los principales elementos que intervienen en el modelo son los siguientes:

Precipitación media anual.

Área de la Microcuenca.

Coefficiente de escurrimiento medio.

Retención de la Microcuenca (R): Es la lámina de lluvia retenida por una parte de la Microcuenca y que luego contribuye al abastecimiento en la época de estiaje el que se inicia en el mes de abril y termina en el mes de Octubre. Esta lámina se ha calculado a partir de los acuíferos potenciales, lagunas y nevados, que de acuerdo a la pendiente de la Microcuenca retiene una determinada lámina de agua.

La generación de caudales comprende la secuencia de los siguientes pasos:

Para el cálculo de la precipitación efectiva, se supone que los caudales promedios observados pertenezcan a un estado de equilibrio entre gasto y abastecimiento de la retención, de la cuenca respectiva. La precipitación efectiva se calculó para el coeficiente de escurrimiento promedio, de tal forma que la relación entre precipitación efectiva y precipitación total

resulta igual al coeficiente de escorrentía. Para este cálculo se adoptó el método del United States Bureau of Reclamación (USBR) para la determinación de la porción de lluvias que es aprovechado para cultivos.

A fin de facilitar el cálculo de la precipitación efectiva se ha determinado el polinomio de quinto grado:

$$PE = a_0 + a_1P + a_2P^2 + a_3P^3 + a_4P^4 + a_5P^5 \quad (2.2)$$

Dónde:

- PE : Precipitación efectiva (mm/mes)
- P : Precipitación total mensual (mm/mes)
- ai : Coeficiente del polinomio

En el siguiente cuadro N° 2.10 se presentan los coeficientes “ai” que permiten la aplicación del polinomio:

Cuadro N° 2.10. Coeficiente para el cálculo de precipitación efectiva (Estación Cerro de Pasco).

Coef.	Curva II	Curva III	Curva IV
a ₀	-0.0214	0.0163	0.054
a ₁	0.1358	0.2273	0.0348
a ₂	-0.0023	-0.0039	0.0112
a ₃	4.00E-05	1.00E-04	-6.00E-05
a ₄	-9.00E-08	-7.00E-07	2.00E-07
a ₅	-9.00E-11	1.00E-09	-2.00E-10
C	0.30	0.45	0.60
El rango de aplicación de los coeficientes de PE esta comprendida para 0<P<180 mm			

De esta forma es posible llegar a la relación entre la precipitación efectiva y total, de manera que el volumen anual de la precipitación efectiva sea igual al caudal anual de la cuenca respectiva.

$$C = \frac{Q}{P} = \frac{\sum_{i=1}^{12} PE_i}{P} \quad (2.3)$$

Dónde:

C = Coeficiente de escurrimiento

Q = Caudal anual

P = Precipitación Total anual

$$\sum_{i=1}^{12} PE_i = \text{Suma de la precipitación efectiva mensual}$$

Cálculo de variables del gasto de la retención a partir del mes de abril hasta el mes de septiembre (6 meses):

Coeficiente de Agotamiento(a): Se ha obtenido a partir de la fórmula empírica de Moss, como función del área de la microcuenca e interviene en el cálculo de los caudales en la época de estiaje:

$$a = -0.00252 \ln(A) + 0.03 \quad (2.4)$$

Relación entre la descarga del mes actual y del mes anterior:

$$b_0 = \frac{Q_t}{Q_0} = e^{-at} \quad (2.5)$$

Donde "a" es el coeficiente de agotamiento y "t" el número de días del mes.

Suma de los valores de "b₀" elevado al exponente "i" que corresponde al orden respectivo. Así i = 1 para Abril, i = 2 para mayo, i = 6 para Septiembre.

$$b_i = \sum_{i=1}^7 b_0^i$$

Finalmente:

$$G_i = R \frac{b_0^i}{\sum_{i=1}^7 b_0^i} \quad (2.6)$$

Dónde:

G_i es el gasto de la retención para el mes i.

R es la retención de la microcuenca, estimada anteriormente.

Cálculo del abastecimiento o la alimentación de la retención con la siguiente expresión:

$$A_i = a_i R \quad ; \quad a_i = \frac{PE_i}{PE_t} \quad (2.7)$$

Dónde:

A_i	=	Abastecimiento del mes i
a_i	=	Coefficientes de abastecimiento
R	=	Retención de la Microcuenca
i	=	mes del año, de 1 a 12
PE_i	=	Precipitación efectiva del mes i
PE_t	=	Precipitación efectiva total de la Microcuenca

Generación de caudales mensuales (CM_i) para el año promedio con la ecuación siguiente:

$$CM_i = PE_i + G_i - A_i \quad (2.8)$$

De la ecuación anterior se efectúa la regresión múltiple entre el caudal del mes t , el caudal del mes anterior ($t-1$) y la precipitación efectiva del mes t , determinándose los coeficientes de regresión, el error estándar y el coeficiente de correlación.

Se calcula la precipitación efectiva mensual de todo el registro.

Se generan los números aleatorios con distribución normal con media cero y variancia igual a 1.

Con los datos de los ítems e, f y g se procede a la generación de los caudales mediante el siguiente modelo autoregresivo:

$$Q_t = b_1 + b_2 Q_{t-1} + b_3 PE_t + S(1 - R^2)^{1/2} Z_t \quad (2.9)$$

Dónde:

- Q_t : Caudal generado del año t
 Q_{t-1} : Caudal del año $(t-1)$
 PE_t : Precipitación efectiva del año t
 S : Error estándar de la regresión múltiple
 r : Coeficiente de correlación múltiple
 Z : Número aleatorio normalmente distribuido $(0,1)$, del año t
 b_1, b_2 y b_3 : Coeficientes de regresión lineal múltiple.

Los resultados de generación de descargas para la microcuenca en estudio se presentan en los siguientes cuadros y su respectivo gráfico de serie histórica.

En el cuadro N° 2.11 se ha realizado el cálculo de los caudales medios mensuales para el año promedio de acuerdo a las ecuaciones (2.2), (2.3), (2.4), (2.5), (2.6), (2.7) y (2.8), partiendo de los datos del Cuadro N° 2.9.

Cuadro N° 2.11 Cálculo de Caudales medios mensuales para el año promedio (elaboración propia).

Cálculo del Coeficiente de Escorrentía

Método de L - Turc		
Precipitación Media Anual (P) :	1071.14	mm
Temperatura Media Anual (T) :	5.20	°C
Coefficiente de Temperatura (L) :	437.03	
Déficit de Escurrimiento (D) :	407.56	mm/año
Coefficiente de Escorrentía (C) :	0.62	

$$D = P \frac{1}{\left(0.9 + \frac{P^2}{L^2}\right)^{\frac{1}{2}}}$$

$$C = \frac{P - D}{P}$$

$$L = 300 + 25(T) + 0.05(T)^3$$

Características Generales de la Microcuenca

Area de la cuenca (A) :	14.04	Km ²
Altitud Media de la Microcuenca (H) :	3500	msnm
Pendiente Media de la Microcuenca :	0.0413	m/m
Precipitación Media Anual (P) :	1071.14	mm
Evaporación Total Anual (ETP) :	412.3	mm
Temperatura Media Anual (T) :	5.2	°C
Déficit de Escurrimiento (D) :	407.6	mm/año
Coefficiente de Escorrentía (C) :	0.62	
Coefficiente de Agotamiento (a) :	0.0233	
Relación de Caudales (b _c) (30 días) :	0.496	
Area de lagunas y acuíferos :	5	Km ²
Gasto Mensual de Retención (R) :	65.0	mm/año

Coefficientes de Cálculo - Precipitación Efectiva

Coef.	Curva II	Curva III	Curva IV
a ₀	-0.0214	0.0163	0.054
a ₁	0.1358	0.2273	0.0346
a ₂	-0.0023	-0.0039	0.0112
a ₃	4.00E-05	1.00E-04	-6.00E-05
a ₄	-9.00E-08	-7.00E-07	2.00E-07
a ₅	-9.00E-11	1.00E-09	-2.00E-10
C	0.30	0.45	0.60

El rango de aplicación de los coeficientes de PE esta comprendida para 0<P<180 mm

GENERACION DE CAUDALES MEDIOS MENSUALES PARA EL AÑO PROMEDIO

MES	N° días del mes	PRECIPITACION MENSUAL				CONTRIBUCION DE LA RETENCION				CAUDALES GENERADOS	
		P Total mm/mes	Efectiva			Gasto		Abastecimiento		mm/mes	m ³ /s
			PE III mm/mes	PE IV mm/mes	PE mm/mes	bi mm/mes	Gi mm/mes	ai mm/mes	Ai mm/mes		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Enero	30	139.61	15.0	125.3	96.1			0.300	19.5	76.6	0.415
Febrero	28	141.29	13.7	127.8	97.5			0.300	19.5	78.0	0.453
Marzo	31	150.25	5.1	141.2	105.2			0.050	3.3	101.9	0.534
Abril	30	80.62	19.2	52.0	43.3	0.496	33.2			76.5	0.415
Mayo	31	41.12	7.8	16.8	14.4	0.246	16.5			30.9	0.162
Junio	30	26.19	4.8	7.7	6.9	0.122	8.2			15.1	0.082
Julio	31	15.81	3.0	3.2	3.1	0.061	4.1			7.2	0.038
Agosto	31	23.72	4.3	6.4	5.9	0.030	2.0			7.9	0.041
Setiem.	30	63.92	14.1	35.5	29.8	0.015	1.0			30.8	0.167
Octubre	31	120.39	23.6	98.8	78.9			0.100	6.5	72.4	0.380
Noviem.	30	128.56	21.2	109.8	86.3			0.000	0.0	86.3	0.467
Diciem.	31	139.65	14.9	125.4	96.1			0.250	16.3	79.9	0.419
AÑO		1071.1	146.7	849.8	663.6	0.971	65.0	1.000	65.0	663.6	0.30
Coeficientes		0.62	0.265	0.735	1.000						

Fuente: Elaboración propia

CALCULO DE LOS COEFICIENTES DE CORRELACION PARA EL AÑO PROMEDIO

Qt	Qt-1	PE
76.6	79.9	96.1
78.0	76.6	97.5
101.9	78.0	105.2
76.5	101.9	43.3
30.9	76.5	14.4
15.1	30.9	6.9
7.2	15.1	3.1
7.9	7.2	5.9
30.8	7.9	29.8
72.4	30.8	78.9
86.3	72.4	86.3
79.9	86.3	96.1

Fuente: Elaboración propia

Resumen

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0.9663504
Coefficiente de determinación R ²	0.9338331
R ² ajustado	0.9191294
Error típico	9.7090316
Observaciones	12

	Coefficientes	Error típico	Estadístico t	Probabilidad
Intercepción	4.78561056	5.639168433	0.848637635	0.418082058
Qt-1	0.29278535	0.109198335	2.681225379	0.025155516
PE	0.62067267	0.089497155	6.9351106	6.79604E-05

Cuadro N° 2.12 Cálculo de descargas medias mensuales (mm) – Quebrada Yanacocha (Elaboración propia).

Coefficientes de Regresión Múltiple:

b1	4.7856	b2	0.29279	b3	0.62067
S	9.709	R²	0.96635		

Modelo Matemático:

$$Q_t = b_1 + b_2 Q_{t-1} + b_3 PE_t + S(1 - R^2)^{1/2} Z_t$$

Año	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Oct.	Nov.	Dic.	Tot.
Año Prom.	76.6	78.0	101.9	76.5	30.9	15.1	7.2	7.9	30.8	72.4	86.3	79.9	663.6
1986	164.1	150.9	145.3	75.0	51.3	22.1	11.4	59.0	103.8	143.9	164.1	189.4	1280.3
1987	183.1	134.1	108.3	52.1	45.0	23.9	24.4	18.2	30.2	46.8	57.5	99.1	822.7
1988	150.4	117.8	93.7	94.3	39.2	16.4	10.8	9.9	18.2	114.6	116.4	160.8	942.3
1989	147.3	121.9	153.2	94.0	35.1	48.9	23.2	18.4	59.0	70.9	58.3	47.7	877.8
1990	35.3	89.9	86.7	52.7	36.4	39.7	19.1	9.9	45.2	59.3	102.4	120.9	697.6
1991	77.7	36.4	124.3	61.3	33.9	25.0	8.6	7.5	21.8	84.6	85.0	49.2	615.4
1992	55.0	47.9	60.9	47.5	19.0	14.8	10.6	22.3	30.8	49.0	88.7	98.9	545.4
1993	109.2	99.1	115.9	100.8	54.4	21.8	10.2	13.9	24.5	117.0	171.8	161.8	1000.3
1994	171.1	147.0	117.2	82.6	51.5	33.6	27.4	18.4	24.5	61.5	65.0	82.6	882.2
1995	71.7	72.5	121.3	65.0	34.1	18.9	11.3	12.9	19.7	43.3	77.2	69.4	617.1
1998	60.9	131.4	86.9	53.9	19.7	7.4	7.0	6.1	9.9	65.2	67.2	46.2	561.8
1999	78.6	111.7	102.9	56.2	29.2	13.3	8.7	10.3	42.2	39.3	66.2	77.7	636.3
2000	120.9	109.7	97.3	44.5	25.7	15.3	11.9	13.2	12.6	61.4	36.6	63.5	612.5
2001	106.4	99.9	110.5	51.4	36.4	14.0	16.7	9.4	7.6	43.1	51.0	92.3	638.6
2002	38.8	97.5	100.1	58.5	35.7	17.3	17.4	8.5	19.5	68.6	67.7	84.5	614.2
2003	81.7	82.9	112.7	84.3	37.0	20.4	11.7	10.2	20.9	15.3	50.9	86.2	614.2
2004	51.9	95.9	56.3	38.8	21.8	14.1	10.5	8.6	53.0	51.2	77.3	96.7	576.1
2005	65.6	83.8	102.6	47.0	19.8	10.2	7.5	6.9	12.9	35.4	49.1	53.9	494.6
2006	58.5	64.2	93.2	71.1	25.5	19.9	6.4	3.2	22.7	92.5	88.8	86.1	632.1
2007	63.3	52.4	107.3	67.3	47.0	20.1	11.3	7.1	14.7	43.6	60.6	60.1	554.9
2008	81.5	67.5	37.2	34.1	13.4	8.1	8.2	7.0	27.0	51.7	89.1	101.1	525.8
MAX.	183.1	150.9	153.2	100.8	54.4	48.9	27.4	59.0	103.8	143.9	171.8	189.4	1280.3
MED.	94.0	95.9	101.6	63.5	33.8	20.3	13.1	13.4	29.6	64.7	80.5	91.8	702.0
MIN.	35.3	36.4	37.2	34.1	13.4	7.4	6.4	3.2	7.6	15.3	36.6	46.2	494.6
D.EST	45.4	32.0	27.1	19.0	11.7	10.1	6.0	11.5	21.9	30.8	34.8	38.9	195.7

Cuadro N° 2.13 Descargas medias mensuales generadas (m³/s) – Quebrada Yanacocha.

Area		14.04 Km ²											
Año	Ene. 30	Feb. 28	Mar. 31	Abr. 30	May. 31	Jun. 30	Jul. 31	Ago. 31	Set. 30	Oct. 31	Nov. 30	Dic. 31	Prom. (m ³ /s)
1986	0.89	0.88	0.76	0.41	0.27	0.12	0.06	0.31	0.56	0.75	0.89	0.99	0.574
1987	0.99	0.78	0.57	0.28	0.24	0.13	0.13	0.10	0.16	0.25	0.31	0.52	0.371
1988	0.81	0.68	0.49	0.51	0.21	0.09	0.06	0.05	0.10	0.60	0.63	0.84	0.423
1989	0.80	0.71	0.80	0.51	0.18	0.27	0.12	0.10	0.32	0.37	0.32	0.25	0.395
1990	0.19	0.52	0.45	0.29	0.19	0.22	0.10	0.05	0.24	0.31	0.55	0.63	0.313
1991	0.42	0.21	0.65	0.33	0.18	0.14	0.05	0.04	0.12	0.44	0.46	0.26	0.274
1992	0.30	0.28	0.32	0.26	0.10	0.08	0.06	0.12	0.17	0.26	0.48	0.52	0.244
1993	0.59	0.57	0.61	0.55	0.29	0.12	0.05	0.07	0.13	0.61	0.93	0.85	0.448
1994	0.93	0.85	0.61	0.45	0.27	0.18	0.14	0.10	0.13	0.32	0.35	0.43	0.398
1995	0.39	0.42	0.64	0.35	0.18	0.10	0.06	0.07	0.11	0.23	0.42	0.36	0.277
1998	0.33	0.76	0.46	0.29	0.10	0.04	0.04	0.03	0.05	0.34	0.36	0.24	0.254
1999	0.43	0.65	0.54	0.30	0.15	0.07	0.05	0.05	0.23	0.21	0.36	0.41	0.287
2000	0.65	0.64	0.51	0.24	0.13	0.08	0.06	0.07	0.07	0.32	0.20	0.33	0.276
2001	0.58	0.58	0.58	0.28	0.19	0.08	0.09	0.05	0.04	0.23	0.28	0.48	0.287
2002	0.21	0.57	0.52	0.32	0.19	0.09	0.09	0.04	0.11	0.36	0.37	0.44	0.276
2003	0.44	0.48	0.59	0.46	0.19	0.11	0.06	0.05	0.11	0.08	0.28	0.45	0.276
2004	0.28	0.56	0.30	0.21	0.11	0.08	0.06	0.04	0.29	0.27	0.42	0.51	0.260
2005	0.36	0.49	0.54	0.25	0.10	0.06	0.04	0.04	0.07	0.19	0.27	0.28	0.223
2006	0.32	0.37	0.49	0.39	0.13	0.11	0.03	0.02	0.12	0.48	0.48	0.45	0.283
2007	0.34	0.30	0.56	0.36	0.25	0.11	0.06	0.04	0.08	0.23	0.33	0.31	0.248
2008	0.44	0.39	0.19	0.18	0.07	0.04	0.04	0.04	0.15	0.27	0.48	0.53	0.236
MAX.	0.99	0.88	0.80	0.55	0.29	0.27	0.14	0.31	0.56	0.75	0.93	0.99	0.57
MED.	0.509	0.557	0.533	0.344	0.177	0.110	0.068	0.070	0.160	0.339	0.436	0.481	0.315
MIN.	0.191	0.212	0.195	0.185	0.070	0.040	0.034	0.017	0.041	0.080	0.198	0.242	0.223
D.EST	0.246	0.185	0.142	0.103	0.061	0.055	0.031	0.060	0.118	0.162	0.188	0.204	0.088

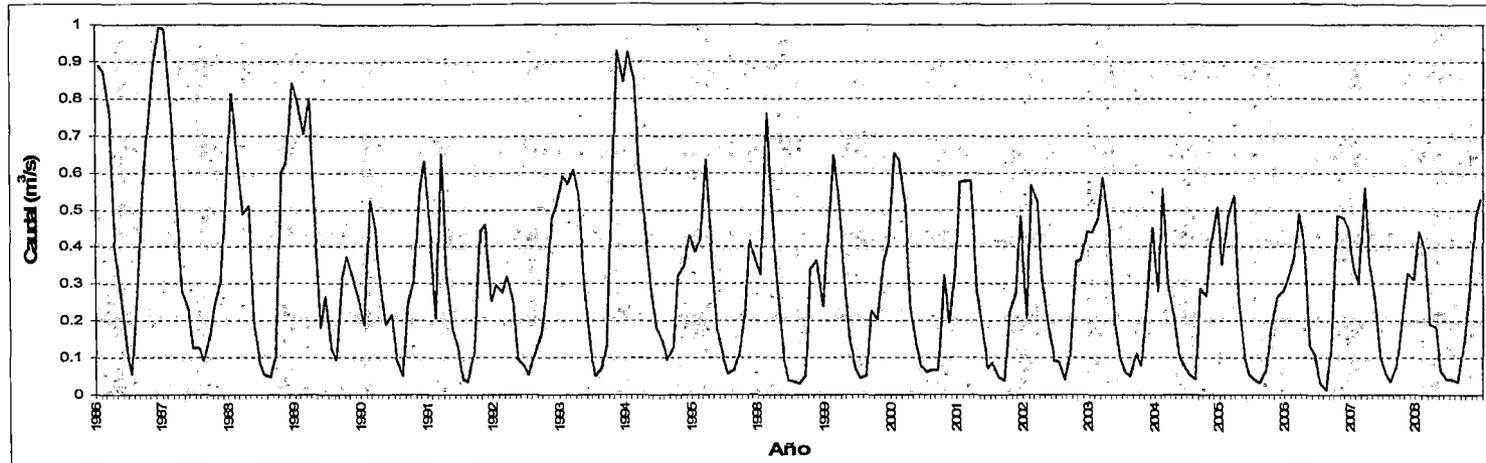


Figura N° 2.6 Serie de caudales generados (m³/s) durante los años del periodo de registro – Quebrada Yanacocha.

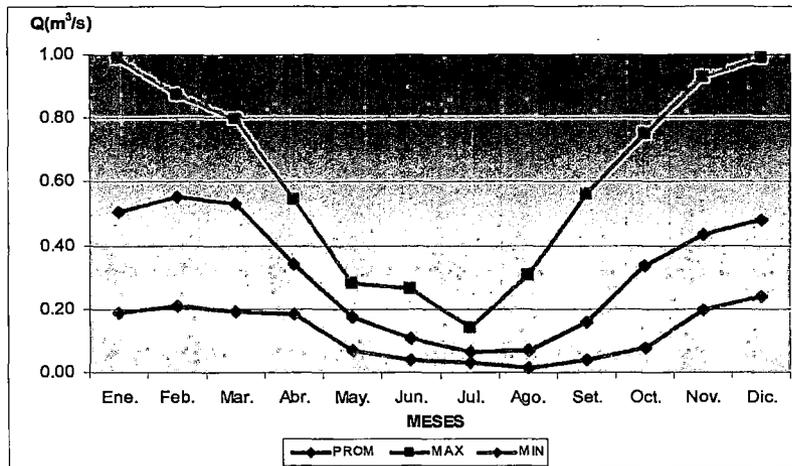


Figura N° 2.7 Caudales promedios mensuales generados (m³/s) para un año promedio – Quebrada Yanacocha.

2.2.3 Demanda hídrica.

Demanda agrícola.

Para el cálculo de la demanda de agua para uso agrícola se han tomado en consideración los datos siguientes:

Cédula de cultivos y calendario de siembra.

La Cédula de cultivos se define como la distribución de los cultivos en el transcurso del año, de acuerdo a los factores: climatológicos, técnicos, rentabilidad, capacidad económica del agricultor, tamaño de la unidad agrícola, demanda de productos en el mercado, disponibilidad de agua, incidencia de plagas y enfermedades, etc. La combinación de los cultivos para la estructuración de las cédulas de cultivos tiene en cuenta las fechas de siembra y cosecha, el período vegetativo y el tipo de cultivo.

La cédula de cultivos promedio para el área de riego proyectado se ha definido según la información proporcionada por las comunidades involucradas en el proyecto. Estos comprenden los cultivos indicados en el Cuadro N° 2.14.

Cuadro N° 2.14. Cédula de cultivos (Elaboración propia).

CULTIVO	AREA BAJO RIEGO (ha)			
	1ra Campaña	2da Campaña	3ra Campaña	TOTAL
MACA	160.00	70.00	—	230.00
AVENA FORRAJERA	160.00	160.00	220.00	540.00
PASTOS	130.00	130.00	130.00	390.00
TOTAL	450.00	360.00	350.00	1,160.00

En cuanto al calendario de siembra agrícola, se entienden que en la mayoría de los cultivos del área de influencia del proyecto, las siembras se dan entre los meses de Abril/Mayo, Julio/Agosto y Noviembre/Diciembre. El período vegetativo de los cultivos es el tiempo transcurrido desde la siembra hasta la cosecha, y comprende varias fases o etapas. Este tiempo de duración varía de acuerdo a cada especie o variedad y está

fuertemente influenciado por las condiciones climáticas, para el proyecto se realizó de acuerdo a la cedula de cultivo como se muestra en el Cuadro N° 2.15.

Cuadro N° 2.15 Calendario de siembra (Elaboración propia).

Cultivo	Area (ha)	Fecha de siembra	Periodo (días)	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
				31	28	31	30	31	30	31	30	31	30	31	
Maca	230.00	May/Nov	365												
Avena Forrajera	540.00	Mar/Jul/Nov	365												
Pastos	390.00	Abr/Agos/Dic	365												
TOTAL	1,160.00														

En el cuadro N° 2.16 se muestra la distribución de las áreas de cultivo de acuerdo al calendario de siembra del Cuadro N° 2.15, esto se realizó de acuerdo a información proporcionada por las comunidades involucradas en el proyecto.

Cuadro N° 2.16 Distribución de áreas (Elaboración propia).

Cultivos	Área (ha)	Áreas												
		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	
Maca	160.00	160.00	160.00	160.00	160.00								160.00	160.00
	70.00					70.00	70.00	70.00	70.00	70.00	70.00			
Avena Forrajera	160.00	160.00	160.00										160.00	160.00
	160.00			160.00	160.00	160.00	160.00							
	220.00							220.00	220.00	220.00	220.00			
Pastos	130.00								130.00	130.00	130.00	130.00		
	130.00	130.00	130.00	130.00									130.00	
	130.00				130.00	130.00	130.00	130.00						
Total	1,160.00	450.00	450.00	450.00	450.00	360.00	360.00	420.00	420.00	420.00	420.00	420.00	450.00	450.00

Evapotranspiración potencial (ET_o).

Es la cantidad de agua consumida por un cultivo de referencia como el grass. Estas están bajo óptimas condiciones de crecimiento. Para el presente estudio, la ET_o se ha calculado tomando información de la estación meteorológica Cerro de Pasco. Para su determinación se ha utilizado el método de Hargreaves, que es un método indirecto de cálculo, por la razón que no existen datos históricos de mediciones directas de

evapotranspiración. Los resultados de la ETo para cada mes se presentan el Cuadro N° 2.17.

Cuadro N° 2.17 Determinación de la ETo – Método de Hargreaves (Elaboración propia).

Estación : Cerro de Pasco						
Altitud : 4245 msnm						
Coordenadas:						
Latitud : 10° 45'						
Longitud: 76° 12'						
Cálculo de la Eto:						
Eto = MF x TMF x CH x CE						
Donde :						
Eto : Evapotranspiración del Potencial (mm/mes)						
MF : Factor Mensual de Latitud (de Tablas)						
TMF : Temperatura Media Mensual en °F.						
CE : Correccion por Altitud = 1+0.04Altitud (msnm)/2000						
CH : Correccion por Humedad						
CH = 0.166x(100 - HR) ^{1/2} , para HR > 64%						
CH = 1.00, para HR < 64%						
HR = Humedad Relativa Media Mensual						
MES	MF	TMF °F	CE	HR	CH	ETo mm/mes
Enero	2.592	42.44	1.085	82.80	0.69	82.16
Febrero	2.279	42.26	1.085	84.00	0.66	69.38
Marzo	2.354	41.90	1.085	84.80	0.65	69.25
Abril	2.023	41.90	1.085	83.40	0.68	62.20
Mayo	1.832	41.36	1.085	81.70	0.71	58.38
Junio	1.644	40.10	1.085	80.90	0.73	51.89
Julio	1.754	39.38	1.085	81.20	0.72	53.94
Agosto	1.976	39.74	1.085	80.00	0.74	63.25
Septiembre	2.18	40.82	1.085	81.30	0.72	69.30
Octubre	2.47	41.72	1.085	82.00	0.70	78.74
Noviembre	2.497	42.44	1.085	83.10	0.68	78.46
Diciembre	2.61	42.44	1.085	83.30	0.68	81.52

Kc del Cultivo

Los coeficientes de cultivo Kc fueron obtenidos de otros estudios y del Manual N° 24 de la FAO. Dependen de las características fisiológicas y periodos vegetativos de los cultivos.

Los valores de K_c mensuales para cada cultivo y K_c ponderados, según la distribución de áreas, se presentan en los Cuadro 2.18.

Cuadro N° 2.18 K_c de cultivos (Elaboración propia).

Cultivo	Área (Has.)	K_c											
		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
Maca	230.00	0.90	1.20	1.00	0.80	0.40	0.50	0.90	1.20	1.00	0.80	0.40	0.50
Avena Forrajera	540.00	1.15	0.45	0.35	0.75	1.15	0.45	0.35	0.75	1.15	0.45	0.35	0.75
Pastos	390.00	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
K_c Ponderado	1160.00	1.00	0.86	0.75	0.83	0.93	0.64	0.63	0.89	1.06	0.66	0.54	0.72

Evapotranspiración real del cultivo o uso consuntivo (ET_a).

Es la cantidad de agua que necesitan los cultivos para cumplir con sus requerimientos fisiológicos. Se expresa en mm/día y su cálculo se efectúa mediante la relación:

$$ET_a = K_c \times ET_o \quad (2.10)$$

Precipitación efectiva

Es la parte de la lluvia que es efectivamente aprovechada por los cultivos. Para este caso se ha tomado en cuenta por ser significativa.

Déficit de humedad.

Es la lámina de agua que requieren los cultivos para cubrir sus necesidades, descontando la precipitación efectiva.

Eficiencia de riego.

La eficiencia de riego es la relación entre la cantidad de agua utilizada por las plantas y la cantidad de agua suministrada. Se calcula teniendo en cuenta todos los factores que lo puedan afectar (edafológicos, culturales, meteorológicos, etc). Además de las pérdidas que se producen durante la conducción, la captación, su distribución y aplicación en la parcela. Para el presente proyecto se ha estimado una eficiencia de 28%.

Requerimiento de Agua.

Es la cantidad de agua final requerida en la toma, para satisfacer la demanda de los cultivos, la cual incluye todos los parámetros anteriores.

La demanda de agua para uso agrícola en la zona de estudio asciende a un total de 3.02 MMC para un área agrícola bajo riego de 450 ha con una demanda unitaria total de 7,503.84 m³/ha. El detalle de los valores de demanda se muestra en el Cuadro N° 2.19.

Demanda poblacional.

El valor de la demanda total de agua para un consumo humano (población futura de 50 años) para la Villa de Pasco se presenta en el cuadro N°2.20.

Cuadro N° 2.19 Demanda agrícola.

PARAMETRO	UNIDAD	MESES												TOTAL
		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	
1. Evotransp. Potencial	(mm/mes)	82.16	69.38	69.25	62.20	58.38	51.89	53.94	63.25	69.30	78.74	78.46	81.52	
2. Kc Ponderado		1.00	0.86	0.75	0.83	0.93	0.64	0.63	0.89	1.06	0.66	0.54	0.72	
3. Evotranp. Real o Uso consuntivo (1*2)	(mm/día)	82.44	59.74	52.25	51.35	54.40	33.22	33.84	56.09	73.68	52.21	42.45	58.60	
4. Precip. Efect.	(mm/mes)	86.69	88.03	95.20	39.50	14.67	5.71	0.00	4.23	28.35	71.31	77.85	86.72	
5. Déficit de Humedad (3-4)	(mm/día)	0.00	0.00	0.00	11.85	39.73	27.51	33.84	51.86	45.32	0.00	0.00	0.00	
6. Eficiencia de riego	(%)	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	
7. N° días del mes	(días)	31.00	28.00	31.00	30.00	31.00	30.00	31.00	31.00	30.00	31.00	30.00	31.00	365.00
8. Requerimiento de agua (5/6)	(mm/mes)	0.00	0.00	0.00	42.32	141.90	98.24	120.85	185.21	161.86	0.00	0.00	0.00	750.38
	(m3/ha/mes)	0.00	0.00	0.00	423.25	1,418.97	982.43	1,208.52	1,852.08	1,618.60	0.00	0.00	0.00	7,503.84
9.-Area total	ha	450.00	450.00	450.00	450.00	360.00	360.00	420.00	420.00	420.00	420.00	450.00	450.00	
10. Volumen demandado	m3/mes	0.00	0.00	0.00	190,461.40	510,828.88	353,673.88	507,580.13	777,872.80	679,811.03	0.00	0.00	0.00	3,020,228.12

La mayor demanda con proyecto se observa en el mes de Agosto

Demanda máxima	777,872.80	m3/mes
Demanda mínima	0.00	m3/mes
Demanda promedio	251,685.68	m3/mes

Cuadro N° 2.20 Demanda poblacional.

PARAMETRO	UNIDAD	MESES												TOTAL
		ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	
	(días)	31.00	28.00	31.00	30.00	31.00	30.00	31.00	31.00	30.00	31.00	30.00	31.00	365.00
Consumo Humano	l/s	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	240.00
	m3/mes	53,568	48,384	53,568	51,840	53,568	51,840	53,568	53,568	51,840	53,568	51,840	53,568	630,720.00

2.2.4 Balance hídrico.

El objetivo de este análisis, es determinar el déficit de agua para uso Agrícola y poblacional (demanda insatisfecha). Efectuado el cálculo de la demanda hídrica (agrícola y poblacional) y oferta hídrica, determinados anteriormente, se obtiene el gráfico de oferta y demanda hídrica, donde se puede apreciar el comportamiento mensual de la oferta y demanda hídrica para el presente estudio.

De los cálculos efectuados y presentados en el cuadro N° 2.21 se observa un rango de demandas insatisfechas de 33.29 a 122.20 l/s en los meses de Mayo a Septiembre. El mismo que se anulara por la presencia del embalse y su efecto regulador, siendo por tanto la bondad del proyecto la optimización del uso de agua (Oferta hídrica) por efecto de una mayor disponibilidad de agua al almacenar el agua en los meses de superávit (Octubre - Abril). En la Figura N° 2.8 se aprecia que la oferta hídrica de los meses de Octubre a Abril supera la demanda hídrica de los cultivos instalados, el mismo que muestra que estos volúmenes excedentes adecuadamente almacenados deben permitir complementar las necesidades hídricas de los meses con demanda insatisfecha (Mayo a Septiembre).

El déficit total de agua es de 1.55 MMC durante los meses de Mayo a Septiembre, y el superávit se da durante los meses de Octubre a Abril en un total de 7.80 MMC, observándose en total una mayor disponibilidad recurso hídrico en 6.5 MMC.

Cuadro N° 2.21 Balance hídrico Oferta – Demanda

PARAMETRO	UNIDAD	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
		31.00	28.00	31.00	30.00	31.00	30.00	31.00	31.00	30.00	31.00	30.00	31.00
Demanda Total (Agrícola + Poblacional)	(m ³ /mes)	53,568.00	48,384.00	53,568.00	242,301.40	564,396.88	405,513.88	561,148.13	831,440.80	731,651.03	53,568.00	51,840.00	53,568.00
	l/s	20.00	20.00	20.00	93.48	210.72	166.45	209.51	310.42	282.27	20.00	20.00	20.00
	MMC	0.05	0.05	0.05	0.24	0.56	0.41	0.56	0.83	0.73	0.05	0.05	0.05
Oferta	(m ³ /mes)	1,363,054.19	1,346,662.69	1,426,521.74	890,929.16	475,241.14	284,376.36	183,453.88	187,608.06	414,918.76	908,091.51	1,130,360.00	1,288,962.23
	l/s	508.91	556.66	532.60	343.72	177.43	109.71	68.49	70.04	160.08	339.04	436.10	481.24
	MMC	1.36	1.35	1.43	0.89	0.48	0.28	0.18	0.19	0.41	0.91	1.13	1.29
Balance	(m ³ /mes)	1,309,486.19	1,298,278.69	1,372,953.74	648,627.76	-89,155.74	-121,137.52	-377,694.24	-643,832.74	-316,732.26	854,523.51	1,078,520.00	1,235,394.23
	l/s	488.91	536.66	512.60	250.24	-33.29	-46.74	-141.01	-240.38	-122.20	319.04	416.10	461.24
	MMC	1.31	1.30	1.37	0.65	-0.09	-0.12	-0.38	-0.64	-0.32	0.85	1.08	1.24

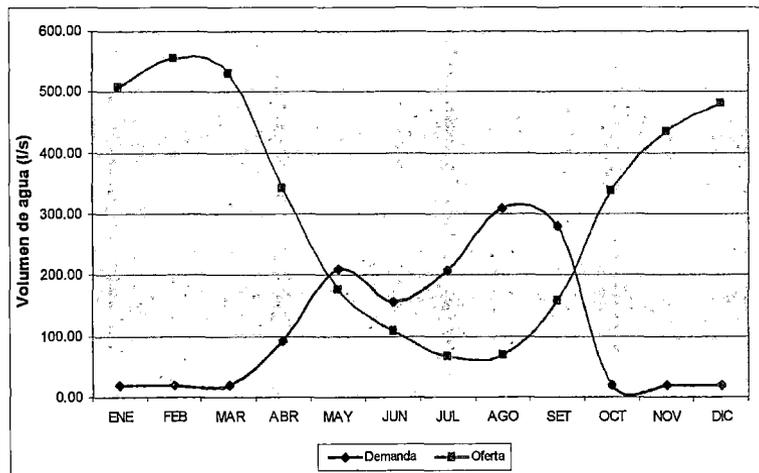


Figura N° 2.8 Balance hídrico Oferta – Demanda.

2.2.5 Regulación de descargas.

El aprovechamiento de los cursos de agua para beneficio del hombre exige el conocimiento no solo de las cantidades de agua que son colocadas a disposición, sino la oportunidad con que estas cantidades se encuentran disponibles. Este último aspecto se torna el más importante en la mayor parte de los casos, ya que las necesidades de agua aumentan justamente en las épocas de sequía o durante la carencia de lluvias, hecho evidente en el área agrícola. Esto significa que en ciertos casos, más que la cantidad, lo que importa es la secuencia temporal de ocurrencia de los caudales. Un proyecto de irrigación por ejemplo, debe poner a disposición del usuario las cantidades de agua en la época determinada, en una cronología que nada tiene que ver con la secuencia temporal con que el río entrega los caudales. Surge la necesidad de compatibilizar la oferta natural de agua con la demanda, para establecer el uso más armonioso del recurso, extrayendo el mayor provecho. Este es el concepto de regulación de las descargas de un cauce natural.

Determinación del volumen útil.

Si la demanda máxima prevista para el proyecto es inferior o igual a la descarga mínima del río, no son necesarios obras de regulación. Por el contrario, siempre que la curva de demanda presente, por lo menos en algunos tramos, caudales superiores a la descarga mínima del río, surge la necesidad de algún dispositivo que regule las descargas, esto bajo el riesgo de no poder atender parte de la demanda, en los períodos de estiaje. Los dispositivos referidos acumulan agua en las épocas de abundancia para ser usadas en las épocas de carencia. Efectúan una transposición temporal o una redistribución de los volúmenes disponibles.

Existen varios métodos que permiten calcular el volumen útil necesario de un embalse, capaz de regular un curso de agua, basados todos ellos en el establecimiento de un balance entre la descarga disponible o de entrada y la descarga de consumo o de salida.

Para la determinación de la capacidad de embalse se ha aplicado el Método Analítico, el cual define la ley de regulación por medio de la función:

$$y(t) = \frac{Q_r(t)}{\bar{Q}} \quad (2.11)$$

Donde:

$Q_r(t)$: Caudal regulado en función del tiempo.

\bar{Q} : Caudal Promedio en el Periodo Considerado.

Dada la secuencia en el tiempo de los caudales naturales Q_t y conocida la ley de regulación $y(t)$, es posible determinar la capacidad mínima del embalse para atender esa ley. Aquí, el caudal regulado $Q_r(t)$ se refiere a los caudales que salen del embalse en el tiempo t . En este método no se hará mención de la evaporación.

La capacidad mínima de un embalse (C_r) para atender una cierta ley de regulación está dada por la diferencia entre el volumen acumulado, que sería necesario (V_n) para atender aquella ley en el periodo más crítico es decir en época de sequía, y el volumen acumulado que afluye al embalse (V_a) en el mismo periodo.

$$C_r = V_n - V_a \quad (2.12)$$

La simulación de la operación del embalse (Cuadro N° 2.22), indica un volumen mínimo de 1.21MMC, correspondiente al periodo de estiaje, además siendo el volumen útil de 2.76 MMC, el cual será utilizado para la regulación y el diseño de la conducción aguas abajo de la presa realizando el balance hídrico respectivo.

Cuadro N° 2.22 Análisis de capacidad de embalse – Presa Yanacocha

$Q_{(medio)} = 0.315$ $V_n = 4.17$ $V_a = 1.54$

PERIODO (MESES)	N° de días	INGRESO (OFERTA)		EGRESO (DEMANDA)		Volumen de diferencia (MMC)	Diferencias Acumuladas (MMC)	Volumenes disponibles Acumuladas (MMC)	Volumenes demanda Acumuladas (MMC)	Volumenes actuales de embalse (MMC)	Situación del embalse	
		Q_o (m ³ /s)	VOLUMEN MMC	Q_r (m ³ /s)	VOLUMEN MMC							
Enero	31	0.51	1.36	0.02	0.05	1.31	0.00	1.36	0.05	2.76	LI	
Febrero	28	0.56	1.35	0.02	0.05	1.30	0.00	2.71	0.10	2.76	LI	
Marzo	31	0.53	1.43	0.02	0.05	1.38	0.00	4.14	0.15	2.76	LI	
Abril	30	0.34	0.89	0.09	0.24	0.65	0.00	5.03	0.39	2.76	LI	
Mayo	31	0.18	0.48	0.21	0.56	-0.08	-0.08	5.51	0.95	2.68	D	
Junio	30	0.11	0.28	0.16	0.41	-0.13	-0.21	5.79	1.36	2.55	D	
Julio	31	0.07	0.18	0.21	0.56	-0.38	-0.59	5.97	1.92	2.17	D	
Agosto	31	0.07	0.19	0.31	0.83	-0.64	-1.23	6.16	2.75	1.53	D	
Septiembre	30	0.16	0.41	0.28	0.73	-0.32	-1.55	6.57	3.48	1.21	D	
Octubre	31	0.34	0.91	0.02	0.05	0.86	-0.69	7.48	3.53	2.07	S	
Noviembre	30	0.44	1.13	0.02	0.05	1.08	0.00	8.61	3.58	2.76	S	
Diciembre	31	0.48	1.29	0.02	0.05	1.24	0.00	9.90	3.63	2.76	LI	
CAPACIDAD MINIMA DE EMBALSE (MMC)					1.21							

LI: Lleno el embalse, agua por aliviadero

D: Desciende el nivel del agua

S: Sube el nivel del agua

V: Vacío el embalse

Determinación del volumen muerto.

Para el dimensionamiento de embalses, se requiere contar con estimativos suficientemente precisos del tipo, magnitud y variación a través del tiempo del transporte de sólidos por las corrientes de agua que llegan al embalse. Esta información es útil para planear medidas de control de erosión en la cuenca del embalse y anticipar los efectos de modificaciones en la microcuenca sobre la producción de sedimentos.

La carencia de registros sobre transporte de sólidos de la cuenca colectora del embalse proyectado no permite la cuantificación directa, debiéndose recurrir a métodos indirectos basados en cuencas similares (métodos empíricos). La cuenca colectora de la presa está conformada por la cuenca del río Yanacocha, con una extensión de 14.04 Km².

La sedimentación en el embalse proyectado ha sido calculada mediante la aplicación de cuatro métodos empíricos, siendo estos los siguientes:

Ecuación en base a la información del río Mantaro.

En base a la información proveniente de varias subcuencas del río Mantaro, se obtuvo una ecuación que relaciona el área de la cuenca aportante con el volumen de sólidos acarreados por Km², los resultados de esta ecuación para la cuenca Yanacocha se muestra en el Cuadro N° 2.23.

$$Q_s = 780.7 A^{-0.25} \quad (2.13)$$

Dónde:

Q_s: Caudal del sólido específico en m³/km²-año.

A: Área de la cuenca aportante en Km².

Cuadro N° 2.23 Resultados ecuación en base a información del río Mantaro.

A(km ²)	Q _s (m ³ /km ² xaño)	V _s (MMC/año)
14.04	403.31	0.00566

Ecuación de Murano.

Esta ecuación, determinada en base a 103 embalses, relaciona el transporte específico de sólidos de la cuenca, con su precipitación anual, área, altitud y pendiente media.

La ecuación es la siguiente:

$$Q_s = 10^{-3.2} \cdot A^{-0.21} \cdot P^{0.97} \cdot H^{1.21} \cdot I^{0.68} \quad (2.14)$$

Dónde:

Qs: Caudal del sólido específico en m³/km²-año.

A: Área de la cuenca aportante en Km².

P: Precipitación media anual en mm.

H: Altitud media de la cuenca en msnm.

I: Pendiente media de la cuenca.

En el Cuadro N° 2.24 se muestran los resultados de la ecuación de Murano para la cuenca de la presa Yanacocha.

Cuadro N° 2.24 Resultados ecuación de Murano.

A(km ²)	P(mm)	H(msnm)	I(m/m)	Qs(m ³ /km ² xaño)	Vs(MMC/año)
14.04	1071.14	4356.00	0.13	1215.573	0.01707

Ecuación de Fleming.

Utilizando información de más de 250 cuencas de diferentes partes del mundo, Fleming obtuvo una ecuación que expresa la tasa media anual de transporte en suspensión como una función del caudal medio anual de la cuenca, tomando en cuenta fundamentalmente el tipo de cobertura vegetal, siendo la ecuación:

$$Q_s = a \cdot Q^n \quad (2.15)$$

Dónde:

Qs: Caudal sólido en Tn.

Q: Caudal medio anual en Pie³/s.

a, n : Parámetros en función de la cobertura vegetal de la cuenca.

En el cuadro N° 2.25 se muestran los resultados de la ecuación de Fleming para la cuenca de la presa Yanacocha.

Cuadro N° 2.25 Resultados ecuación de Fleming.

Q(pie ³ /seg)	a	n	Qs(Tn/Km ² -año)	Vs(MMC/año)
11.12	17.74	0.65	84.92	0.00072

Peso Especifico de sedimentos 1.65Tn/m³

Relación área de cuenca – Qs. (Según USBR).

Utilizando información de diferentes cuencas para embalses de diferentes partes del mundo, se obtuvo una ecuación que expresa el aporte específico de sólidos de la cuenca, con su área de cuenca (km²).

La ecuación es la siguiente:

$$Q_s = 1421 \cdot A^{-0.229} \quad (2.16)$$

Dónde:

Qs: Caudal sólido específico en m³/Km²-año

A: Área de la cuenca aportante en Km²

En el cuadro N° 2.26 se muestran los resultados de la ecuación que relaciona el área de la cuenca con el caudal de sólidos según U.S.B.R para la cuenca de la presa Yanacocha.

Cuadro N° 2.26 Resultados ecuación de relación área de cuenca – Qs.

A(km ²)	Qs(m ³ /km ² xaño)	Vs(MMC/año)
14.04	775.97	0.01089

El volumen total de transporte asumido, será aquel que provenga de promediar la suma de los resultados de cada Ecuación, esto debido a que en el área de la cuenca no se evidencia problemas o zonas de erosión importantes, ya que es una zona predominantemente rocosa.

Finalmente el transporte de sedimentos promedio es de 0.00871MMC/año, considerando una vida útil del embalse de 100 años, el volumen total será de 0.871 MMC.

2.3 ESTUDIO DE GEOTECNIA.

2.3.1 Geodinámica interna.

La zona donde se encuentra la laguna Yanacocha está afectada por pliegues y fallas locales que tienen una dirección preponderante de Noreste a suroeste, las que han afectado a las calizas del Condorsinga. La falla probable que cruza a la laguna de Este a Oeste se encuentra cubierta por sedimentos del cuaternario, el cual le sirve de sello e impermeabiliza la cubeta de la laguna, evitando así las infiltraciones que podrían generarse.

La sismicidad en el Perú está directamente asociada a la tectónica de placas, donde los focos sísmicos están ubicados cerca de la zona de convergencia de las placas litosféricas denominadas "Continental" y "Oceánica de Nazca", consideradas como activas. La referida convergencia determina la colisión de ambas placas y consecuentemente la inflexión del borde oriental de la placa de Nazca bajo la placa continental, denominada como la zona de subducción, con dirección ENE.

La región central del Perú, donde se ubica el área del estudio se ubica en la zona sísmica 2, esta se halla bajo la influencia de los sismos de moderada intensidad, cuyo factor de zona es $z=0.3$.

2.3.2 Geodinámica externa.

Desde el punto de vista de la geodinámica externa, el área en estudio se encuentra estable, por estar conformado por rocas sedimentarias mesozoicas en el substrato y materiales cuaternarios que sobreyacen a las rocas formando depósitos fluvio glaciales compactos y estables.

No se han observado rasgos de inestabilidad de taludes que pudiesen comprometer la zona de embalse, menos en la quebrada Yanacocha, ya

que las laderas son estables con pendientes entre 5° a 25° en suelos, 30° a 85° en rocas.

No se presentan fenómenos de deslizamiento o asentamientos significativos que pudieran afectar o comprometer en el futuro el embalse de agua de la laguna Yanacocha ni el proyecto de la presa.

2.3.3 Geotecnia de la zona de estudio.

Realización de calicatas.

Los trabajos de exploración de campo se han realizado teniendo en consideración la ubicación del eje de presa, excavando calicatas hasta profundidades de 2.00 metros (Cuadro N° 2.27).

La ubicación de las calicatas se ha determinado en función del requerimiento del proyecto, fundamentalmente del eje de presa a ser proyectada y las características geomorfológicas del área donde se está desarrollando el proyecto. Las calicatas exploratorias se han distribuido a lo largo de todo el eje de la presa con la finalidad de conocer las características estratigráficas del subsuelo donde se proyecta la mencionada obra, sin embargo estas calicatas no son suficientes por lo que se realizó cuatro perforaciones diamantinas de hasta 25 metros de profundidad.

Cuadro N° 2.27 Ubicación de las calicatas exploratorias.

CALICATA	UBICACION	PROFUNDIDAD	OBSERVACION
C-01	Margen Izquierda	2.00	NF = 1.50
C-02	Margen Izquierda	2.00	NF = 0.20
C-03	Margen Derecha	2.00	
C-04	Centro Quebrada	2.00	NF = 0.80
C-05	Margen Derecha	2.00	

De acuerdo a las características del suelo y la propuesta del proyecto, se han realizado las exploraciones con excavaciones a cielo abierto y muestreo disturbado por tratarse de suelos de naturaleza gravosa.

La exploración de suelos se ha realizado en las calicatas excavadas con la finalidad de obtener la información del tipo de suelo en el eje del dique. La profundidad máxima alcanzada fue de 2.00 metros. La descripción estratigráfica se ha realizado en forma visual de acuerdo a los lineamientos del manual de suelos, según la norma ASTM D – 2488, que se muestran en el registro de sondaje de la calicata.

Metodología de la perforación diamantina.

La perforación diamantina, que en sí corresponde a las perforaciones de tipo rotatorio, recibe tal designación debido a que para la horadación del subsuelo emplea coronas (brocas de sección anular) de acero con diamantes industriales integrados a una matriz de carburo de tungsteno.

El equipo de perforación está conformado por una máquina perforadora, que consiste en un motor que acciona un sistema de transmisión de rotación al cabezal de la máquina; y este, a su vez, a la tubería de perforación, en cuyo extremo se ubica la corona diamantina. El cabezal tiene autonomía de rotación de 360° en un plano vertical, que permite efectuar perforaciones con la inclinación que se elija.

Los principales accesorios del equipo de perforación lo conforman un trípode que sostiene una polea, por donde se hace pasar un cable de acero que va enrollado a un Winche, el escariador, que se acopla inmediatamente detrás de la broca, tiene como finalidad mantener uniformemente el diámetro del taladro, como se muestra en la Figura N° 2.9.

Para la refrigeración de la broca y la remoción de los detritus producto de la perforación, se introduce agua al taladro por el interior de la tubería de perforación (circulación normal), impulsada por una bomba.

Las coronas diamantinas son brocas de sección anular, de manera que conforme avanza la perforación se talla una muestra de forma cilíndrica

que se aloja en un muestreador (o porta testigo), inmediatamente detrás de la corona.

Los diamantes que se emplean en la fabricación de las coronas varían en calidad y tamaño, y la matriz que la sustenta es fabricada con durezas diferentes. La elección de un tipo de broca determinado estará en función de la dureza, abrasividad, grado de fracturamiento y tipo de material a ser perforado.

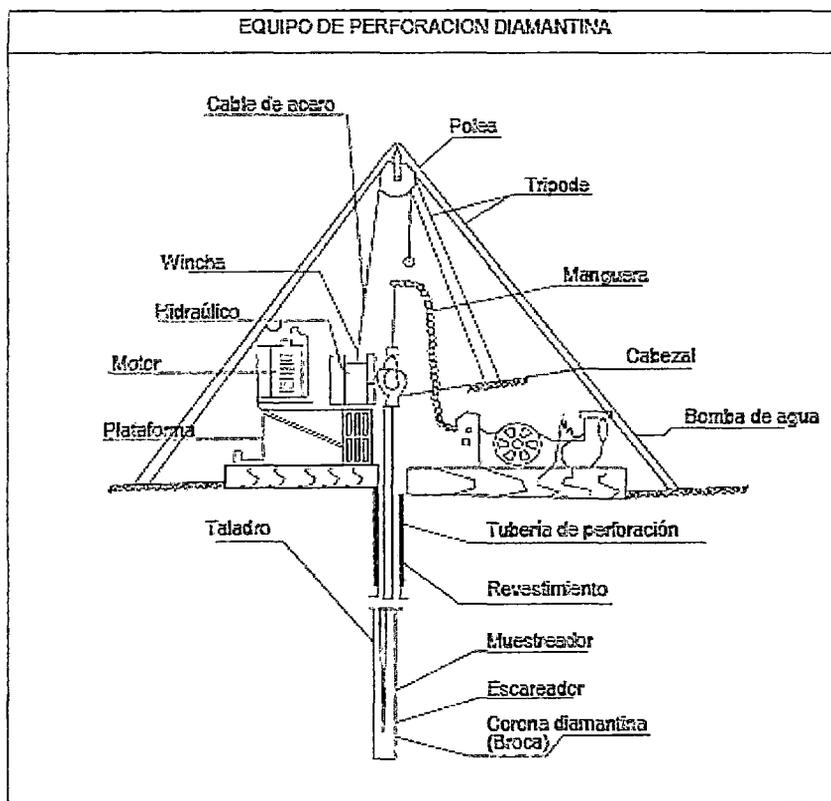


Figura N° 2.9. Equipo de perforación diamantina (Campos Sigüenza Antonio y Vásquez Huamaní Óscar, Seminario taller de mecánica de suelos y exploración geotécnica, CISMID - FIC - UNI, 1992).

Los Muestreadores son barriletes de acero que se ubican entre la corona diamantina y la tubería de perforación (Figura 2.9). Consiste de un tubo interior y otro exterior, concéntricos, con un espacio entre ellos que permite el paso del agua de circulación, de manera que la muestra sea preservada de humedecimiento continuo y erosión; cuenta con un sistema de

rodamientos que permite la rotación del tubo exterior, mientras que el interior permanece estático, evitando la rotura de la muestra por torsión.

Los testigos que se extraen de la perforación, son colocados en cajas de madera, preparadas para tal fin, convenientemente identificadas con el nombre del proyecto, número del sondeo, ubicación, intervalo de perforación de las muestras, fecha etc. El interior está dividido en canales limitados por tabiquería de madera, cuyos anchos corresponden al diámetro de las muestras a colocar. Las muestras de cada tramo perforado son separadas con tacos de madera donde se anotan la profundidad a que corresponden.

Para el presente estudio se han efectuado cuatro perforaciones diamantinas a lo largo del eje de la presa proyectada. El diámetro de corona utilizado en la perforación fue de los tipos NQ y HQ.

Metodología del ensayo de permeabilidad.

Este ensayo tiene el objeto de medir con cierta precisión el coeficiente de permeabilidad en algún punto de un terreno aluvial, o de una roca muy fisurada cuando existe un manto freático que satura el material. La prueba consiste en inyectar agua en una cavidad del terreno, de forma geométrica definida, situada debajo del nivel freático, esta prueba puede ser a nivel constante o a nivel variable.

A nivel constante: Consiste en inyectar un caudal conocido para mantener constante el nivel de agua dentro de la perforación. Estabilizando el proceso, a partir de dicho caudal, de la longitud y diámetro de la perforación, calculamos la permeabilidad.

A nivel variable: se introduce (o extrae) súbitamente un volumen de agua en un sondeo, (normalmente de pequeño diámetro, 5 a 10 cm), lo que provoca un ascenso (o descenso) instantáneo del nivel de agua dentro de la perforación, se miden los descensos-tiempos a medida que se recupera el nivel de agua inicial.

En geología la determinación de la permeabilidad del suelo tiene una importante incidencia en los estudios hidráulicos, para estudios de erosión, entre otras aplicaciones. La permeabilidad del suelo suele aumentar por la

existencia de fallas, grietas, juntas u otros defectos estructurales. Algunos ejemplos de roca permeable son la caliza y la arenisca, mientras que la arcilla o el basalto son prácticamente impermeables.

Para el presente estudio se realizaron ensayos de permeabilidad Lefranc que son usados para terrenos aluviales, o de una roca muy fisurada cuando existe un manto freático que satura el material. Estos ensayos se realizaron a distintas profundidades en las cuatro perforaciones diamantinas.

Metodología del ensayo de penetración estándar (SPT).

El ensayo de penetración estándar o SPT (del inglés *Standard Penetration Test*), es un tipo de prueba de penetración dinámica, empleada para ensayar terrenos en los que se quiere realizar un reconocimiento geotécnico. Consiste en medir el número de golpes necesario para que se introduzca una determinada profundidad una cuchara (cilíndrica y hueca) muy robusta (diámetro exterior de 51 milímetros e interior de 35 milímetros, lo que supone una relación de áreas superior a 100), que permite tomar una muestra naturalmente alterada, en su interior. El peso de la masa está normalizado, así como la altura de caída libre, siendo de 63.5 kilos y 76 centímetros respectivamente (Figura 2.10).

Cuando el terreno es muy resistente se detiene la prueba para un determinado número de golpes (rechazo R) anotando la penetración realizada. Según la Norma ASTM D1586, la prueba se puede dar por finalizada cuando: (a) Cuando se aplican 50 golpes para un tramo de 15 cm, (b) Cuando se aplican 100 golpes en total o (c) Cuando no se observa penetración alguna para 10 golpes.

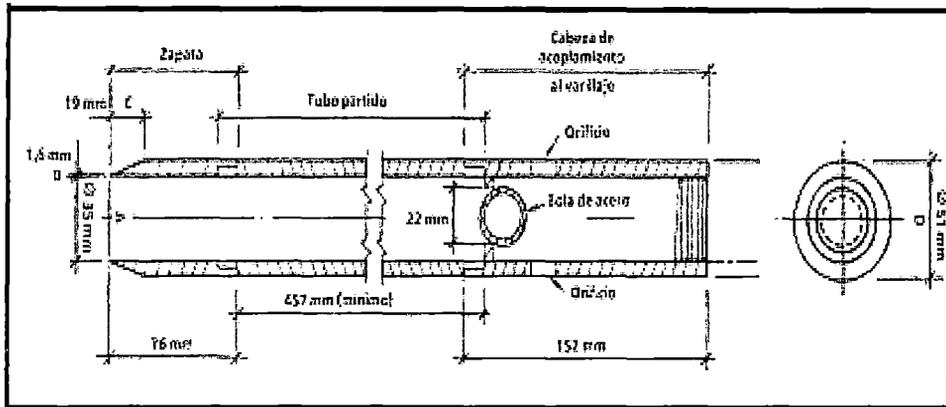


Figura N° 2.10. Tomamuestras o cuchara SPT (UNE 103 - 800 - 92 - ASTM D 1586/84).

Ensayos de laboratorio.

Los ensayos de laboratorio realizados, fueron los estándares y especiales, en función del requerimiento del proyecto.

Ensayos estándares.

Los ensayos Estándares realizadas a las muestras inalteradas fueron las siguientes:

- Contenido de Humedad Natural; ASTM D2216.
- Análisis Granulométrico; ASTM D422.
- Límites de Consistencia; ASTM D427 y D4318.
- Clasificación SUCS; ASTM D2487.
- Análisis del contenido de Sales Norma BS-1377-parte-3.
- Análisis de contenido de Sulfatos y Cloruros.
- Análisis de Corte Directo.
- Ensayo de CBR (ASTM-D883).
- Permeabilidad de Carga Constante (ASTM-D5084).
- Compresión Simple de Testigo de Roca.

Clasificación granulométrica SUCS de las calicatas.

Los resultados del laboratorio con respecto a la clasificación de suelos, según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), se presentan resumidos en el Cuadro N° 2.28.

Cuadro N° 2.28 Clasificación granulométrica SUCS de los suelos de las calicatas.

CALICAT	SUCS	DESCRIPCIÓN
C-01	CL-ML arenoso	Limos y arcillas inorgánicos con presencia de arcilla de mediana plasticidad.
C-02	SC-SM	Arenas limo arcillosas.
C-03	MH arenoso	Limos inorgánicos con presencia de Arenas.
C-04	MH arenoso	Limos inorgánicos con presencia de Arenas.
C-05	GC con arena	Gravas arcillosas, mezclas de gravas, arena y arcilla.

De acuerdo a los resultados de las evaluaciones de campo podemos señalar que la zona donde se proyecta la construcción de la obra se encuentran materiales arcillosos y limosos con presencia de arena, de mediana plasticidad y de consistencia semi suelta y en estado húmedo.

Límites de consistencia y humedad natural.

En el Cuadro N° 2.29 se presentan los resultados de diversos parámetros evaluados mediante pruebas en el laboratorio de mecánica de suelos realizada por la Universidad Agraria La Molina.

Cuadro N° 2.29 Límites de consistencia y humedad natural.

Calicata #	C-01	C-02	C-03	C-04	C-05	UNIDAD
Profundidad	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	m
Humedad Natural	5.57	21.33	237.04	90.97	11.05	%
Granulometría						
% que pasa la Malla # 4	90	86	100	95	67	%
% que pasa la malla # 10	84	76	84	85	51	%
-% que pasa la malla # 40	75	67	73	79	47	%
% que pasa la malla # 200	59	40	50	54	36	%
Límites de consistencia						
Límite Líquido	23.70	20.84	300.04	93.27	26.84	%
Límite Plástico	16.88	16.46	183.62	51.44	18.58	%
Índice de plasticidad	6.82	4.38	115.42	41.83	8.25	%
Clasificación SUCS	CL-ML	SC-SM	MH	MH	GC	

Perfil estratigráfico de las perforaciones diamantinas.

La descripción del perfil estratigráfico de las 04 perforaciones diamantinas realizadas en el eje de la presa proyectada, se describe a continuación:

Perforación P-01.

Estrato uno: Que va de 0.00 a 2.00 metros, compuesto de arcilla con alto contenido de materia orgánica, que forman una masa de color pardo oscuro.

Estrato dos: Desde 2.00 hasta 5.80 metros, compuesto de una arcilla de color amarillo.

Estrato tres: Desde 5.80 hasta 7.50 metros, este horizonte está compuesto de una arcilla morrón.

Estrato cuatro: Arcilla de color gris con un espesor de 3.00 m que comprende desde 7.50 hasta 10.50 metros.

Estrato cinco: Compuesto por un horizonte de arcilla de color amarillo en estado húmedo, con un espesor de 11.50 m que comprende desde 10.50 hasta 22.00 metros.

Estrato seis: Compuesto por un horizonte de arcilla de color amarillo en estado seco medianamente compacto, con un espesor de 3.00 m que comprende desde 22.00 hasta 25.00 metros.

Perforación P-02.

Estrato uno: Compuesto por arcilla con alto contenido de materia orgánica con un espesor de un metro.

Estrato dos: Desde 1.0 hasta 8.00 metros es un horizonte compuesto por arcilla de color amarillo, con un espesor de 7.00 metros.

Estrato tres: Este horizonte está formado por arena arcillosa, y va desde los 8.00 metros hasta los 11.00 metros de profundidad.

Estrato cuatro: Está formado por un horizonte de arcilla de color amarillo con un espesor de seis metros, que se extiende desde los 11.00 hasta 17.00 metros.

Estrato cinco: Es un horizonte formado por arcilla de color gris, con un espesor de 1.80 metros, que se prolonga hasta la profundidad de 18.80 metros.

Estrato seis: De 18.80 hasta 20.00 metros, es un horizonte formado por grava redondeada de diferentes tamaños con presencia de arcilla.

Perforación P-03.

Estrato uno: Está compuesto por una capa de materia orgánica con un espesor de 0.50 metros.

Estrato dos: Desde los 0.50 hasta los 10.00 metros de profundidad, se ubica un horizonte de arcilla de color amarillo

Estrato tres: Es un horizonte formado de arcilla color gris, que va desde 10.00 hasta 11.00 metros de profundidad.

Estrato cuatro: Es una capa de arcilla amarilla, de un metro de espesor, se prolonga desde los 11.00 metros hasta los 12.00 metros.

Estrato cinco: De 12.00 a 14.00 metros, se encuentra un horizonte de arcilla de color gris.

Estrato seis: de 14.00 hasta 18.00 metros, es un horizonte formado por grava redondeada de diferentes tamaños con contenido de arcilla.

Perforación P-04.

Estrato uno: Desde 0.00 hasta 1.00 metros es una capa de arcilla con alto contenido de materia orgánica.

Estrato dos: Es un horizonte formado por grava redondeada de diferentes tamaños con contenido de arcilla, que va desde 1.00 metros hasta 12.00 metros de profundidad.

Se ha logrado elaborar el Perfil Geológico del eje de la presa proyectada, en base a los resultados de las 04 perforaciones Diamantinas, el cual se muestra en el Plano P-03 del Anexo, en él se puede identificar la presencia de los siguientes Horizontes:

- Un Primer Horizonte compuesto por una Arcilla orgánica de color café con presencia de raíces y restos de plantas de un espesor promedio de 1.00 m
- Un segundo horizonte compuesto de una arcilla de color amarillo intercalada con estratos de arcilla de color gris y marrón. Su espesor en la perforación P-02 y P-03 es en promedio 15.00 m y en el centro del eje se

extienda hasta los 20 metros y gradualmente se va cambiando hasta presentarse seco al final de la perforación.

- Un horizonte morrénico bien marcado en la margen Derecha del eje, compuesta por arcilla con presencia de grava, en la perforación P-04.

Ensayos de permeabilidad en campo (prueba de lefranc).

Para la realización de esta prueba, se limpió el interior del tubo de perforación y se le extrajo ligeramente con la finalidad de dejar en el fondo de la perforación, una altura de filtración, posteriormente se introdujo agua limpia al interior de la camiseta de perforación hasta una altura determinada por encima de la napa freática (h_1) y se procedió a medir el intervalo de tiempo (t) que tardó en bajar el nivel de agua por el interior del tubo desde la altura h_1 hasta otra altura h_2 , cuyos resultados se muestran en el cuadro N° 2.30.

Para determinar el coeficiente de permeabilidad se aplica la siguiente fórmula:

$$K = \frac{d_e^2 \ln(2L/d)}{8 L t} \ln \frac{h_1}{h_2} \quad (2.17)$$

Donde :

K = conductividad hidráulica

h_1, h_2 = altura de agua al principio y al final del ensayo

t = tiempo transcurrido entre la boserbación de los niveles h_1 y h_2

l = longitud de la zona filtrante

d = diámetro de la zona filtrante

d_e = diámetro de la entubación (puede ser igual a d).

Cuadro N° 2.30 Resultados de las pruebas de Lefranc.

PERFOR.	PROF. (m)	PERMEABILIDAD (cm/seg)	OBSERVACIONES	TIPO DE MATERIAL
P-01	5.00	8.40E-07	Arcilla de color amarillo	Permeabilidad Muy Baja
	10.00	6.11E-07	Arcilla de color gris	Permeabilidad Muy Baja
	15.00	5.17E-07	Arcilla de color amarillo	Permeabilidad Muy Baja
	20.00	4.80E-07	Arcilla de color amarillo	Permeabilidad Muy Baja
	25.00	4.63E-07	Arcilla de color amarillo	Permeabilidad Muy Baja
P-02	6.00	3.94E-07	Arcilla de color amarillo	Permeabilidad Muy Baja
	8.50	1.06E-04	Arena arcillosa	Permeabilidad Media
	15.00	7.12E-07	Arcilla de color amarillo	Permeabilidad Muy Baja
	20.00	1.01E-05	Grava con arcilla	Permeabilidad Media
P-03	8.00	8.10E-07	Arcilla de color amarillo	Permeabilidad Muy Baja
P-04	4.00	1.07E-05	Arcilla con grava	Permeabilidad Media
	8.00	8.12E-07	Arcilla de color amarillo con grava	Permeabilidad Muy Baja

Ensayo de permeabilidad en laboratorio.

Se han realizado dos Ensayos de Permeabilidad (Norma ASTM-D5084) en el Laboratorio Geotécnico del Centro Peruano Japonés de Investigaciones Sísmicas y Mitigación de Desastres (CISMID). Las muestras han sido tomadas de las perforaciones diamantinas 01 y 02 realizadas en la quebrada Yanacocha, la cual se utilizara como el material conformante del cuerpo de presa, los resultados se muestran en el Cuadro N° 2.31. Se han realizado dos Ensayos de Permeabilidad (Norma ASTM-D5084) en el Laboratorio Geotécnico del Centro Peruano Japonés de Investigaciones

Cuadro N° 2.31 Resultados de permeabilidad obtenida en laboratorio.

PERFOR.	PROF. (m)	PERMEABILIDAD (cm/seg)	OBSERVACIONES	TIPO DE MATERIAL
P- 01	5.00	2.600E-08	CL (Arcilla delgada)	Permeabilidad Muy Baja
P- 02	5.00	5.21E-07	CL-ML (Arcilla limo arcillosa)	Permeabilidad Muy Baja

Los ensayos de permeabilidad realizados en campo y en laboratorio confirman que los materiales arcillosos encontrados en las perforaciones diamantinas son de permeabilidad muy baja y los materiales areno arcillosos y gravosos con presencia de arcilla son Medianamente Permeables.

Ensayo de penetración estándar (SPT).

Se efectuaron este tipo de ensayos en todas las perforaciones diamantinas, en el primer caso el primer ensayo SPT se realizó a los tres metros de profundidad y los cuatro siguientes con un intervalo de cinco metros de profundidad. En la segunda perforación, se hicieron dos SPT, a los cuatro metros y a los 10.60 m de profundidad. En las perforaciones tres y cuatro, se efectuaron un ensayo SPT en cada una de ellas.

En el cuadro N° 2.32 se observa los resultados de los ensayos SPT realizados en las cuatro perforaciones diamantinas.

Cuadro N° 2.32 Resultado de los ensayos de SPT.

PERF.	PROF. (m)	Nº DE GOLPES	OBSERVACIONES	CONSISTENCIA DEL SUELO
P-01	3.00 a 3.45	5.00	Arcilla de color amarillo	Mediana
	11.00 a 11.40	1.00	Arcilla de color amarillo	Muy Blando
	16.00 a 16.45	1.00	Arcilla de color amarillo	Muy Blando
	21.00 a 21.45	1.00	Arcilla de color amarillo	Muy Blando
	25.00 a 25.45	1.00	Arcilla de color amarillo	Muy Blando
P-02	4.00 a 4.45	7.00	Arcilla de color amarillo	Mediana
	10.60 a 11.05	5.00	Arena arcillosa	Mediana
P-03	11.00 a 11.45	3.00	Arcilla de color amarillo	Blando
P-04	9.00 a 9.45	9.00	Arcilla con grava	Compacto

Los resultados de las pruebas de SPT (Cuadro N° 2.32) realizadas en las 04 perforaciones diamantinas, observamos que los horizontes de material arcilloso se encuentra hasta aproximadamente los 4.00 m de profundidad, medianamente compacto y luego cambian a una consistencia muy blanda. El horizonte conformado por materiales arenoso arcillosos encontrados en la perforación P-02 están medianamente compactos, y el horizonte de arcilla con grava encontrada en la Perforación P-04 está en estado Compacto.

2.3.4 Análisis de canteras.

Se remarcaron los sitios que son canteras cercanas al proyecto para su utilización en las obras a realizar, así como también la realización de ensayos para hallar las proporciones más convenientes de mezcla de suelos o canteras si fuera necesaria o un simple zarandeo de los materiales que conformaran la presa, tomando en cuenta los requisitos y exigencias mínimas para el diseño, materiales, colocación y control de calidad en obra.

En la búsqueda y selección de las canteras de material, se tuvieron en cuenta la ubicación y las evaluaciones necesarias como granulometría, características físicas, composición del agregado y potencia de la cantera.

Para ello se han analizado tres canteras diferentes, dos de agregado grueso y una de arcilla. Los resultados de las características de estas canteras las presentamos a continuación en el cuadro N° 2.33 donde se muestra la clasificación SUCS de las canteras y en cuadro N° 2.34 se muestra la granulometría y el contenido de humedad de dichas canteras.

Cuadro N° 2.33 Clasificación tipo SUCS de las canteras.

CANTERA	UBICACIÓN	SUCS	TIPO	DESCRIPCIÓN
Arcilla (Cantera 3)	Quebrada Yanacocha	CL -ML	--	Limos y arcillas con presencia de arena medianamente plásticos
Agregado Grueso (Cantera 1)	Altura Km. 285 Carret. Central	GP	37.5mm a .75mm (1½" a N°4)	Gravas mal graduadas, mezclas de grava y arena con poco o nada de finos
Agregado Grueso (Cantera 2)	Quebrada Angascancha	GW con arena	25 mm a 9.5 mm (1" a 3/8")	Gravas bien graduadas, mezclas de grava y arena con poco o nada de finos

Cuadro N° 2.34 Granulometría y contenido de humedad de las canteras.

Cantera	03	01	02	UNIDAD
Profundidad	3.00	2.00	2.00	m
Humedad Natural	16.86	0.46	3.32	%
Granulometría				
-% que pasa la malla # 4	100	5	24	%
-% que pasa la malla # 10	100	3	15	%
-% que pasa la malla # 40	100	2	5	%
-% que pasa la malla # 200	98	1	1	%
Limites de consistencia				
- Límite Líquido	33.9	NT	NT	%
- Límite Plástico	26.72	NP	NP	%
- Índice de plasticidad	7.18	-	-	%
Clasificación SUCS	CL-ML	GP	GW	

Cantera de arcilla.

Esta cantera se ubica en la Quebrada de Yanacocha, a 500 metros de la laguna a un costado de la trocha carrozable que va desde el poblado de Villa Pasco- Laguna Yanacocha. Se trata de materiales limo arcillosos de mediana plasticidad, pero también podemos observar que las calicatas que se realizaron en el eje de la presa C-03, C-04 y C-05 presentan valores de Índice de Plasticidad de 116.42%, 41.83% y 8.26% respectivamente y con clasificación SUCS de MH arenoso (Limo de mediana Plasticidad) en el caso de las calicatas C-03 y C-04 y GC con arena (Grava arcillosa) en el caso de la calicata C-05. Por ello se recomienda utilizar adicionalmente esta cantera, que se ubica en la misma zona de trabajo del proyecto. El volumen de explotación de la cantera ubicada a 500 m de la laguna, se estima en: 3,351.50 m³.

Ensayo de CBR (Californian Bearing Ratio).

El CBR de un suelo es la carga unitaria correspondiente a 0.1" ó 0.2" de penetración, expresada en por ciento en su respectivo valor estándar. También se dice que mide la resistencia al corte de un suelo bajo condiciones de humedad y densidad controlada. El ensayo permite obtener un número de la relación de soporte, que no es constante para un suelo dado sino que se aplica solo al estado en el cual se encontraba el suelo durante el ensayo, en el Cuadro N° 2.35 se muestra la clasificación del suelo según el valor de CBR.

Cuadro N° 2.35 Clasificación de suelo según el valor de CBR.

CBR	Clasificación cualitativa del suelo	Uso
2 - 5	Muy mala	Sub-rasante
5 - 8	Mala	Sub-rasante
8 - 20	Regular - Buena	Sub-rasante
20 - 30	Excelente	Sub-rasante
30 - 60	Buena	Sub-base
60 - 80	Buena	Base
80 - 100	Excelente	Base

Los resultados de los análisis de laboratorio realizados a la muestras de la cantera de arcilla se muestran en el cuadro N° 2.36.

Cuadro N° 2.36 Resultados de los ensayos de CBR.

CBR AL 100%	CBR AL 95%
32.90	32.3

La clasificación cualitativa de la cantera de arcilla es buena para ser usada como sub base por lo que se empleara para conformar el cuerpo de presa con CBR mínimo de 95%.

Canteras de agregados gruesos.

Se ha ubicado dos sitios posibles de canteras de agregado grueso, la primera ubicada en la Quebrada de Angascancha a aproximadamente 6.00 km de la Laguna, actualmente explotada. El material de esta cantera es grava bien graduada y presenta características regulares para su utilización como agregado grueso. La segunda cantera ubicada a la altura del Km 285 de la Carretera Central (antes de llegar al Poblado de Colquijirca) a aproximadamente 10.00 Km de la Laguna de Yanacocha, se trata de una cantera de material compuesta por grava mal graduada y también se puede utilizar como agregado grueso.

Está conformada por depósitos aluviales, constituidos por arenas gruesas a finas y piedras. El Volumen de Explotación se estima en: 11,188.00 m³.

Cantera de piedra.

Se ha elegido como cantera de piedra para las obras de protección de los taludes y obras hidráulicas, a la cantera de la quebrada Yanacocha conformada de piedra de los cerros circundantes a la Laguna.

Los resultados de laboratorio, que se han obtenido de una muestra de roca de la quebrada yanacocha se muestran en el cuadro N° 2.37.

Cuadro N° 2.37 Compresión simple testigo de roca.

DIMENSION (pulgadas)	ÁREA (cm ²)	CARGA A (Kg)	Resistencia a la compresión Simple (Kg/cm ²)
4" x 2"	20.27	11600	572.33

Estos resultados de laboratorio que se muestra en el cuadro N° 2.37, nos indican que la roca presenta alta resistencia a la compresión, que nos indica que es una roca intacta la cual no esta metamorfozada.

CAPÍTULO III: ANÁLISIS DE ESTABILIDAD Y EVALUACIÓN DE LA FILTRACIÓN.

3.1 DIMENSIONAMIENTO DEL DIQUE DE LA PRESA YANACocha.

La represa de Yanacocha se clasifica como una presa de almacenamiento, que almacena agua durante la época lluviosa, desde octubre hasta marzo. Para ser utilizados en la época de estiaje durante los meses de abril a septiembre. El objetivo de la reconstrucción de esta presa es lograr el riego de las áreas de cultivo del centro poblado Villa Pasco, con la ejecución de la obra se mejorará el riego de 450 hectáreas beneficiando a una población de 1 409 habitantes, del centro poblado Villa Pasco.

La topografía de presa Yanacocha es una llanura ondulada, lo que sugiere en una presa de tierra con vertedero de demasías separado, además tenemos como antecedente el funcionamiento de una presa de tierra.

Los materiales disponibles que se pueden encontrar cerca de la presa Yanacocha son sueltos para terraplenes, las mismas que se detalla en el capítulo II. Según las características de estas canteras, estas son adecuadas para una presa de tierra homogénea, por lo que se decide en diseñar una presa de tierra homogénea, cuyas características se determinan analizando su estabilidad y verificando la filtración.

3.1.1 Característica del lecho de fundación.

El área del vaso cuenta con un relieve ondulado a seminal, presentando una morfología de depresión cerrada con desagüe hacia la quebrada Yanacocha, sobre una base de roca caliza, donde se originó la laguna Yanacocha.

La forma de la laguna es irregular (arriñonada), cuyo perímetro está conformada por gravas arcillo limosas y vegetación típica de la zona, así mismo se encuentran las morrenas laterales con afloramiento de rocas del basamento. Las pendientes del perímetro del vaso son moderadas con una ligera inclinación hacia el sur oeste. El relieve actual es el resultado de la erosión de las rocas calcáreas por acción glacial y procesos tectónicos de fallamiento y plegamiento.

El basamento rocoso en la zona de la laguna corresponde a la formación Condorsinga del jurásico inferior, con una cobertura de depósitos inconsolidados del cuaternario reciente, cuyos orígenes son principalmente del proceso de glaciación y desglaciación, originando depósitos fluvio glaciares que se interdigitan con los coluviales en las faldas de los cerros.

En base a una prueba de campo que se basó en la aplicación del ácido sulfúrico a los materiales existentes en la zona de estudio (basamento rocoso, depósitos fluvio glaciares, cantera de arcilla, canteras de agregado), se pudo notar que todos reaccionaban positivamente, lo que indica que son calcáreos.

La falla probable que cruza a la laguna de este a oeste se encuentra cubierta por sedimentos del cuaternario, el cual le sirve de sello e impermeabiliza la cubeta de la laguna evitando las infiltraciones que podrían generarse.

De acuerdo a las evaluaciones geológicas realizadas y en base a los resultados de los ensayos de perforación diamantina, se ha encontrado en la parte central del eje de la presa, materiales arcillosos con una permeabilidad muy baja, las cuales sirven como sellado de las fallas y fisuras, además impiden la filtración del agua hacia estratos inferiores provocando una situación de estanque impermeable. En los extremos del vaso se ha encontrado en las perforaciones diamantinas, la presencia de un horizonte morrénico compuesto por arcilla y grava de permeabilidad media, este se encuentra a 15.00 metros de profundidad en el lado izquierdo y a 1.00 metros de profundidad en el lado derecho.

3.1.2 Aspectos sísmicos del área de estudio.

El Perú es considerado como una de las regiones de más alta actividad sísmica. Forma parte del cinturón circumpacífico, por ello, es necesario considerar la influencia de los sismos en las estructuras a construirse.

El diseño sísmico de las presas de tierra y de enrocado por el método pseudo-estático incluye la selección del coeficiente sísmico a utilizarse en el análisis, el cual depende de la ubicación, condiciones de cimentación, importancia del proyecto, de un posible daño aguas debajo de la presa y

del criterio y experiencia del diseñador. En los métodos pseudo-estáticos la fuerza de la inercia y la presión de poros inducidas por el sismo, son reemplazadas por una fuerza estática horizontal que es proporcional al coeficiente sísmico.

Los métodos más comunes utilizados en el análisis sísmico de estabilidad de presas de tierra y enrocado son los métodos pseudo-estáticos de equilibrio límite. Estos métodos consideran que la acción sísmica puede reemplazarse por una fuerza horizontal proporcional al peso de la masa deslizando ($F = K \cdot W$). (Ruesta Ruiz Pedro, Díaz Collantes Jorge y Alva Hurtado Jorge, El coeficiente sísmico en el diseño de presas de tierra y de enrocado).

En el diseño se puede adoptar un valor empírico de acuerdo a la sismicidad de la zona y al tipo de presa. Se considera que el coeficiente sísmico es uniforme en toda la altura de la presa, variando entre 0.05 y 0.25 en la dirección horizontal y entre 0 y 0.5 del coeficiente sísmico horizontal en la dirección vertical. La presión sísmica del agua está considerada en la fuerza estática.

Según la Figura 3.1 Zonificación del coeficiente sísmico para presas pequeñas y medianas, el proyecto se encuentra ubicada en la zona I, y por tratarse de una presa de tierra el coeficiente sísmico varía entre 0.15 -0.25.

Por lo tanto para determinar exactamente el coeficiente sísmico de la zona donde se ubica el proyecto, recorrimos a la figura N° 3.2 Mapa de iso – aceleraciones del CISMID – UNI.

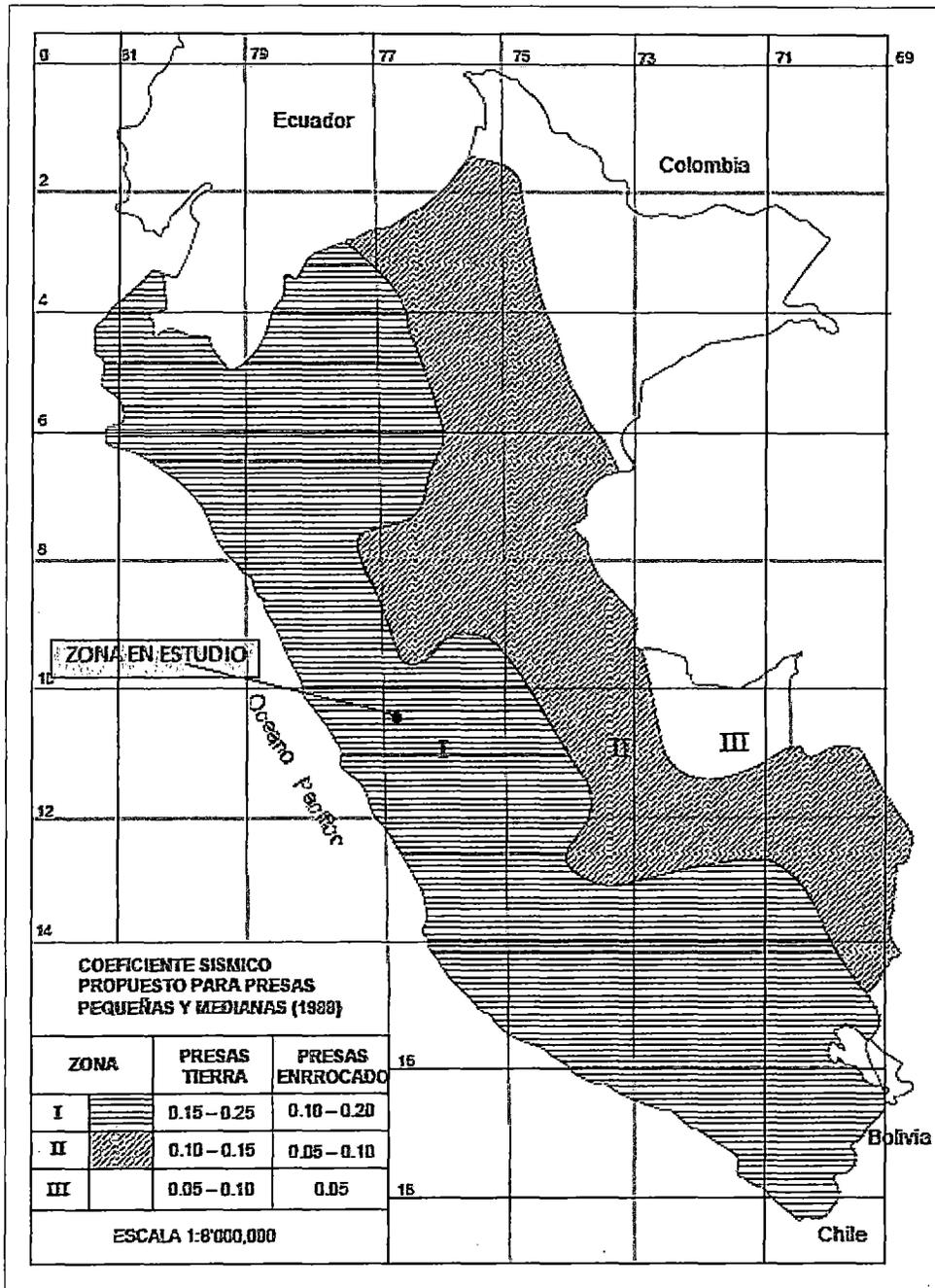


Figura. N° 3.1 Zonificación del coeficiente sísmico para presas pequeñas y medianas (Ruesta Ruiz Pedro, Díaz Collantes Jorge y Alva Hurtado Jorge, El coeficiente sísmico en el diseño de presas de tierra y de enrocado).

Según el mapa de iso - aceleraciones del CISMID – UNI (Figura N° 3.2), la máxima aceleración presentada con una excedencia de 10% en 50 años de vida útil y un periodo de retorno de 500 años para el lugar del proyecto es de 0.30g.

$a_{\text{máx}} = 0.30 \text{ g}$ (para un periodo de retorno de 500 años).

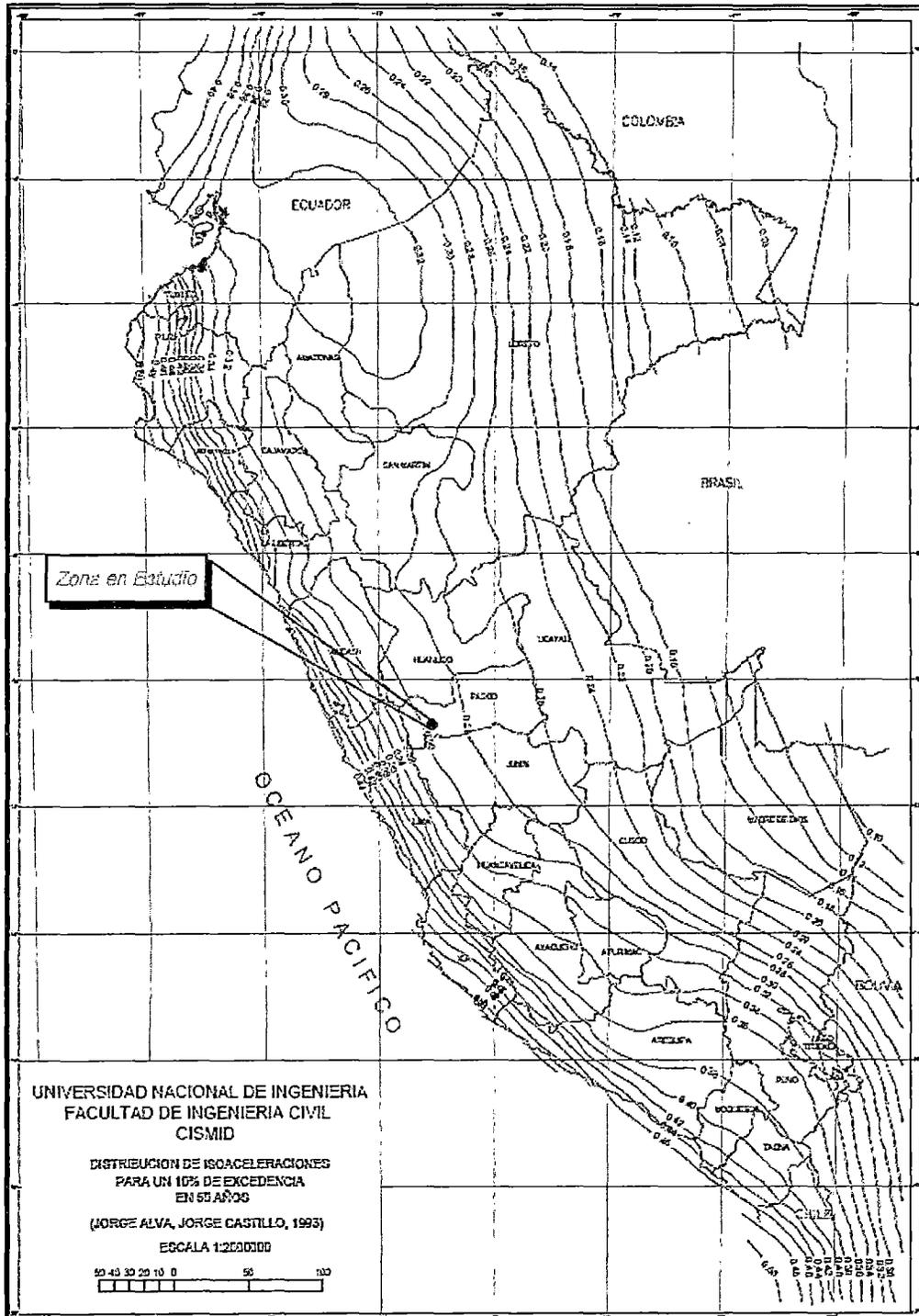


Figura. N° 3.2 Mapa de iso - aceleraciones del CISMID – UNI.

Es aceptada internacionalmente, que el coeficiente sísmico a ser considerado en el análisis de condiciones pseudoestáticas de diseño de taludes, sea obtenido como una fracción que varía entre 1/3 a 2/3 de la

máxima aceleración esperada. Esta recomendación es consistente con las recomendaciones del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos. En consecuencia, para el caso del análisis seudoestático de estabilidad de la presa de tierra consideramos un valor de aceleración básica de diseño horizontal de 1/2 de aceleración pico, es decir 0.15g.

$$a_{\text{diseño}} = 0.15g \text{ (para un periodo de retorno de 500 años).}$$

Por lo tanto para el este proyecto se considera como el valor del coeficiente sísmico en la horizontal 0.15g, y para la vertical 0.2 del coeficiente sísmico horizontal, que para este diseño sería 0.03g.

3.1.3 Características geométricas de la presa.

Las características principales de la presa conformada por materiales sueltos fueron definidas en base a las siguientes normas y determinaciones adjuntas:

Ancho de Corona.

Los cálculos realizados para determinar el ancho de corona de la presa se muestran en el Cuadro N° 3.1 Determinación del ancho de Corona.

Cuadro N° 3.1 Determinación del ancho de la corona.

fuelle	recomendación	caracteres mnemotécnicos
Diseño de presas pequeñas del USBR.	$w = z/5 + 10$ (pies) =17.09pies =5.21 m.	w, ancho de la corona. z, altura de corona=10.81m=35.47pies.
Us Arizona	$w = 3.0$ m	$z < 15.0$ m
G.Post. Lomde las Barrages en terre compactee, Gauthier, Villars edit Paris, 1953.	$w = 1.1\sqrt{z} + 1$ $w = 4.61$ m	
se selecciona $w = 5.00$ m		

Borde Libre.

Los cálculos efectuados para determinar el borde libre son mostrados a continuación en el Cuadro N° 3.2 Determinación del borde libre.

Cuadro N° 3.2 Determinación del borde libre.

fuelle	recomendación	caracteres mnemotécnicos
Código de Presas de Arizona	Por Stevenson:	h, altura de la ola (m)
	$h=0.76+0.34 F^{1/2}-0.26F^{1/4}$	F, longitud máxima del embalse (Km)
	h = 0,91m	= 1.75 Km
Molitor	$h = 0.75 + 0.032 \sqrt{F}$	F < 33km
	$- 0.29 \sqrt[3]{F}$	
	h = 0.84m	
Desing Of Small Dams, US Bureau Of Reclamation	h = 0.82 m	Aplicando el diagrama de la American Society Of Civil Engineers, ASCE, referencia 28, pp 273 del libro Desing Of Small Dams, US Burean Of Reclamation.
Se selecciona $h_1 = 0,90$ m		

Corrimiento.

El cálculo de la altura de corrimiento de la ola en el talud aguas arriba de la presa se presentan en el siguiente Cuadro N° 3.3 Altura de corrimiento.

Cuadro N°3.3 Altura de corrimiento.

fuelle	recomendación	caracteres mnemotécnicos
El corrimiento o ron up de la ola sobre el talud 1:3	$hc = 0.75h + \frac{v^2}{2g}$	La velocidad de esa ola se determina en la formula.
	hc = 1.23m	V = 1.50 + 2h (m/s)
		V = 3,30 m/s = 12km/h
Sherard	hc = 1.5 h	
	hc = 1.35m	
Se selecciona $h_1 = 1,35$ m		

Taludes del relleno del cuerpo de la presa

De acuerdo con normas italianas y americanas los taludes para rellenos impermeables podrían ser 1:2.5 aguas arriba y 1: 2.0 aguas abajo. Sin embargo por el suelo fino del terreno donde se implantaría la presa y la permeabilidad media del relleno, los taludes deben ser más tendidos, recomendándose los siguientes taludes:

Aguas arriba 1: 3

Aguas abajo 1:2.5

Material del Cuerpo de Presa - Material Morrénico.

El material a ser utilizado en el cuerpo de la presa corresponde a la cantera ubicada en la quebrada Yanacocha - Villa de Pasco Tinyahuarco, que se clasifica como un suelo tipo CL-ML. El modelo geotécnico se debe considerar una sección típica de la Presa, con cimentación conformada por un material arcilloso.

Determinación del NAMI.

El nivel de aguas mínima (NAMI), se determinó en base al nivel del canal de conducción existente ya que solo se va reconstruir por tramos, además se calculó el volumen muerto ($VM = 0.87 \text{ MMC}$) en el capítulo II, siendo este mucho menor al volumen en la cota del NAMI (ver Cuadro N° 3.4).

NAMI para operación = 4,242.00 msnm.

Determinación del NAMO.

Para el cálculo del nivel de aguas máximas ordinarias (NAMO), se realizó sumando al volumen del NAMI, el volumen útil el cual se estimó en el capítulo II (2.76MMC), a este volumen se le sumo las perdidas por evaporación.

$$V_{\text{total 1}} = V_{\text{útil}} + V_{\text{muerto}}(\text{NAMI})$$

$$\begin{aligned} V_{\text{total 1}} &= 2.76 + 2.30 \\ &= 5.06 \end{aligned}$$

$$V_{\text{total 2}} = V_{\text{total 1}} + V_{\text{Evaporación}}$$

$$V_{\text{total 2}} = V_{\text{total 1}} + E_{\text{prom anual}} * A_{\text{vaso}}$$

$$V_{\text{total 2}} = 5.06 + (0.36 * 600255.22) / 1000000 = 5.27$$

VOLUMEN EN NAMO = 5.27MMC.

Determinación del NAME.

El nivel de agua máximas extraordinarias (NAME) será el nivel de agua máximo ordinario (NAMO), más el tirante del caudal de máximas avenidas que descarga en el aliviadero.

Descarga por aliviadero $10 \text{ m}^3/\text{s}$.

Velocidad de la crecida 3.30 m/s .

Área de descarga $10/3.30 = 3.03 \text{ m}^2$, con un ingreso de 3.00 m de luz

Tirante = $3.03/3 = 1.01$

Energía Específica (E).

Esta energía específica es la que produce la descarga por el canal de salida del aliviadero de demasías.

$$E = 1.01 + \frac{3.30^2}{2g} = 1.57 \text{ m}$$

De este modo el NAME resultaría igual a:

$$\text{NAME} = \text{NAMO} + 1.01 = 4250.40 + 1.01$$

$$\text{NAME} = 4251.40 \text{ msnm}$$

Niveles de operación de la presa.

- Fondo en la boquilla	4,243.00 msnm.
- Fondo presa con limpieza de base una capa de 1.00m	4,242.00 msnm.
- NAMI	4,244.80 msnm.
- NAMO	4,250.40 msnm.
- NAME, con altura de avenida	4,251.41 msnm.
- Borde libre oleaje + crecimiento en talud	1.35 m.
- Coronación de la presa	4,252.81 msnm.
- Altura de la presa (H)	10.81 m.
- Sobreelevación por asentamiento Represa $0.005H$	0.05 m

Los volúmenes para las cotas y los niveles de operación de la presa fueron determinadas de acuerdo a la topografía que se muestra en el anexo de planos (P-01), los cuales se aprecian en el Cuadro N° 3.4.

Cuadro N° 3.4 Cota vs Volumen para los niveles de operación de la presa Yanacocha (Elaboración propia).

COTA msnm	PROFUNDIDAD m	AREA (m2)	VOLUMEN	VOLUMEN	VOLUMEN	VOLUMEN	OBSERVACION
			PARCIAL (m3)	ACUMULADO (m3)	PARCIAL (MMC)	ACUMULADO (MMC)	
4255	13.0	695,786.42	686,028.34	8,290,304.27	0.69	8.29	
4254	12.0	676,270.26	666,817.05	7,604,275.93	0.67	7.60	
4253	11.0	657,363.83	648,146.17	6,937,458.89	0.65	6.94	
4252.81	10.81	653,861.12	644,587.96	6,814,311.12	0.64	6.81	CORONA
4252	10.0	638,928.50	629,418.78	6,289,312.72	0.63	6.29	
4251	9.0	619,909.07	610,082.14	5,659,893.94	0.61	5.66	
4250.4	8.4	607,343.49	597,326.87	5,269,841.42	0.60	5.27	NAMO
4250	8.0	600,255.22	590,131.58	5,049,811.79	0.59	5.05	
4249	7.0	580,007.94	568,954.64	4,459,680.21	0.57	4.46	
4248	6.0	557,901.33	545,556.27	3,890,725.58	0.55	3.89	
4247	5.0	533,211.21	526,424.94	3,345,169.31	0.53	3.35	
4246	4.0	519,638.68	512,836.12	2,818,744.36	0.51	2.82	
4245	3.0	506,033.56	499,206.14	2,305,908.24	0.50	2.31	
4244.80	2.8	503,302.59	497,840.65	2,304,542.76	0.50	2.30	NAMI
4244	2.0	492,378.71	485,526.43	1,806,702.10	0.49	1.81	
4243	1.0	478674.14	401,023.69	1,321,175.68	0.40	1.32	
4242	0.0	323,373.23	249,624.11	920,151.99	0.25	0.92	
4241	-1.0	175,874.99	142,432.47	670,527.88	0.14	0.67	
4240	-2.0	108,989.94	102,565.27	528,095.42	0.10	0.53	
4239	-3.0	96,140.59	89,991.14	425,530.15	0.09	0.43	
4238	-4.0	83,841.69	77,967.46	335,539.01	0.08	0.34	
4237	-5.0	72,093.23	66,494.24	257,571.55	0.07	0.26	
4236	-6.0	60,895.24	55,571.46	191,077.32	0.06	0.19	
4235	-7.0	50,247.69	45,199.14	135,505.85	0.05	0.14	
4234	-8.0	40,150.59	35,377.27	90,306.72	0.04	0.09	
4233	-9.0	30,603.95	26,105.85	54,929.45	0.03	0.05	
4232	-10.0	21,607.75	17,297.91	28,823.60	0.02	0.03	
4231	-11.0	12,988.07	8,830.95	11,525.68	0.01	0.01	
4230	-12.0	4,673.82	2,694.74	2,694.74	0.00	0.00	
4229	-13.0	715.65	0	0	0.00	0.00	

Protección de taludes.

Para calcular el espesor de las rocas que servirán como protección del desgaste por oleaje del talud aguas arriba consideramos la siguiente ecuación: $e = cv^2$, de donde: v , es la velocidad de la avenida 3.30 m/s

$$c, \quad \text{para } \gamma = 2.50 \\ z = 4 \quad \left. \vphantom{c} \right\} 0.027$$

$$e = 0.027 \times 3.302 = 0.30 \text{ m.}$$

De acuerdo al cuerpo de Ingenieros USA

Para:

Altura de ola (m)	Espesor mínimo (m)	D ₅₀ mínimo (m)
0.90	0.45	0.30

Se adopta 0.50 m

Debe eliminarse rocas menores de 0.15m.

En peso W, el 50% debe ser igual o mayor de

$$W = 0.52 \gamma e^3 \text{ tm}$$

$$W = 0.52 \times 2.50 \times 0.50^3 = 0.163 \text{ tm}$$

$$W \text{ 50\% sup} = 163\text{kg}$$

$$W \text{ 50\% sup} = 170\text{kg.}$$

Diseño del Filtro.

Para el cálculo del filtro se pondrá al pie del talud aguas abajo, cuya función al ser más permeable permite el paso del agua y retener los finos que puedan ser arrastrados por la filtración evitando así la tubificación, para diseñar el filtro partimos de la siguiente ecuación:

$$e = 2 \sqrt{\frac{q\ell}{k}}$$

k, permeabilidad del filtro, 10^{-2}

$$e = 2 \sqrt{\frac{1.07 \times 10^{-4} \times \ell}{10^{-2}}} = 0.207 \sqrt{\ell}$$

	ℓ (m)	
	20	16
c	0.92	0.82

Con ℓ = 16.00m

Con un 20% de taponamiento e= 1.00m

30% de taponamiento $e = 1.17m$

Se adopta 1.20m

Factores de seguridad mínimos.

Para el caso de presas de tierra la U.S Army Corp of Engineers, propone que los factores mínimos requeridos para considerar su talud estable, son aquellos propuestos en el Cuadro N° 3.5.

Cuadro N° 3.5 Factores de seguridad mínimos para análisis de estabilidad en presas de tierra (Vallarino Eugenio, Tratado básico de presas, tomo I, 5ta Edición).

	SIN SISMO	CON SISMO
Distintas fases de construcción	1.3(EP)- 1.2(N)- 1.2(HO)	1.2(EP) - 1.0(N) - 1.0(HO)
Embalse lleno	1.4	1.4(EP) - 1.3(N) - 1.4(HO)
Desembalse rápido	1.3	1.3(EP) - 1.0(N) - 1.1(HO)

EP: Para escollera con pantalla o diafragma de hormigón o material asfáltico.

N: Presas heterogéneas de escollera o tierra con núcleo o presas con relleno hidráulico.

HO: Presas de tierra homogéneas.

Determinación de los factores geotécnicos.

En el cuadro N° 3.6 se muestra los valores típicos de parámetros de resistencia para rocas, este cuadro lo utilizaremos para determinar los parámetros de resistencia del enrocado, que será de roca del tipo granito o basalto.

Cuadro N° 3.6 Valores típicos de parámetros de resistencia para rocas (Hoek y Bray, 1981).

Tipo de roca	Peso unitario seco kN/m ³	Cohesión (Mpa)	Angulo de fricción (°)
Rocas ígneas duras: granito basalto	25-30	35-55	35-45
Rocas metamórficas: cuarcita, neiss, pizarras.	25-28	20-40	30-40
Rocas sedimentarias duras: caliza, dolomita, arenisca.	23-28	10-30	35-45
Rocas sedimentarias blandas: arenisca, lutitas, limolitas.	17-23	1-20	25-35

En el cuadro N° 3.7 se muestra las propiedades físicas comunes de los suelos, este cuadro nos permitirá conocer las propiedades físicas del material de filtro, que será el material encontrado en la cantera 2 (quebrada Angascancha), cuya clasificación es GW, la compacidad que se va considerar será densa ya que será compactada.

Cuadro N° 3.7 Propiedades físicas comunes de suelos.

Material	Compacidad	D _r (%) (1)	N (2)	Densidad seca (gr/cm ³)	Índice de poros (e)	Ángulo de rozamiento interno
GW: Gravas bien graduadas, mezclas de grava y arena	Densa	75	90	2.21	0.22	40
	Medianamente densa	50	55	2.08	0.28	36
	Suelta	25	<28	1.97	0.36	32
GP: Gravas mal graduadas, mezclas de grava y arena	Densa	75	70	2.04	0.33	38
	Medianamente densa	50	50	1.92	0.39	35
	Suelta	25	<20	1.83	0.47	32
SW: Arenas bien graduadas, arenas con grava	Densa	75	65	1.89	0.43	37
	Medianamente densa	50	35	1.79	0.49	34
	Suelta	25	<15	1.70	0.57	30
SP: Arenas mal graduadas, arenas con grava	Densa	75	50	1.76	0.52	36
	Medianamente densa	50	30	1.67	0.60	33
	Suelta	25	<10	1.59	0.65	29
SM: Arenas limosas	Densa	75	45	1.65	0.62	35
	Medianamente densa	50	25	1.55	0.74	32
	Suelta	25	<8	1.49	0.80	29
ML: Límos inorgánicos, arenas muy finas	Densa	75	35	1.49	0.80	33
	Medianamente densa	50	20	1.41	0.90	31
	Suelta	25	<4	1.35	1.00	27
CL: Arcillas baja plasticidad			30-2 (3)	2.15-1.5 (4)		28-25
MH: Limos alta plasticidad			30-2 (3)	2.15-1.5 (4)		25-22
CH: Arcillas alta plasticidad			30-2 (3)	2.15-1.5 (4)		20-17

(1) D_r es densidad relativa ó índice de densidad.
(2) N es el número de golpes por 30 cm de penetración en el SPT.

En el cuadro N° 3.8 se muestra los valores de la cohesión para las arcillas según su consistencia, según la cantera 1 que se utilizará para la conformación del dique de la presa, es un material arcilloso, el cual se

compactara en capas según los resultados de laboratorio, por lo que se considera de una consistencia media con una cohesión de 0.25 kg/cm².

Cuadro N° 3.8 Valores de la cohesión para arcillas según su consistencia.

CONSISTENCIA	IDENTIFICACIÓN EN CAMPO	COHESIÓN kg / cm ²
Muy blanda	Fácilmente penetrable varios cms. con el puño	< 0.125
Blanda	Fácilmente penetrable varios cms. con el pulgar	0.125-0.25
Media	Se requiere un esfuerzo moderado para penetrarlo varios cms. con el pulgar	0.25-0.5
Rígida	Indentable fácilmente con el pulgar	0.5-1
Muy rígida	Indentable fácilmente con la uña del pulgar	1-2
Dura	Difícil de indentar con la uña del pulgar	2

Con los resultados de las investigaciones geotécnicas de campo y los ensayos de laboratorio (ver anexo de resultados de laboratorio), se determinó los parámetros físicos y de resistencia para el suelo de cimentación, para la cantera 1 se realizó el ensayo de soporte de california (CBR), con lo que se determinó el óptimo contenido de humedad y la densidad seca y el CBR, el ángulo de rozamiento y la cohesión se determinó del cuadro N° 3.7 y 3.8 respectivamente, para el material de enrocado cuyo diámetro promedio deberá ser de 0.5m, las características físicas se determinó del cuadro N° 3.6 sabiendo que emplearan rocas ígneas duras del tipo granito o basalto para la conformación del enrocado. Para determinar las características físicas del filtro se empleó el cuadro N° 3.7 sabiendo que usaremos el material disponible en la cantera 2 (quebrada Angascancha), cuya clasificación es GW. En el Cuadro N° 3.9 Se muestra los parámetros geotécnicos de resistencia utilizados para el análisis de estabilidad de la presa Yanacocha.

Cuadro N° 3.9 Parámetros geotécnicos de resistencia (elaboración propia).

Suelo o Material	γ_t KN/M 3	γ_t saturado KN/M3	c KN/M2	ϕ (°)
Suelo de cimentación	15.3	19.42	10.79	28
Material de cantera 1(CL-ML).	21.12	22.92	24.52	30
Material para enrocado.	25	25	40	40
Material para filtro (GW).	21.68	23.45	30	40

3.2 ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE LA PRESA MEDIANTE EL PROGRAMA SLIDE 5.0.

El programa Slide 5.0 es un software para el análisis de estabilidad de taludes, este programa en 2D tiene una herramienta que permite importar gráficos de CAD, por lo que es fácil de crear los modelos a realizar el análisis de estabilidad, se puede evaluar la estabilidad de falla circular y no circular en taludes de suelos y rocas.

Slide analiza la estabilidad en superficies de deslizamientos usando métodos de equilibrio límite con rodajas verticales. Analiza superficies de deslizamiento individuales o los métodos pueden ser aplicados a buscar y localizar la superficie de deslizamiento crítico para un talud dado.

Los métodos de análisis que utiliza el programa son Bishop, Janbu, Spencer, GLE /Morgenstern-Price y otros métodos de análisis. Para el análisis de la presa se empleara el método de Morgenstern-Price.

Simulación N° 1 de estabilidad en la presa con talud 1:3 aguas arriba y 1:2.5 aguas abajo sin pantalla impermeabilizada.

En la figura N° 3.3 se muestra el diseño considerado para la simulación N°1 del análisis de estabilidad, para este análisis consideramos un enrocado de 1.2 m de espesor tanto en el talud aguas arriba como en el talud aguas abajo, se traza la filtración de la línea superior de flujo de acuerdo al método de Kozeny, y utilizaremos los parámetros geotécnicos de resistencia del cuadro N° 3.9.

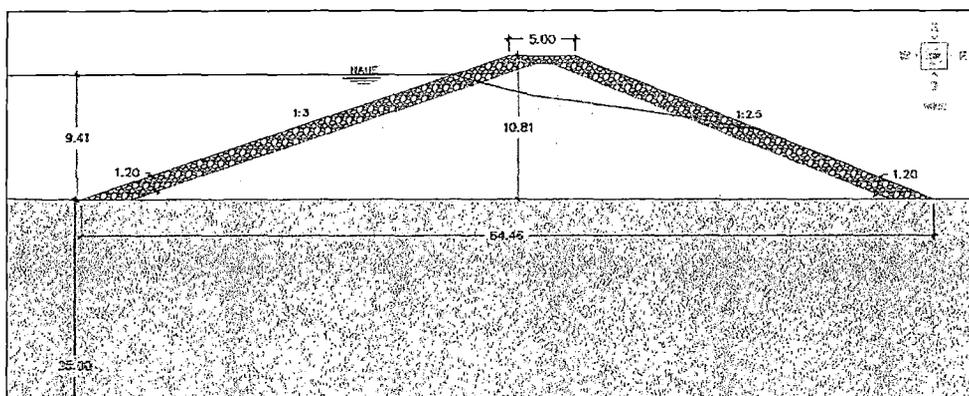


Figura N° 3.3 Diseño considerado para análisis de estabilidad–simulación N°1.

Datos.

Talud aguas arriba: 1/3

Talud agua abajo: 1/2.5

Ancho de corona: 5 m.

Borde libre: 1.4m

Fondo de presa con limpieza de base de 1.00 m: 4242.00 msnm.

Name (nivel máximo de aguas extraordinarias): 4251.41 msnm.

Nivel de corona: 4252.81 msnm.

Altura de presa : 10.81 m.

Altura de agua : 9.41m.

Ancho de enrocado: 1.2 m.

Coefficiente sísmico horizontal: 0.15 g.

Coefficiente sísmico vertical: 0.03g.

Método utilizado para el análisis: Morgenstern-Price.

RESULTADOS.

CONDICION	FACTOR DE SEGURIDAD
a) Presa llena + sismo, talud aguas abajo	1.131 No.
b) Presa llena sin sismo, talud aguas abajo	1.600 o.k.
c) Presa llena + sismo, talud aguas arriba	1.126 No.
d) Presa llena sin sismo, talud aguas arriba	1.661 o.k.
e) Término de construcción + sismo, aguas arriba	1.755 o.k.
f) Término de construcción sin sismo, aguas arriba	2.759 o.k.
g) Término de construcción + sismo, aguas abajo	1.649 o.k.

h) Término de construcción sin sismo, aguas abajo 2.476 o.k.

En las figuras 3.4, 3.5, 3.6, 3.7, 3.8, 3.9, 3.10 y 3.11 se muestran los resultados de estabilidad para las diferentes etapas de operación de la presa, del resumen anterior no se cumple la estabilidad de presa para el factor mínimo de seguridad mostrado en el cuadro N° 3.5, cuando la presa se encuentra llena y con sismo tanto en el talud aguas arriba, como el talud aguas abajo.

Por lo que se desarrollara otro diseño considerando la impermeabilización del talud aguas arriba.

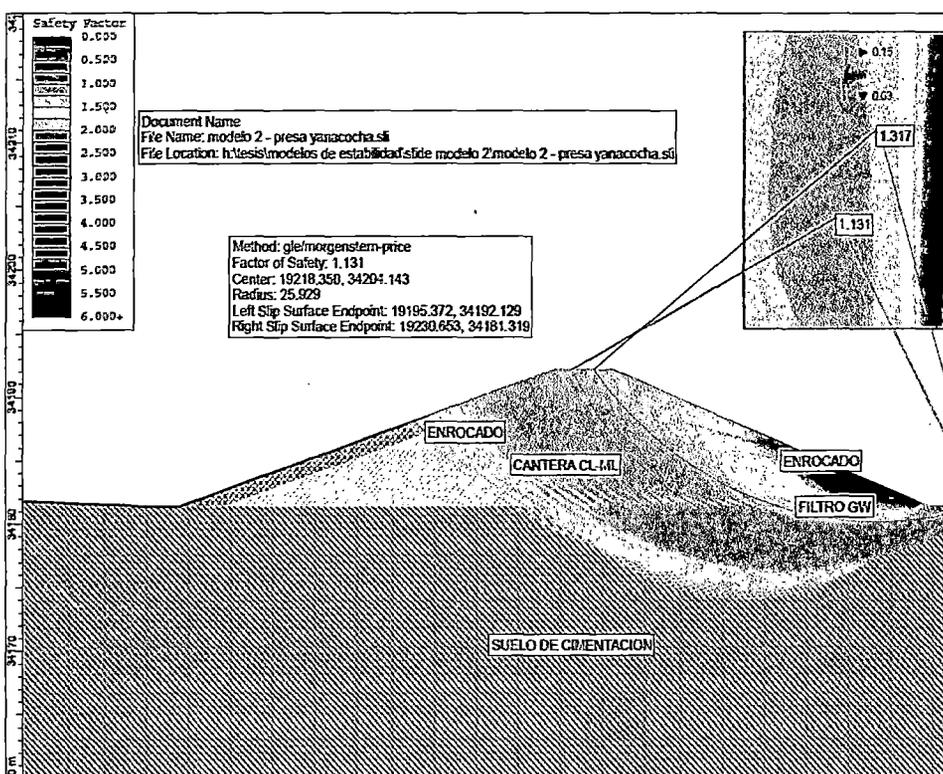


Figura N° 3.4 Presa llena con sismo, talud aguas abajo.

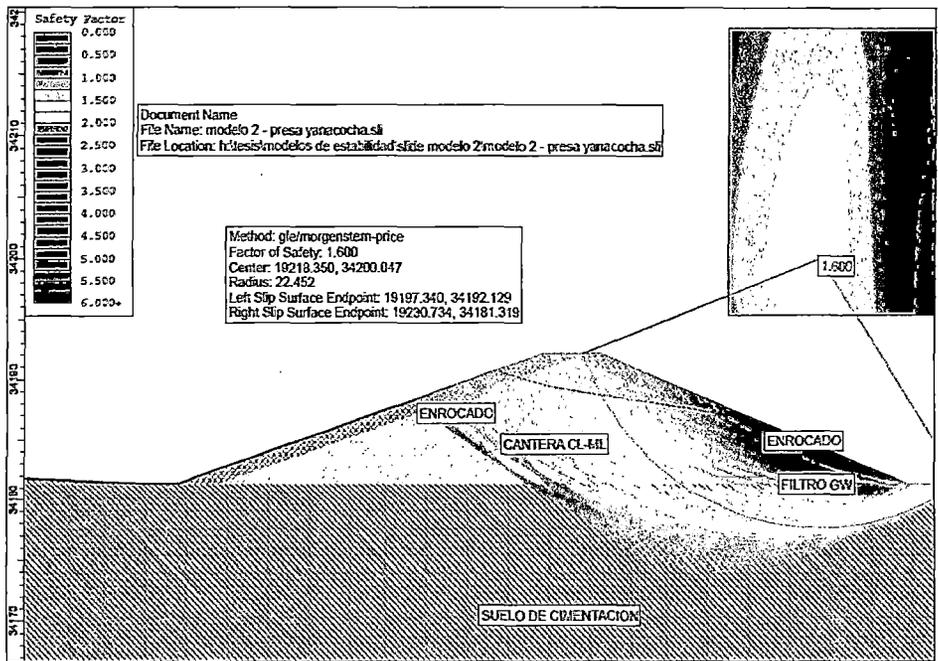


Figura N° 3.5 Presa llena sin sismo, talud aguas abajo.

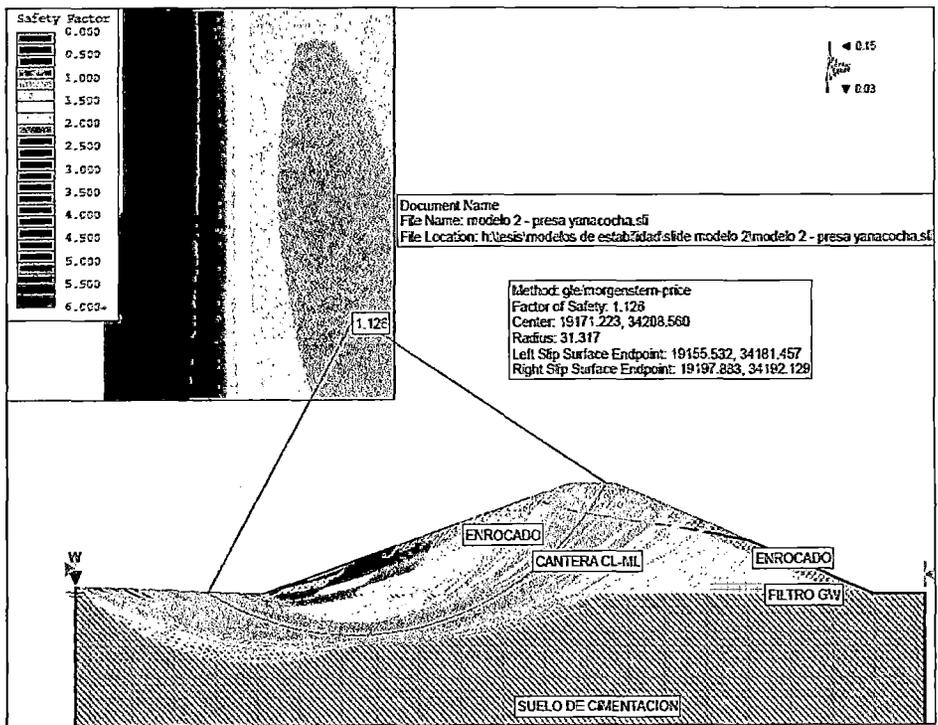


Figura N° 3.6 Presa llena con sismo, talud aguas arriba.

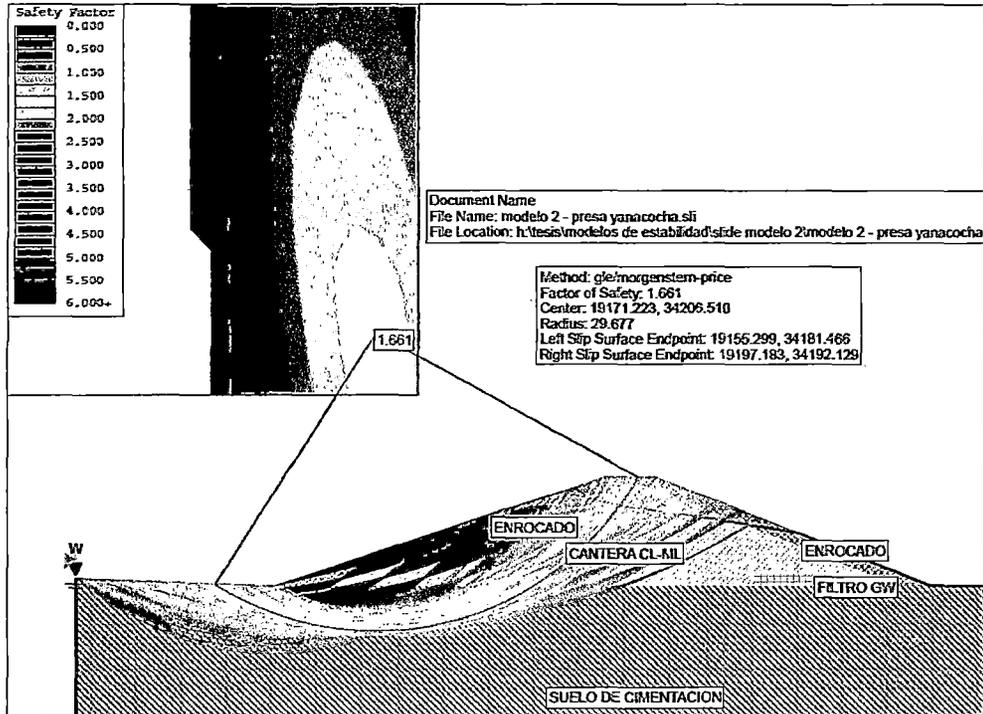


Figura N° 3.7 Presa llena sin sismo, talud aguas arriba.

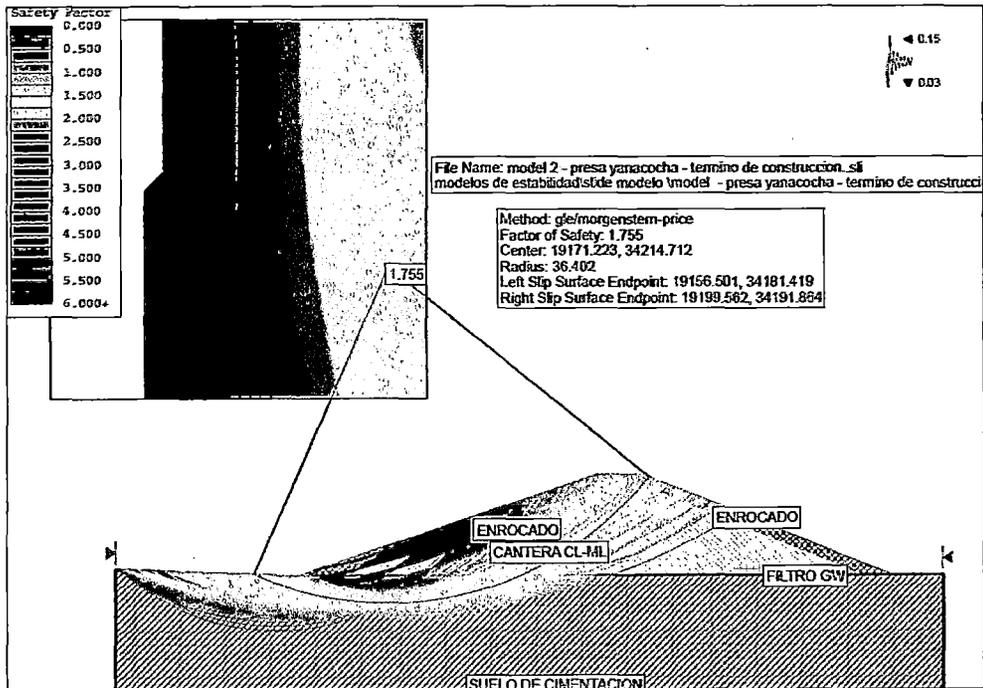


Figura N° 3.8 Término de construcción con sismo, aguas arriba.

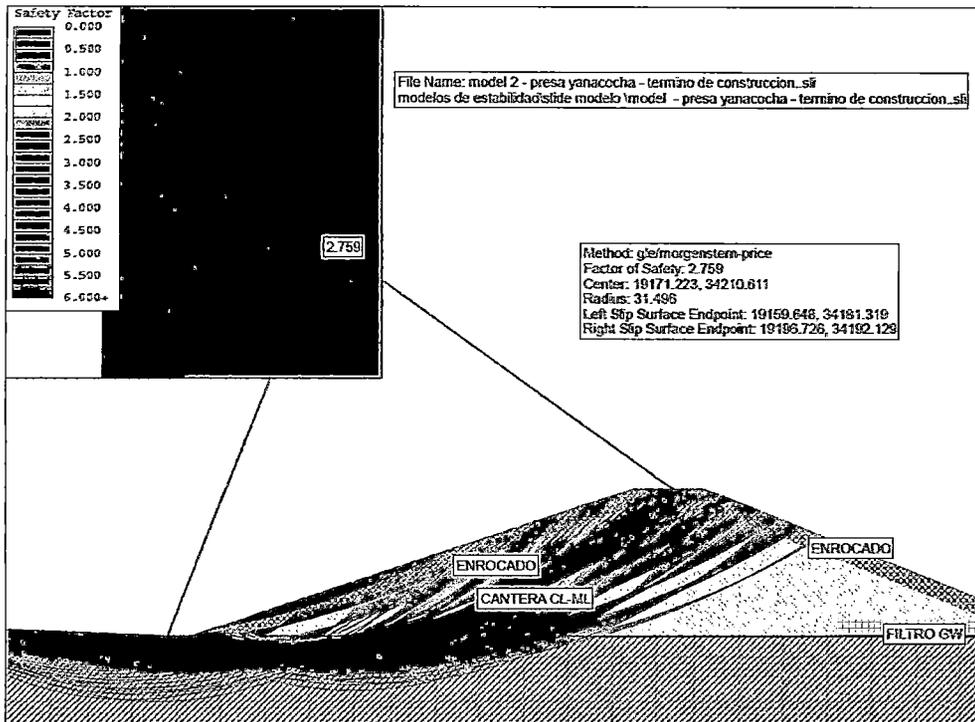


Figura N° 3.9 Término de construcción sin sismo, aguas arriba.

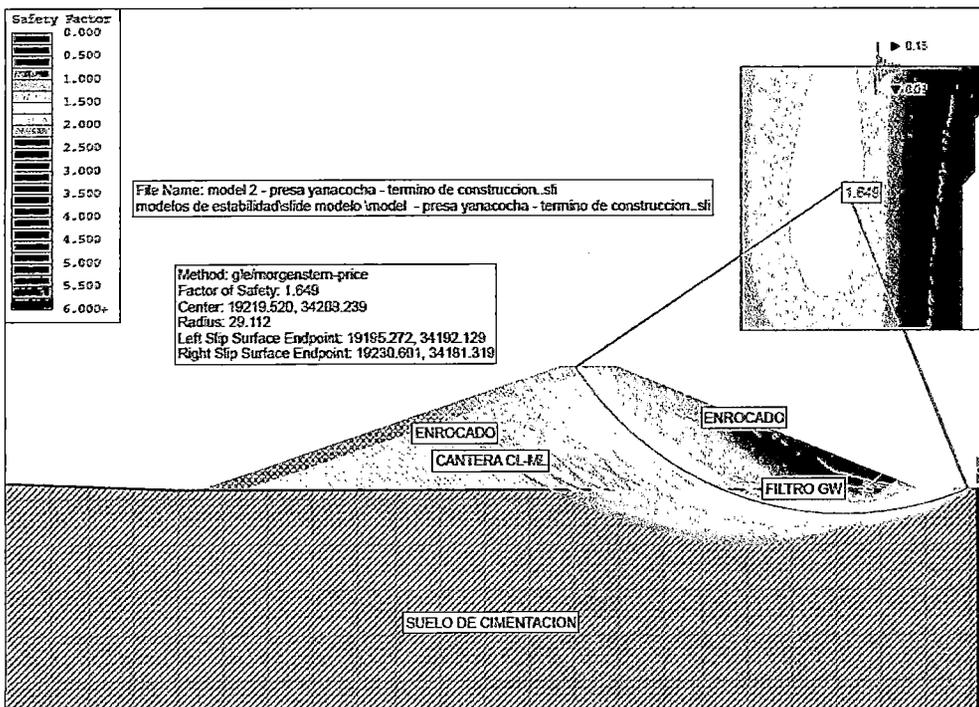


Figura N° 3.10 Término de construcción con sismo, aguas abajo.

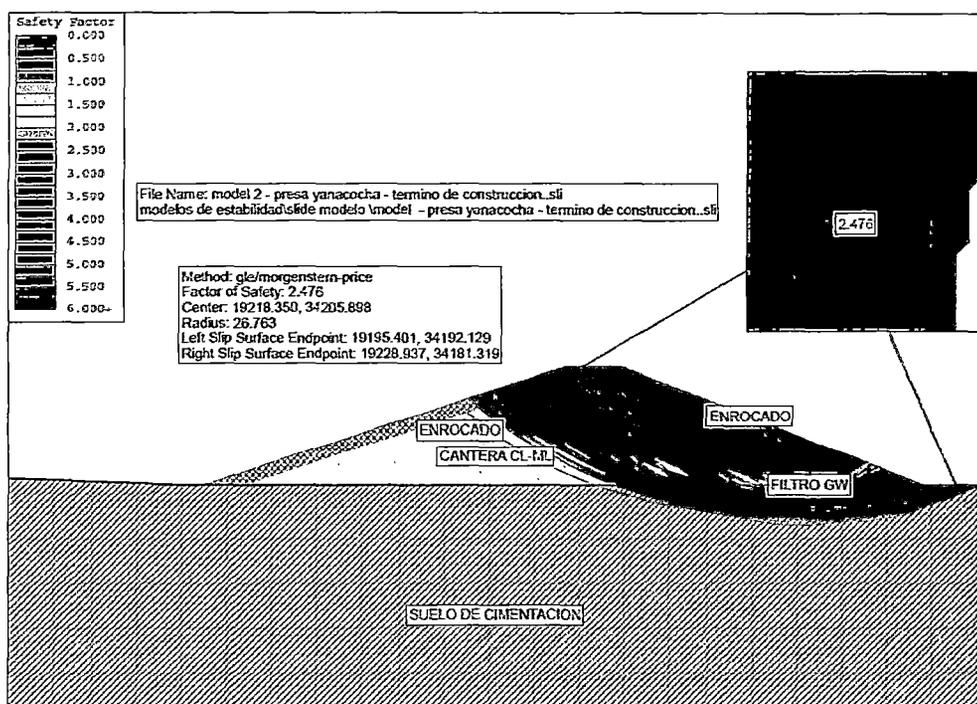


Figura N° 3.11 Término de construcción sin sismo, aguas abajo.

Simulación N° 2 de estabilidad en la presa con talud 1:3 aguas arriba impermeabilizada y 1:2.5 aguas abajo, con pantalla impermeable de 5.5m.

En la figura N° 3.12 se muestra el diseño considerado para la simulación N°2 del análisis de estabilidad, para este análisis consideramos un enrocado de 1.50 m de espesor, tanto en el talud aguas arriba como en el talud aguas abajo, además se impermeabilizara el talud aguas arriba con geomenbrana, hasta la pantalla que se encuentra al pie del talud aguas arriba, y utilizaremos los parámetros geotécnicos de resistencia del cuadro N° 3.9.

Diseño considerado.

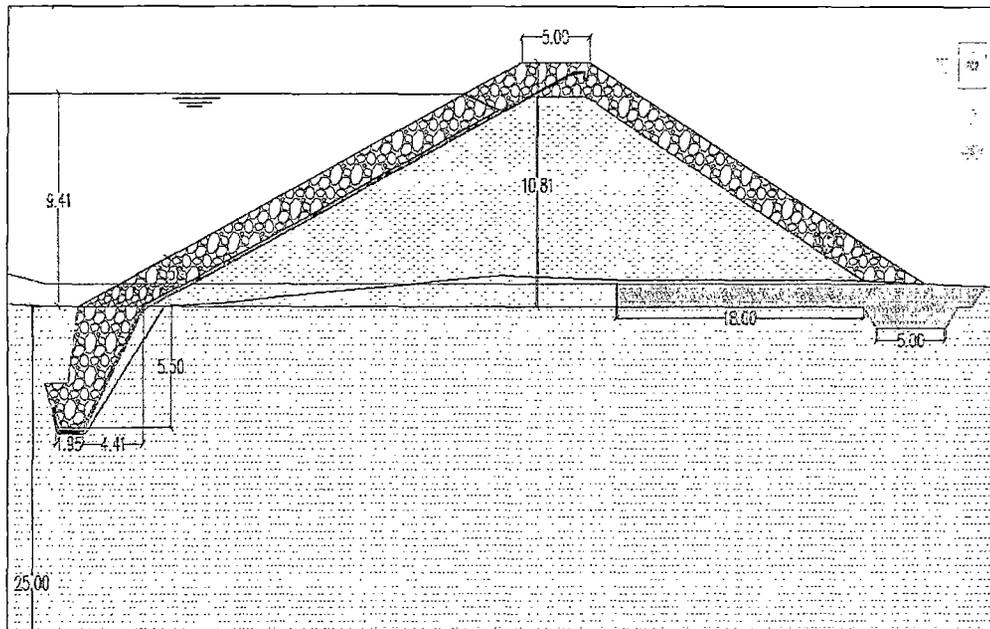


Figura N° 3.12 Diseño considerado para análisis de estabilidad – simulación N°2.

Datos.

Talud aguas arriba: 1/3

Talud agua abajo: 1/2.5

Ancho de corona: 5 m.

Borde libre: 1.4m

Fondo de presa con limpieza de base de 1.00 m: 4242.00 msnm.

Name (nivel máximo de aguas extraordinarias): 4251.41 msnm.

Nivel de corona: 4252.81 msnm.

Altura de presa : 10.81 m.

Altura de agua : 9.41m.

Ancho de enrocado: 1.5 m.

Profundidad de pantalla impermeable al pie del talud aguas arriba: 5.50 m.

Coefficiente sísmico horizontal: 0.15 g.

Coeficiente sísmico vertical: 0.03g.

Método utilizado para el análisis: Morgenstern-Price.

RESULTADOS.

CONDICION	FACTOR DE SEGURIDAD
a) Presa llena + sismo, talud aguas abajo	1.478 o.k.
b) Presa llena sin sismo, talud aguas abajo	2.235 o.k.
c) Presa llena + sismo, talud aguas arriba	1.464 o.k.
d) Presa llena sin sismo, talud aguas arriba	2.167 o.k.
e) Término de construcción + sismo, aguas arriba	1.631 o.k.
f) Término de construcción sin sismo, aguas arriba	2.487 o.k.
g) Término de construcción + sismo, aguas abajo	1.550 o.k.
h) Término de construcción sin sismo, aguas abajo	2.340 o.k.

En las figuras 3.13, 3.14, 3.15, 3.16, 3.17, 3.18, 3.19 y 3.20 se muestran los resultados de estabilidad para las diferentes etapas de operación de la presa, del resumen anterior se cumple la estabilidad de presa para los factores mínimos de seguridad mostrado en el cuadro N° 3.5.

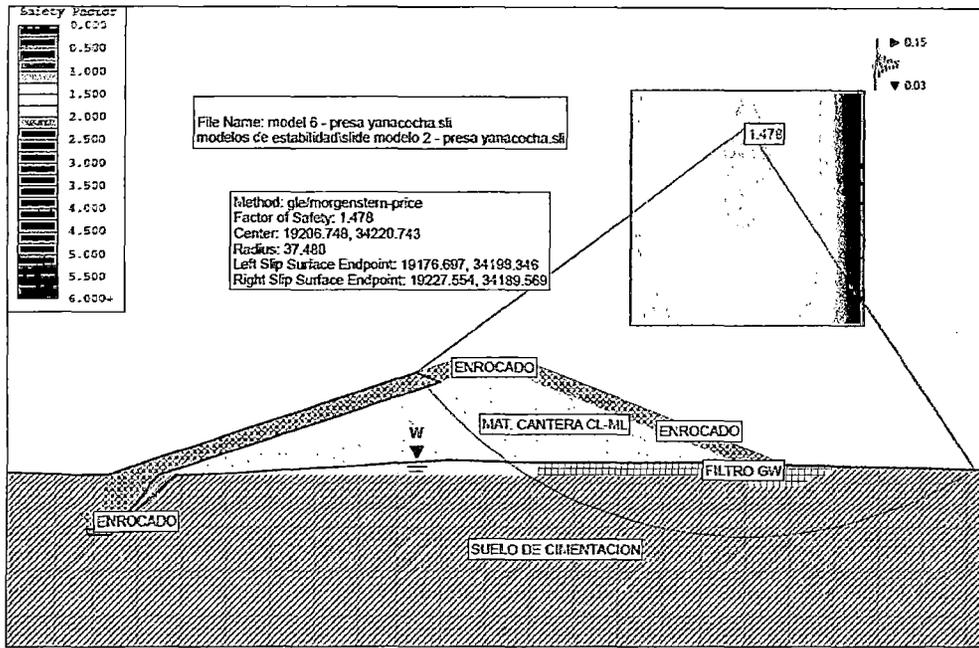


Figura N° 3.13 Presa llena con sismo, talud aguas abajo.

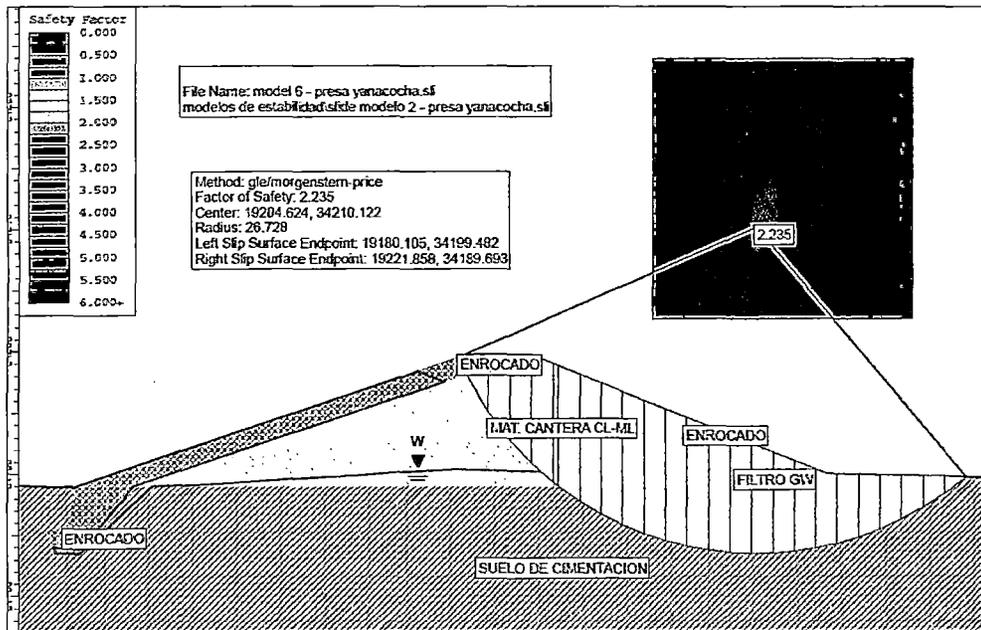


Figura N° 3.14 Presa llena sin sismo, talud aguas abajo.

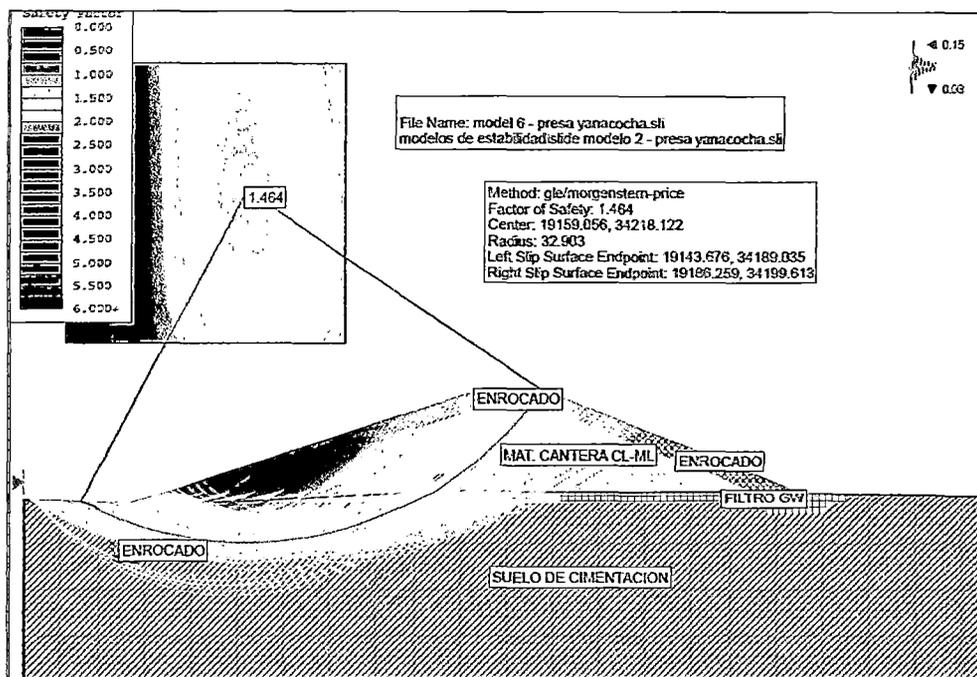


Figura N° 3.15 Presa llena con sismo, talud aguas arriba.

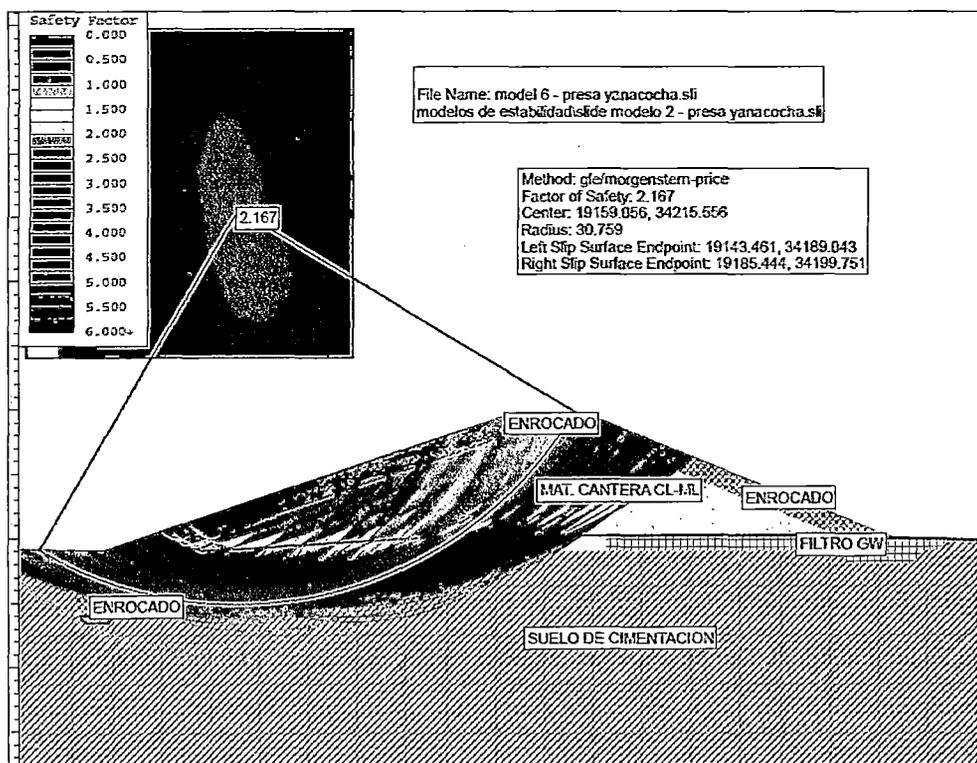


Figura N° 3.16 Presa llena sin sismo, talud aguas arriba.

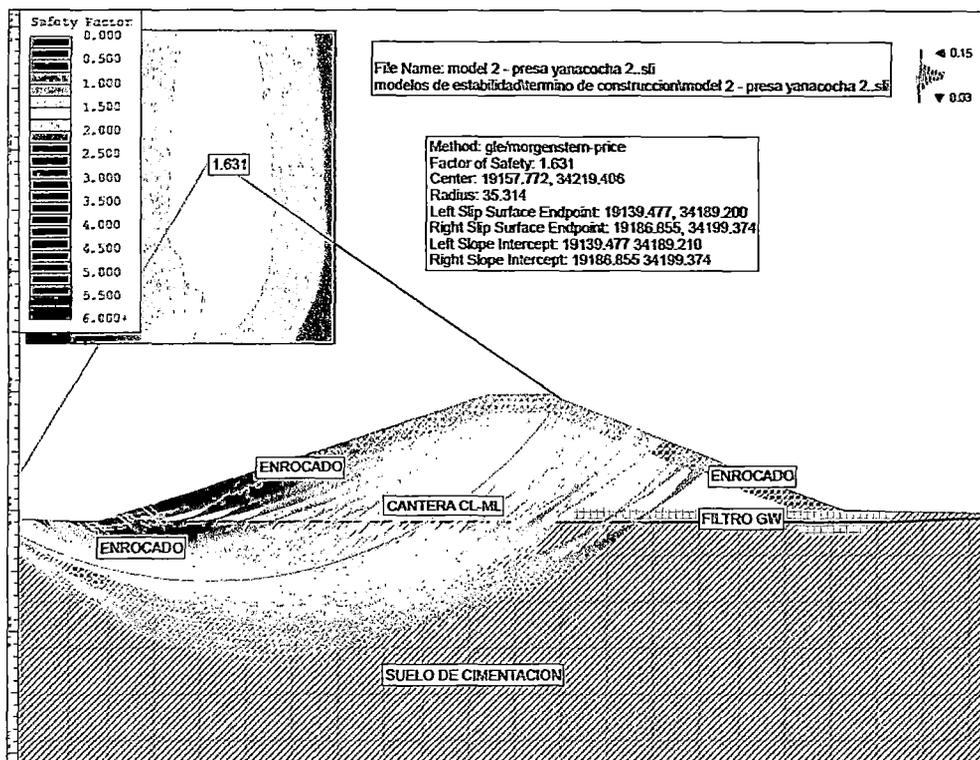


Figura N° 3.17 Término de construcción con sismo, talud aguas arriba.

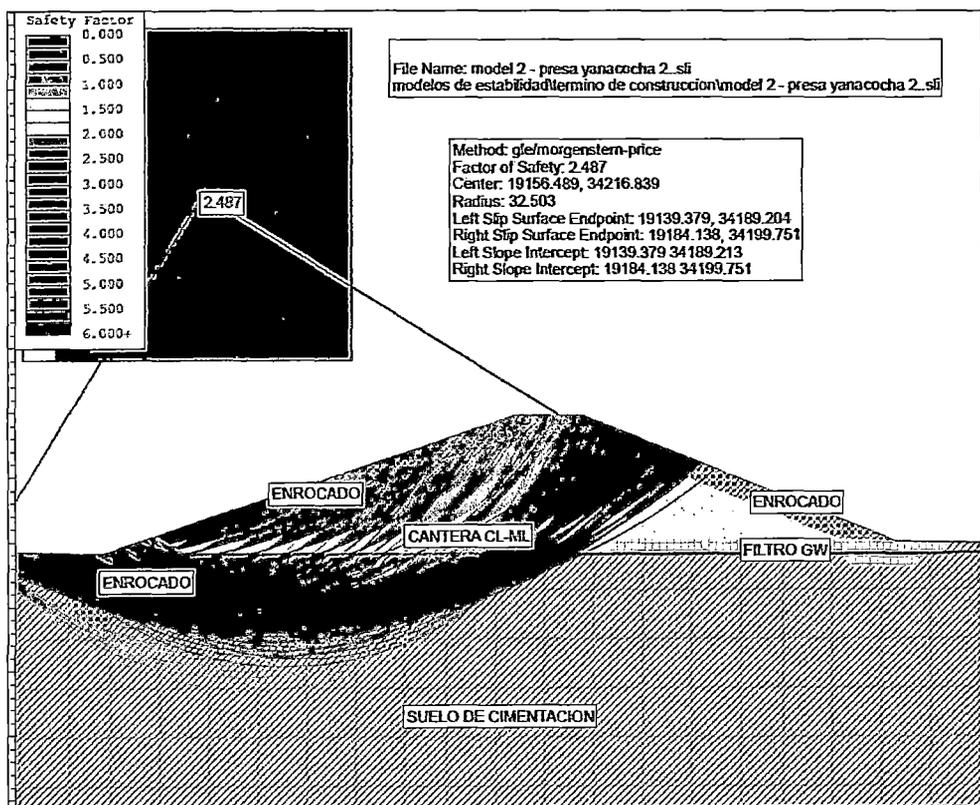


Figura N° 3.18 Término de construcción sin sismo, talud aguas arriba.

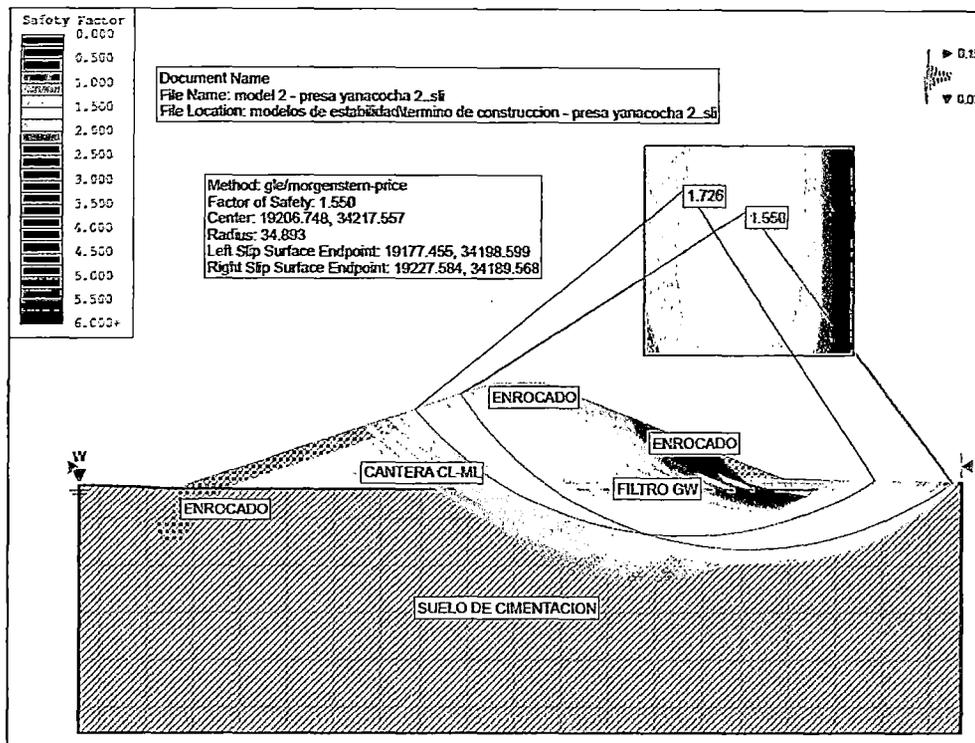


Figura N° 3.19 Término de construcción con sismo, talud aguas abajo.

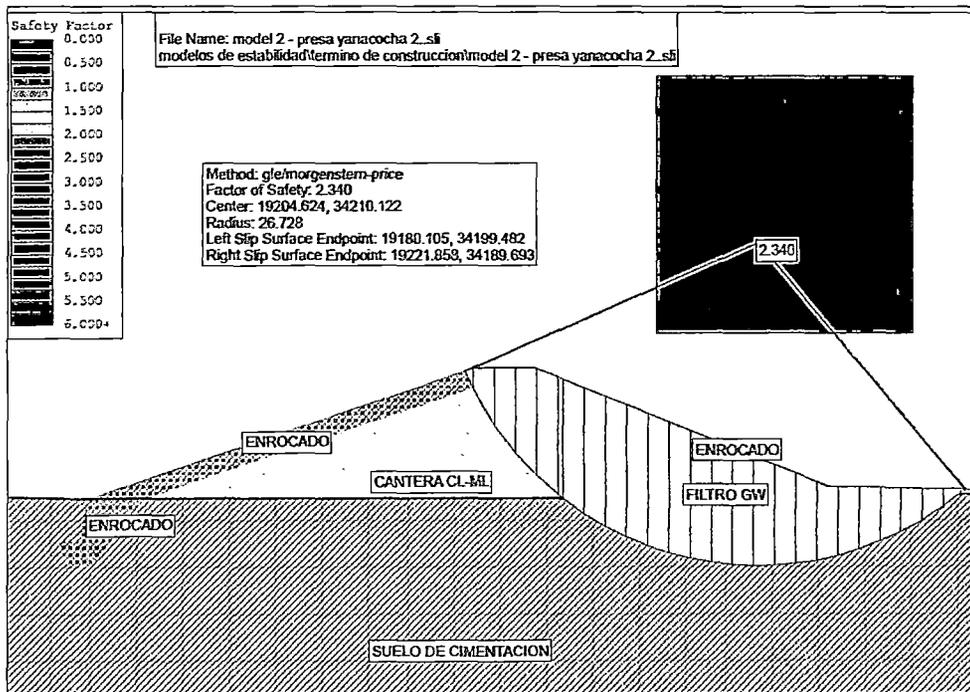


Figura N° 3.20 Término de construcción sin sismo, talud aguas abajo.

3.3 EVALUACIÓN DE LA FILTRACIÓN EN EL SUELO CIMENTACIÓN DE LA PRESA YANACocha CON EL PROGRAMA GEO SLOPE 2007.

El siguiente corresponde a la evaluación de las filtraciones, a través de la cimentación y del cuerpo de la presa Yanacocha, considerando una presa permeable de tierra homogénea, para el cual el cálculo se hace en base a las permeabilidades determinadas en los suelos de la cimentación en el eje de presa y valores de permeabilidad determinados en el laboratorio para el relleno impermeable del cuerpo de la presa. Para el caso de las rocas al no tenerse perforaciones diamantinas y valores directos de la permeabilidad, en base a los mapeos geológicos de superficie y a la geofísica se han determinado el estado de la roca y asumido según la experiencia, un valor de permeabilidad, el cual deberá ser comprobado en obra.

Pruebas de Permeabilidad.

Las permeabilidades del cimiento de la presa han sido obtenidas con pruebas realizadas in situ, para su determinación se realizaron 04 perforaciones diamantinas; y para la determinación de la permeabilidad del cuerpo conformante de la presa se han realizado 02 ensayos en laboratorio; estos resultados serán anexados.

Las condiciones de permeabilidad en suelos de cimentación involucrados con la estanqueidad de la presa, han sido evaluadas y ensayadas mediante la Prueba de Lefranc.

En base a estas pruebas, se ha determinado un valor medio para el cálculo de filtraciones, considerado para la cimentación.

En el Cuadro N° 3.10 y el Cuadro N° 3.11 se detallan las permeabilidades obtenidas In Situ y determinados en Laboratorio respectivamente.

Cuadro N° 3.10 Resultados de las Permeabilidades – Prueba de LEFRANC.

PERFOR.	PROF. (m)	PERMEABILIDAD (cm/seg)	OBSERVACIONES	TIPO DE MATERIAL	
C u a d r o	P-01	5.00	8.40E-07	Arcilla de color amarillo	Permeabilidad Muy Baja
		10.00	6.11E-07	Arcilla de color gris	Permeabilidad Muy Baja
		15.00	5.17E-07	Arcilla de color amarillo	Permeabilidad Muy Baja
		20.00	4.80E-07	Arcilla de color amarillo	Permeabilidad Muy Baja
		25.00	4.63E-07	Arcilla de color amarillo	Permeabilidad Muy Baja
N o	P-02	6.00	3.94E-07	Arcilla de color amarillo	Permeabilidad Muy Baja
		8.50	1.06E-04	Arena arcillosa	Permeabilidad Media
		15.00	7.12E-07	Arcilla de color amarillo	Permeabilidad Muy Baja
		20.00	1.01E-05	Grava con arcilla	Permeabilidad Media
C	P-03	8.00	8.10E-07	Arcilla de color amarillo	Permeabilidad Muy Baja
u a d	P-04	4.00	1.07E-05	Arcilla con grava	Permeabilidad Media
		8.00	8.12E-07	Arcilla de color amarillo	Permeabilidad Muy Baja

Cuadro N° 3.11 Resultados de las Permeabilidades Determinadas en Laboratorio.

PERFOR.	PROF. (m)	PERMEABILIDAD (cm/seg)	OBSERVACIONES	TIPO DE MATERIAL
P- 01	5.00	2.600E-08	CL (Arcilla delgada)	Permeabilidad Muy Baja
P- 02	5.00	5.21E-07	CL-ML (Arcilla limoarcillosa)	Permeabilidad Muy Baja

Filtraciones.

Las filtraciones en la presa se dan a través de su cuerpo y su fundación.

En la figura N° 3.21 se muestra la sección típica de la presa para un análisis sin impermeabilización, por lo que se trazó la línea superior de flujo con el método de Kozeny, y evaluaremos la filtración en el cuerpo de presa con método de Kozeny.

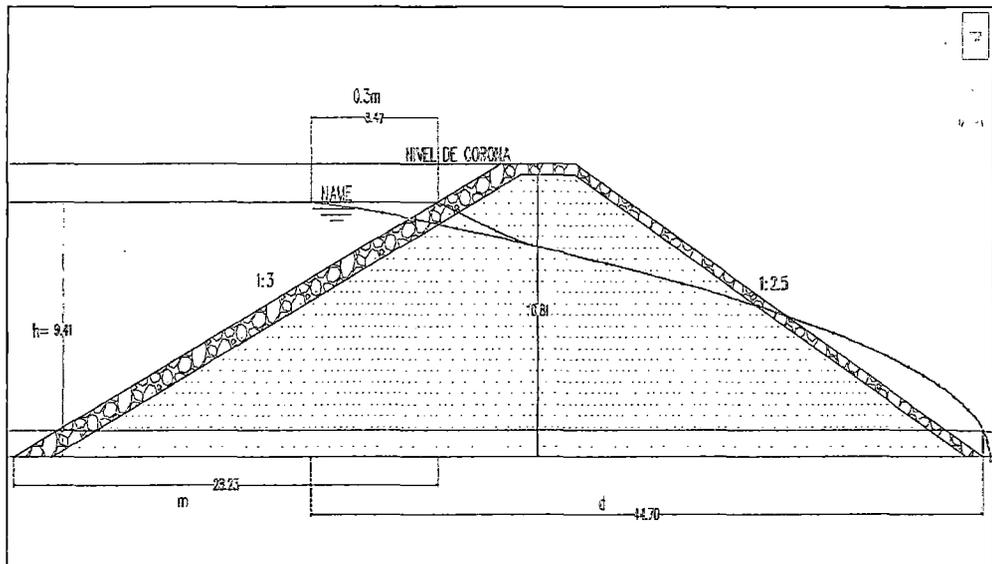


Figura N° 3.21 Filtración en cuerpo de presa con línea de flujo superior trazado con el método de Kozeny.

Filtración a través del cuerpo de la presa.

Con la parábola de Kozeny: $q = Ky_0 = 2Ka_0 = K\sqrt{d^2 + h^2} - d$

$$m = (3 \times 9.41) = 28.23; \quad 0.3m = 8.47m$$

$$d = 44.70.$$

$$q = K(\sqrt{44.70^2 + 9.41^2} - 44.70)$$

$$q = 0.98 * K$$

El valor de la permeabilidad es de $5.21 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ (Valor promedio del cuadro N° 3.11).

El área de filtración = $29.75m \times 145.00m$

$$q_{\max} \approx 0.022 \text{ lt/s}$$

Para el cuerpo de la presa, los resultados para un primer caso, de una presa de tierra sin pantalla impermeabilizadora, con las dimensiones consideradas, nos da una filtración para un año de servicio es 693.79 m³.

Filtración a través de la fundación.

Para calcular la filtración que pasa a través del suelo de fundación aplicamos la ley de darcy, en el diseño considerado de la Figura N°3.22.

Los valores de la permeabilidad fueron tomadas en campo, y su cálculo detallado esta en capítulo II en el estudio geotécnico.

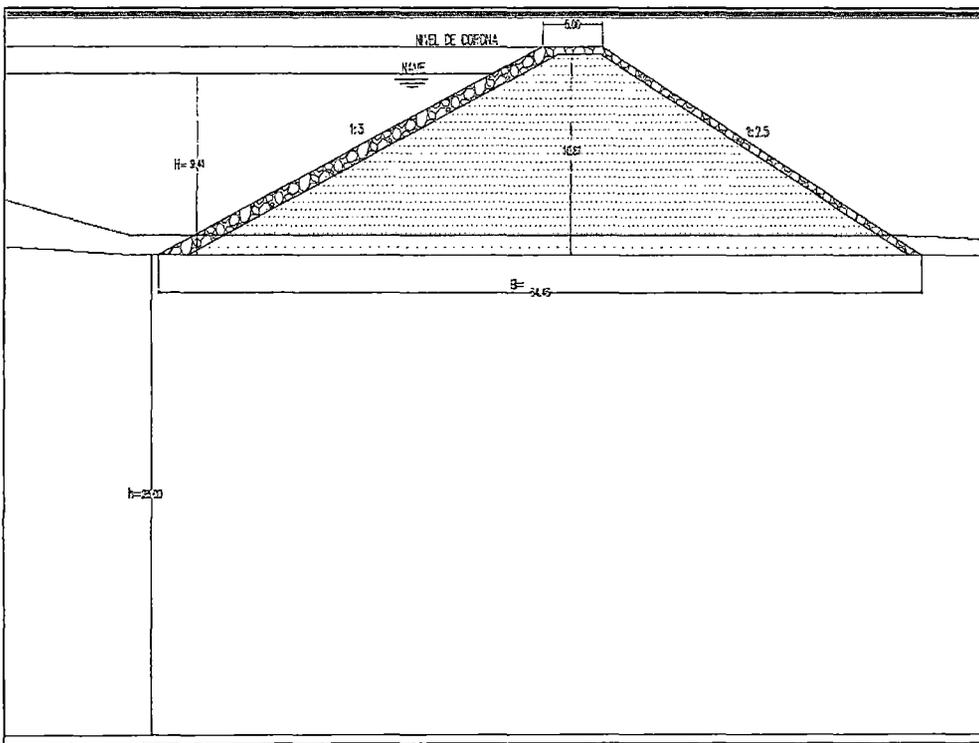


Figura N° 3.22 Filtración en la cimentación de la presa sin impermeabilización de talud ni pantalla.

Aplicando la ley de Darcy

Sin Pantalla.

Cuando $B > 2h$;

$$q = \frac{KH}{0.88 + \frac{B}{h}}$$

h (profundidad a la roca) =25m

B= 64.46m

K: permeabilidad de la fundación = 5.82E-9 m/s (promedio del cuadro N° 3.10).

q: descarga por metro lineal.

$$q = \frac{5.82 * 10^{-9} * 9.41}{0.88 + \frac{64.46}{25}}$$

q= 1.58E-8m/s.

El área de filtración = 25m x 145.00m

Para la cimentación de la presa, los resultados para un primer caso, de una presa de tierra sin pantalla impermeabilizadora, con las dimensiones consideradas, nos da una filtración para un año de servicio es 1806.22 m3.

Por lo tanto en la presa la filtración total para un año de servicio sería, la filtración del cuerpo de presa sumado a la filtración en la cimentación, siendo entonces 2500.01 m3, equivalente a 0.0025 MMC, por lo tanto la filtración par un año de servicio de la presa en función del volumen útil (2.76 MMC ver capítulo II), en porcentaje es de 0.09 %, este porcentaje de filtración es bastante pequeño que no afecta la serviciabilidad de la presa. Sin embargo la estabilidad de la presa como se puede apreciar en la simulación N° 1, sin impermeabilización de la presa esta al saturarse hace muy inestable la presa y para el caso que se presentara un sismo la talud llegaría a deslizarse.

Por lo tanto consideramos un segundo caso en la cual tomaremos en cuenta impermeabilizar el talud aguas arriba y colocar una pantalla de impermeabilización al pie de presa aguas arriba, con estas condiciones de diseño se realiza una segunda simulación y para todas las condiciones de funcionamiento se cumple la estabilidad y los factores de seguridad según el cuadro N° 3.5.

A continuación realizaremos el cálculo de la filtración para el segundo caso del talud aguas arriba impermeabilizadas, además de poner una pantalla

impermeable de 5.5m de profundidad al pie del talud aguas arriba (Figura N° 3.23).

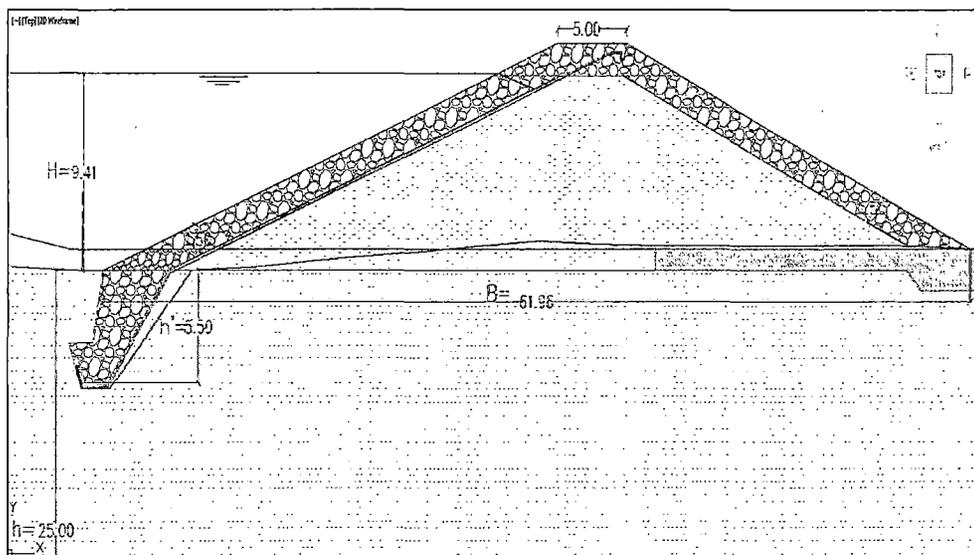


Figura N° 3.23 Filtración en la cimentación de la presa con impermeabilización y pantalla talud aguas arriba.

Con la pantalla.

$$q = k_{horizontal} * \frac{H(h - h')}{B + 2h'}$$

Si: $h' = 5.50\text{m}$

$$q = k_h * \frac{9.41(25 - 5.5)}{61.96 + 2 * 5.5}$$

$$q = 2.52 k_{horiz}$$

Tomaremos la permeabilidad promedio de la Perforación P-01 (ver Cuadro N° 3.10).

Con $k = 5.82 \times 10^{-9} \text{ m/s}$

Área de filtración = $19.5\text{m} \times 145\text{m}$

$$q_{max} \approx 0.0164 \text{ lt/s}$$

Volumen Total de Filtraciones.

Para la cimentación de la presa, los resultados de una presa de tierra con pantalla impermeabilizadora de 5.50 m al pie del talud aguas arriba también impermeabilizado, con las dimensiones consideradas, nos da una filtración para un año de servicio es 518.96 m³.

Verificación del camino de percolación.

Para la verificación de la percolación se han considerado dos condiciones:
 Sin dentellón ni pantalla y con pantalla al pie del talud aguas arriba.

- Sin dentellón ni pantalla.

En la figura N° 3.24 se muestra el diseño utilizado para el cual se calcula la percolación según el método de Lane.

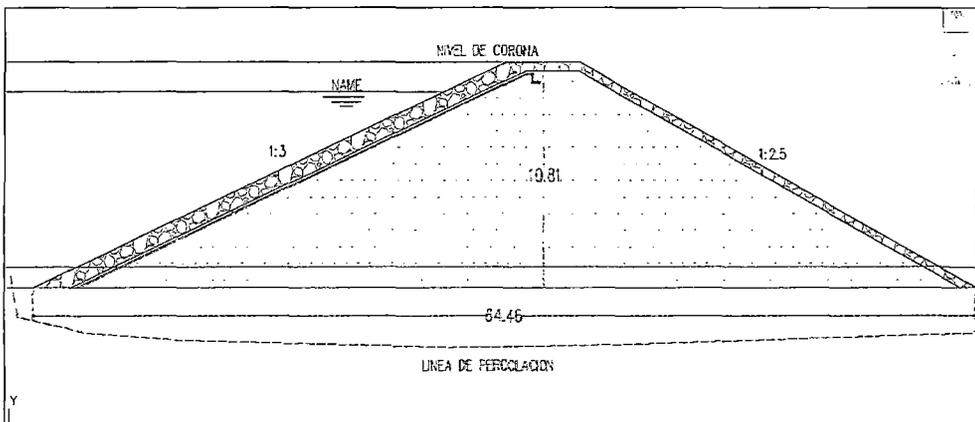


Figura N° 3.24 Verificación del camino de percolación sin pantalla impermeable.

$$CH = (1/3) * L, \text{ de donde:}$$

C: Coeficiente.

H: Altura total de la presa.

L: Longitud Total del recorrido de la percolación.

$$(1/3) * 64.46 = 21.48; H = 10.81$$

$C = 21.48 / 10.81 = 1.99 < 3.00$ lane (Según Cuadro N° 1.5, para suelos arcillosos, capítulo I).

Por lo tanto requiere de pantalla o dentellón, y como el proyecto contempla la impermeabilización en el talud aguas arriba resulta mejor prolongar ese revestimiento al pie de ese talud (Figura N° 3.25).

- Con pantalla al pie del talud aguas arriba.

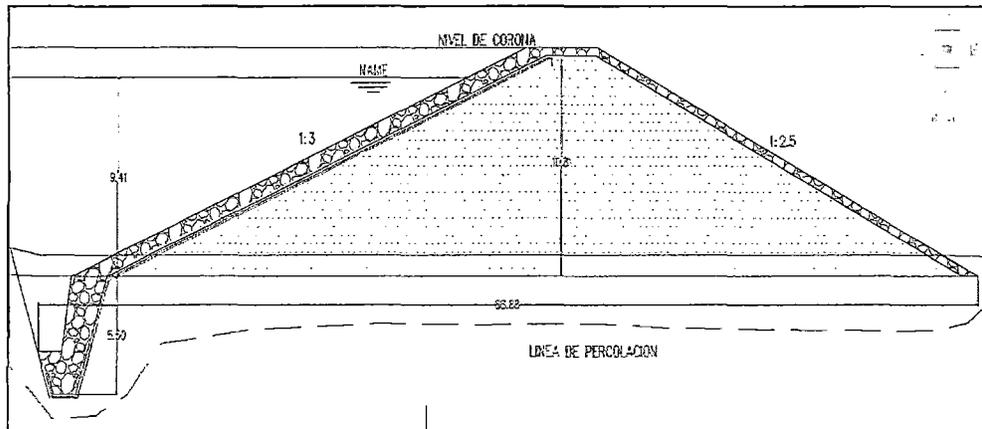


Figura N° 3.25 Verificación del camino de percolación con pantalla impermeable.

De 5.50 m de profundidad (h)

$$\Sigma h + \frac{1}{3}L = CH$$

$$2 \times 5.5 + (1/3) \times (66.88) = C \times 10.81$$

$C = 32.29/10.81 = 3.08 > 3.0$ lane (Para suelos arcillosos, Cuadro N° 1.5, capítulo I).

Evaluación de filtraciones en la cimentación y el cuerpo de la presa.

Para la evaluación de las filtraciones se usó el Software Geoestudio en su módulo Seep/W 2007. El programa permite realizar los cálculos de redes de flujo a través de dos tipos fundamentales de análisis:

- Régimen estacionario, el tiempo no interviene como variable en el proceso.
- Régimen transitorio, se tiene en cuenta la evolución del sistema con el tiempo.

La introducción de los condicionantes geométricos es muy versátil y se adaptan prácticamente a cualquier geometría:

- Geometría adaptable a cualquier contorno estratigráfico mediante herramientas gráficas a través de la definición de regiones.

Con objeto de modelar el comportamiento de los suelos el programa dispone de varios modelos de comportamiento.

- Permeabilidad del terreno.
- Relación entre permeabilidades K_y/K_x
- Variación direccional de la permeabilidad de la componente k_x .
- Modelo de estado saturados o insaturado/saturado
- Definición de función de conductividad en suelos insaturados.

Para el estudio del comportamiento del modelo además de la parametrización del terreno es necesario definir las propiedades de los contornos del modelo, para ello disponemos de las siguientes opciones:

- Head (Altura piezométrica = Altura de cota + altura de presión).
- Total Flux (Caudal Filtrado).
- Press Head (Altura de presión).
- Unit Flux (Flujo unitario).
- Unit Gradient (Gradiente unitario).

Simulación de las filtraciones en la presa.

a) Diseño considerado.

Para efectuar la simulación del cálculo de filtraciones, se ha simulado, tomando en consideración una presa de tierra, con las siguientes condiciones:

Altura de presa: 10.81 m.

Altura del agua: 9.41 m.

Talud de presa: Aguas arriba = 3.0/1.0

Aguas abajo = 2.5/1.0

Ancho de corona: 5.0 m.

Pantalla impermeabilizadora de 5.0 m al pie del talud aguas arriba.

El cuadro N° 3.12 se obtuvo las permeabilidades del suelo de cimentación y del cuerpo de presa de los resultados de los ensayos de campo y ensayos de laboratorio, (ver cuadro 3.10 y 3.11).

Cuadro N° 3.12 Permeabilidad usadas en modelamiento (Elaboración propia).

Material	Tipo de material	Permeabilidad (m/s)
Material 01	Cuerpo de dique	5.21 E-09
Material 02	Suelo natural	5.82 E-09
Material 03	Enrocado y grava.	1.00 E-01
Material 04	Geomembrana	1.00 E -20

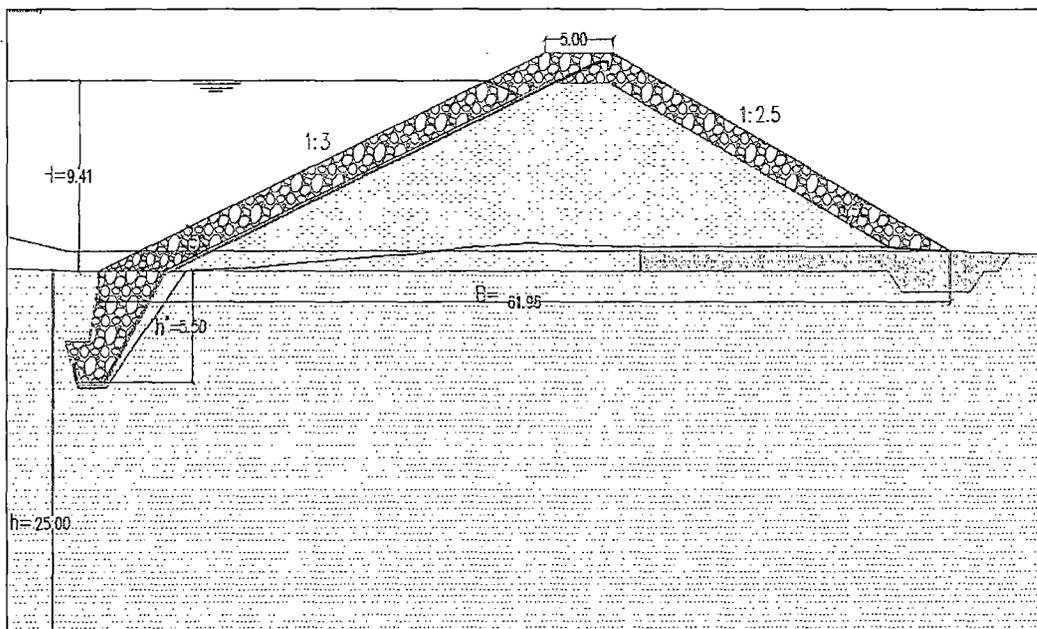


Figura N° 3.26 Modelo utilizado para el análisis de filtración en el programa SEEP/W.

Para efectuar la simulación del cálculo de filtraciones se ha considerado una presa de tierra con la geometría que se muestra en la figura N°3.26, con las siguientes características.

Altura de presa : 10.81 m.

Altura de agua : 9.41 m.

Talud de presa : Aguas arriba 1:3

Aguas abajo 1:2.5

Ancho de corona: 5.00 m.

Resultados

En la Figura N° 3.27 se muestra las líneas de flujo y las líneas equipotenciales de la presa Yanacocha, que son los resultados del análisis de filtración realizado el programa Sepp/w, en la Figura 3.28 y la Figura N° 3.29 se muestra la velocidad de flujo para un punto en la cimentación de la presa, también en la Figura N° 3.30 se observa el caudal de filtración para la sección mostrada en la Figura N° 3.27 que representa el caudal de filtración en el cuerpo de presa como en la cimentación.

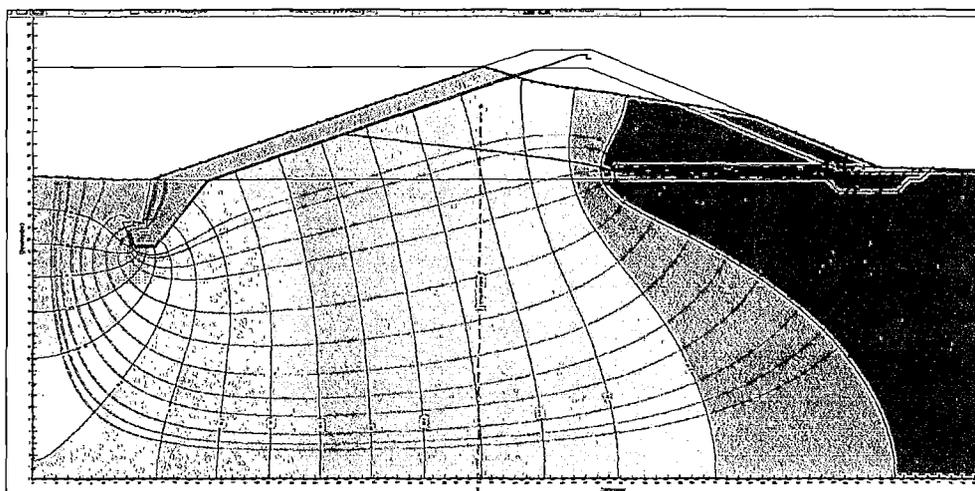


Figura N° 3.27 Líneas equipotenciales y líneas de flujo para la presa Yanacocha.

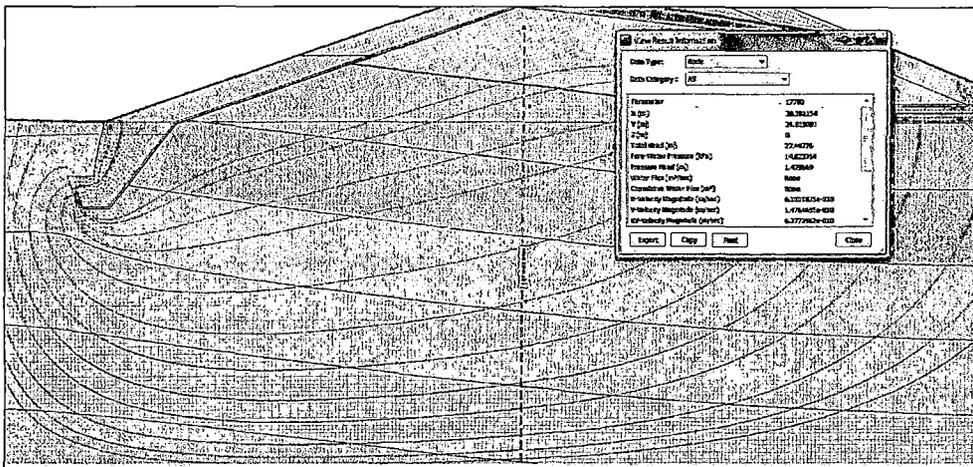


Figura N° 3.28 Velocidad de filtración del análisis considerado en el programa SEEP/W.

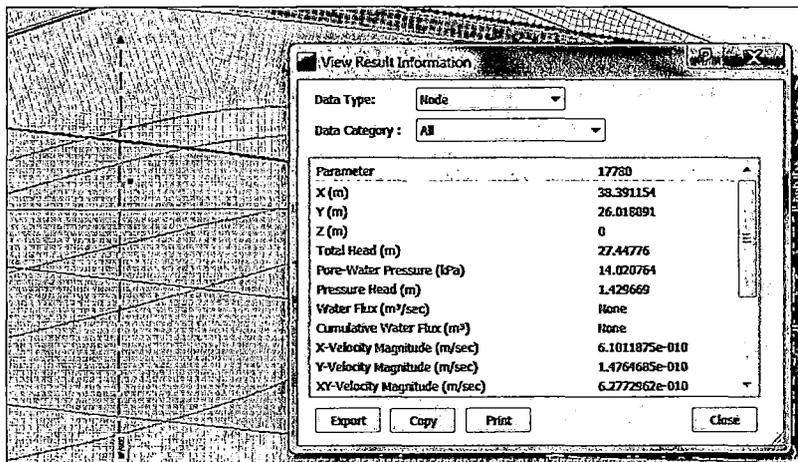


Figura N° 3.29 Velocidad de filtración para la presa Yanacocha.

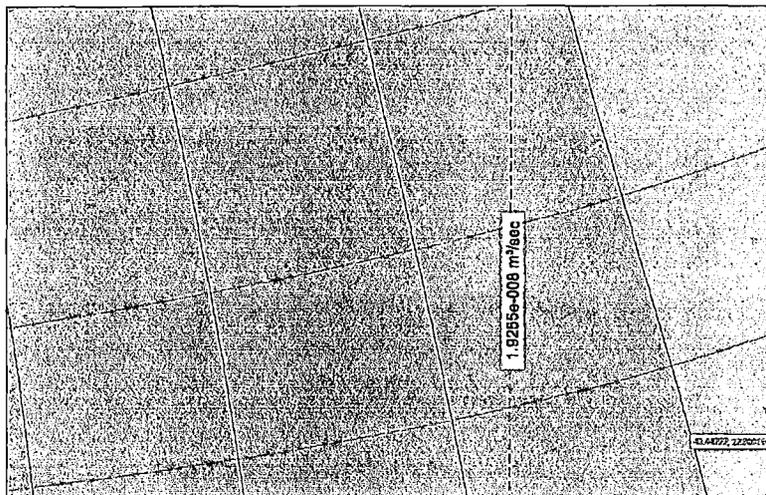


Figura N° 3.30 Caudal de filtración para la presa Yanacocha.

De la filtración resultante analizado con el programa seep/w, que se muestra en la figura N° 3.30, calculamos el caudal en toda la presa y también obtenemos la filtración para un año de servicio de la presa.

- La filtración resultante es: $1.925E-08$ m³/seg./m.
- Largo de la zona influenciada del eje de presa a filtrar: 145 m.
- Cálculo de filtración en el eje de presa m³/ seg = $145 \times 1.925 E-08$
: $2.791E-06$.
- Cálculo de filtración en 01 año = $31\,536,000$ seg x $2.791E-06$: 88.024 m³.
- % de filtración: $(88.024 \times 100) / 2760000.00$: 0.0031% .

De los resultados anteriores tanto en el análisis por el método teórico de la ley de darcy, cuyo resultado para un año de servicio de la presa nos da una filtración de 518.96 m³ y como el resultado del análisis mediante el programa seep/w cuya filtración para el año de servicio es de 88.024 m³, en ambos casos la filtración es bastante pequeña sin comprometer la serviciabilidad del proyecto, además con el modelo propuesto y comprobándose la tubificación según el método de Lane, para suelos arcillosos cumple la condición necesaria, desarrollamos el modelo final que la representamos en una sección típica de la presa que cumple con las condiciones de estabilidad y filtración para la presa, que se muestra en la figura N° 3.31.

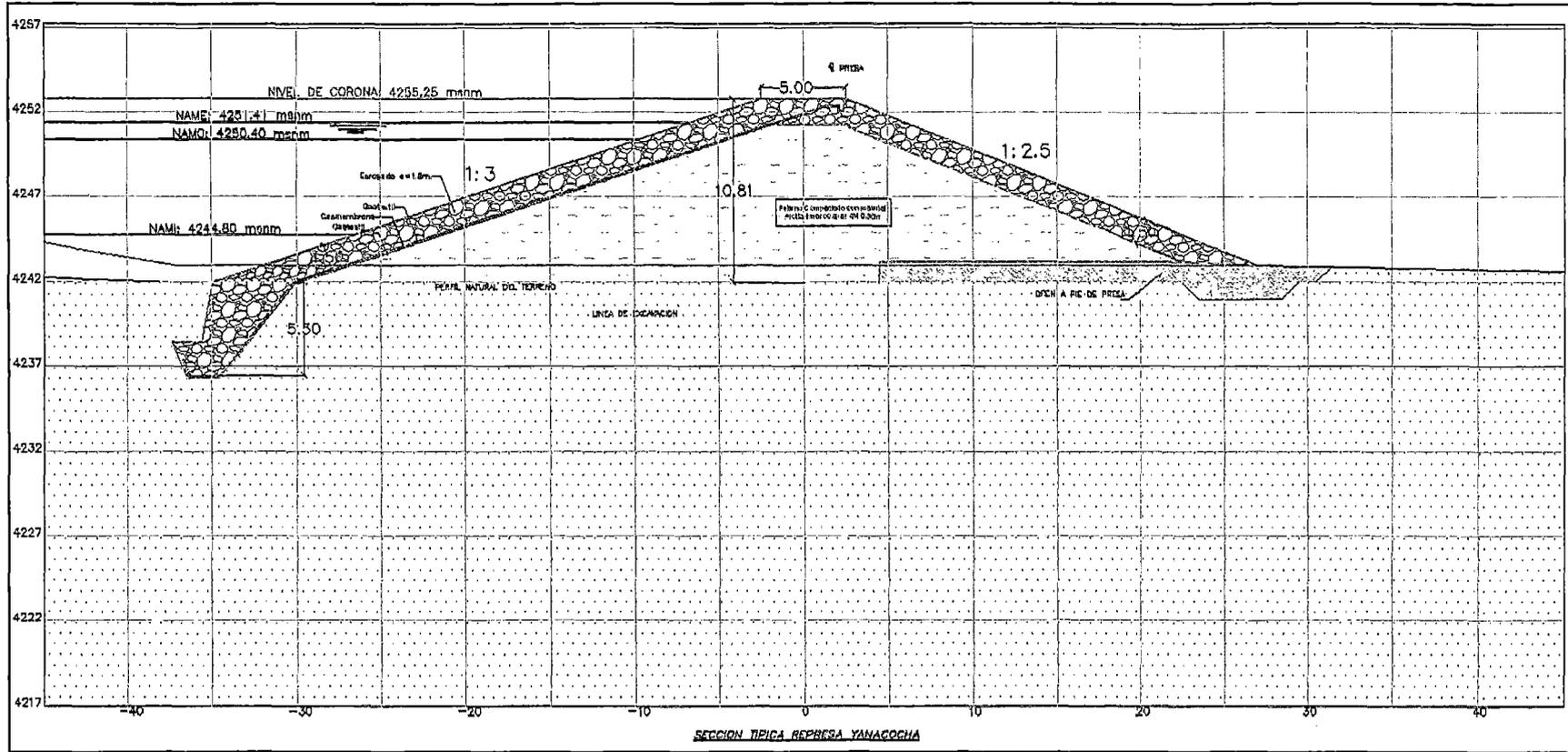


Figura N° 3.31 Sección típica que se define para la presa Yanacocha.

CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

4.1 CONCLUSIONES.

- La microcuenca Yanacocha, lugar donde se realizara la reconstrucción de la presa Yanacocha, cuenta con un área de drenaje de 14.04 Km² y una altitud media de 4356 msnm.

- La oferta hídrica promedio anual, de la microcuenca se ha estimado en 0.315 m³/s que en términos de volumen equivale a 9.944 MMC anuales.

- La demanda agrícola del área de influencia de la presa, se ha determinado tomando en consideración la cedula de cultivo, los datos climatológicos de la estación Cerro de Pasco y la eficiencia de riego. La demanda agrícola del proyecto calculada es del orden 3.020 MMC para la cédula de cultivos propuesta.

- La demanda Poblacional del proyecto calculada es de 0.63 MMC para consumo humano en la localidad Villa de Pasco.

- Existe un déficit de agua en la microcuenca Yanacocha para los meses de estiaje, (Mayo – Setiembre), para lo cual el volumen deficitario debe ser compensado con el volumen útil de la presa Yanacocha.

- La simulación de la operación del embalse indica que con 2.76 MMC de volumen útil, la presa funcionara normalmente sin déficit de agua durante todo el año, por lo que volumen de almacenamiento total de la presa es de 5.27MMC; de las cuales 2.97 MMC corresponden al volumen útil de la simulación de operación de la presa, más las perdidas por evaporación y filtración y 2.30 MMC que corresponden al volumen muerto.

- El área de estudio se encuentra dentro de la zona de influencia de las rocas sedimentarias del grupo Pucará, específicamente del último miembro que es la formación Condorsinga, conformada por calizas micríticas de color gris a beige, generalmente dispuesta en estratos delgados entre 10 a 30 cm. Además de por depósitos Fluvioglaciares que son acumulaciones

de gravas semi-redondeadas que tienen mayoritariamente de 2 a 6 cm de diámetro, que aparecen embaladas en gruesas matrices arenosas y limo arcillosas de depósitos semiconsolidados, que incluyen frecuentes bloques rocosos de varios centímetros a algunos decímetros de grosor.

- De acuerdo a las evaluaciones geológicas realizadas y en base a los resultados de los ensayos de perforación diamantina, se ha encontrado en la parte central del eje de la presa, materiales arcillosos con una permeabilidad muy baja, las cuales sirven como sellado de la fallas y fisuras, además impiden la filtración del agua hacia estratos inferiores provocando una situación de estanque impermeable.

- De acuerdo a las características topográficas del eje de presa, se ha considerado una longitud de filtración de 145 m y una longitud de corona de 163.62 m.

- Según el estudio sísmico para la zona del proyecto, se considera como el valor del coeficiente sísmico en la horizontal de 0.15g, y para la vertical 0.2 del coeficiente sísmico horizontal, que para este diseño sería 0.03g.

- Se realizó un pre-diseño de la presa Yanacocha, a la cual se le realizó el análisis de estabilidad de taludes y cálculo de filtración, las características del pre-diseño se determinó del estudio hidrológico, con la que se calculó los niveles de operación y la altura de la presa, del estudio de geotécnica y perforaciones diamantinas realizadas para el suelo de fundación, así como del análisis las canteras encontradas cercanas a la presa, se estimó la pendiente de las taludes de la presa, el ancho de corona, protección de taludes y diseño de filtro.

- Al pre-diseño realizado se le calculo la filtración tanto en el cuerpo de presa como en la cimentación aplicando la ley de darcy, el resultado total de filtración es de 2500.01 m³, equivalente a 0.0025 MMC para un año de servicio, lo que representa un volumen mínimo de filtración, con la cual la presa puede operar sin ningún problema, sin embargo al realizar el análisis de estabilidad para los taludes para la presa es el programa Slide, no cumple con los factores mínimos de seguridad para presas de tierra,

cuando se analiza para el caso de presa llena y un evento sísmico a la vez, tanto en la talud aguas arriba como en la talud aguas abajo, esto debido a que el cuerpo de presa conformada por material limo arcilloso al saturarse y frente a un sismo se hace inestable, debido a esto se procedió a modificar el pre-diseño, colocándose un material impermeable como la geomembrana talud aguas arriba, con esto lo que se logra es que el cuerpo de presa ya no llegue a saturarse completamente además de poner un filtro que evitara el lavado de fino en la presa, con este nuevo diseño se volvió a analizar su estabilidad y cumplió los factores mínimos para todas las condiciones de operación de la presa.

- Se verificó también el camino de percolación con el método gráfico de Lane, el cual señala que el recorrido mínimo que debe realizar el camino de percolación debe ser en función de la altura de la presa debe ser mayor que el coeficiente de Lane para el tipo de suelo de cimentación, para este caso al tratarse de un suelo arcilloso este coeficiente de Lane es 3.00, por lo que se tuvo que colocar una pantalla impermeable de 5.5m de profundidad al pie del talud aguas arriba, prolongándose la impermeabilización en este talud, con este nuevo recorrido del camino de percolación se logró la condición propuesta por la teoría de Lane.

La sección de presa rediseñada, donde se impermeabilizó el talud aguas arriba y se colocó la pantalla impermeable de 5.5 m de profundidad al pie del talud aguas arriba, se volvió a calcular la filtración de manera teórica con la ley de Darcy cuyo resultado 518.96 m³ para un año de servicio, y también empleamos el programa de cómputo SEEP/W para calcular la filtración y cuyo resultado para el año de servicio es de 88.024 m³, en ambos casos la filtración es muy pequeña y no afecta la serviciabilidad de presa, siendo un porcentaje muy pequeño respecto al volumen útil 0.0031%.

- La represa Yanacocha, de altura máxima 10.81 m, ancho de corona de 5.00 m, y una longitud de corona de 163.62 m, puede contener un embalse útil de 2, 965,298.66 m³, lo que cubre las necesidades de riego del proyecto. En las cercanías se obtienen las canteras necesarias para su construcción.

Las áreas de cultivo beneficiadas se hallan en las inmediaciones del Centro Poblado Villa de Pasco, para el riego de 450 hectáreas y localizados en la jurisdicción del distrito de Pasco, provincia Pasco, departamento y Región de Cerro de Pasco.

4.2 RECOMENDACIONES.

- Esta tesis es un aplicación práctica de la ingeniería de pequeñas presas para la reconstrucción de la presa Yanacocha, donde concluimos en un diseño de la presa de tierra, cuya sección típica cumple con las condiciones de estabilidad tanto talud aguas arriba como el talud aguas abajo para todas las condiciones de operación de la presa, así también nos aseguramos que la filtración de la presa no afecta su funcionamiento y su estabilidad, sin embargo este estudio deberá complementarse con estudios hidráulicos que permitan completar la estructura de la presa con diseños hidráulicos del aliviadero de demasías, sistema de descarga de servicio hacia el canal de riego, habilitación del canal existente, etc.

- Para la el análisis de estabilidad de la presa Yanacocha los parámetros geotécnicos de resistencia como el ángulo de fricción y la cohesión de los materiales fueron obtenidos del ensayo corte directo, estos parámetros se consideró para todas la etapas de operación de la presa ya que no se contó con suficientes datos de laboratorio como ensayos triaxiales de condición no consolidado no drenado(UU), consolidado no drenado(CU) y consolidado drenado(CD), lo que hubieran permitido un mejor análisis de la estabilidad para todas la etapas de operación de la presa, por lo que se recomienda para posteriores diseños de presas de tierras realizar estos ensayos de laboratorio para todos los materiales conformantes de la presa a fin de tener un análisis de estabilidad más precisos.

BIBLIOGRAFÍA

- Braja M. Das, Fundamentos de ingeniería geotécnica, segunda edición, Thomson Editores, México 2010.
- Flores Berrones Raúl, Flujo de agua a través de los suelos, 4ª. Edición, México 2000.
- Mallet CH, Pacquant J, Les Barrages En Terre, Editions Eyrolles 61, Boulevard Saint – Germain, Paris 1951.
- Newmark N.W, "Effects of Earthquakes on Dams and Embankments", Geotechnique, London, 1956.
- Novak P, Moffat A.I.B, Nalluri C, Estructuras hidráulicas, Segunda Edición, Mc Graw Hill, Bogota 2001.
- Post G, Londe P, Les Barrages En Terre Compactee Practiques Americaines, Gauthier, Villars, Editeur, Paris, 1953.
- Published by the Victorian Government Department of Sustainability and Environment, Your Dam Your responsibility, Melbourne, March 2007.
- Sherard James L, Woodward Richard J, Gizienski S. F, Clevenger William A, Earth and Earth Rock Dams, Engineering Problems of Desing and Construction, John Wiley and Sons ,Inc. New York, 1963.
- Sherard James L, Influence of Soil Properties and Methods on performance of homogenous Earth Dams, U. S Bureau of reclamation teach. Denver Colorado 1953.
- U.S. Department of the Interior Bureau of Reclamation, Earth Manual, part 1, 1998.
- U.S. Department of the interior Bureau of Reclamation, Desingn of Small

Dams, A. Walter Resources Technical Publication, Second Edition, Washington, 1974.

- Vallarino Eugenio, Tratado Básico de presas, Tomo I y Tomo II, 5ta. Edición, Colegio de ingenieros de caminos, canales y puertos, Madrid 2001.

ANEXOS

**ANEXO A -
RESULTADOS DEL
PROGRAMA SLIDE Y
SEPP/W.**

A.1 Datos y resultados del análisis de filtración en el programa Sepp/W.

SEEP/W Analysis

Report generated using GeoStudio 2007, version 7.10. Copyright © 1991-2008
GEO-SLOPE International Ltd.

File Information

Revision Number: 10
File Name: MODEL 1 - FILTRACION PRESA YANACOCKA.gsz

Project Settings

Length (L) Units: meters
Time (t) Units: Seconds
Force (F) Units: kN
Pressure (p) Units: kPa
Mass (M) Units: g
Mass Flux Units: g/sec
Unit Weight of Water: 9.807 kN/m³
View: 2D

Analysis Settings

SEEP/W Analysis

Description: VERIFICACION DE FILTRACION DE LA PRESA
YANACOCKA.

Kind: SEEP/W

Method: Steady-State

Settings

Include Air Flow: No

Control

Apply Runoff: Yes

Convergence

Maximum Number of Iterations: 100

Tolerance: 0.01

Maximum Change in K: 1

Rate of Change in K: 1.1

Minimum Change in K: 0.0001

Equation Solver: Direct

Potential Seepage Max # of Reviews: 10

Time

Starting Time: 0 sec

Duration: 0 sec

Ending Time: 0 sec

Materials

CUERPO DE PRESA

Model: Saturated Only

Hydraulic

K-Sat: 5.21e-009 m/sec

Volumetric Water Content: 0 m³/m³

Mv: 0 /kPa
K-Ratio: 1
K-Direction: 0 °

SUELO DE CIMENTACION

Model: Saturated Only
Hydraulic
K-Sat: 5.82e-009 m/sec
Volumetric Water Content: 0 m³/m³
Mv: 0 /kPa
K-Ratio: 1
K-Direction: 0 °

ENROCADO

Model: Saturated Only
Hydraulic
K-Sat: 0.1 m/sec
Volumetric Water Content: 0 m³/m³
Mv: 0 /kPa
K-Ratio: 1
K-Direction: 0 °

GEOMENBRANA

Model: Saturated Only
Hydraulic
K-Sat: 1e-020 m/sec
Volumetric Water Content: 0 m³/m³
Mv: 0 /kPa
K-Ratio: 1
K-Direction: 0 °

FILTRO DE GRAVA

Model: Saturated Only
Hydraulic
K-Sat: 0.1 m/sec
Volumetric Water Content: 0 m³/m³
Mv: 0 /kPa
K-Ratio: 1
K-Direction: 0 °

Boundary Conditions

PRESION ATMOSFERICA

Type: Head (H) 25.61

AGUAS ARRIBA

Type: Head (H) 34.41

IMPERMEABLE

Type: Total Flux (Q) 0

Flux Sections

Flux Section 1

Coordinates

Coordinate: (37.78, -1.63) m

Coordinate: (37.96, 31.29) m

Regions

	Material	Points	Area (m ²)
Region 1	SUELO DE CIMENTACION	2,3,4,13,14,15,55,1	214.0855
Region 2	SUELO DE CIMENTACION	11,30,56,12	350.5255 5
Region 3	SUELO DE CIMENTACION	30,29,28,27,26,25,23,57,56	668.6865
Region 4	SUELO DE CIMENTACION	23,58,59,57	855
Region 5	CUERPO DE PRESA	17,60,45,43,41,61,16	0.90855
Region 6	GEOMENBRANA	60,58,46,44,42,62,61,41,43, 45	0.447
Region 7	SUELO DE CIMENTACION	58,46,44,42,62,15,55,59	146.9869 5
Region 8	GEOMENBRANA	61,39,40,62	0.0497
Region 9	ENROCADO	14,13,4,17,16,61,39,40,62,1 5	19.1578
Region 10	FILTRO DE GRAVA	22,23,25,26,27,28,29,30,10, 21	36.366
Region 11	ENROCADO	21,10,9,38,37,36	18.95415
Region 12	ENROCADO	4,17,18,31,5	42.9079
Region 13	CUERPO DE PRESA	17,60,63,18	2.7696
Region 14	GEOMENBRANA	58,60,63,64	1.3784
Region 15	CUERPO DE PRESA	64,32,33,34,35,36,21,22,23, 58	238.1280 5
Region 16		64,63,65,66	0.1146
Region 17		66,20,36,35,34,33,32,64	14.3561
Region 18		18,63,65,19	0.2062
Region 19		18,31,5,6,7,49,47,65,19	9.00605
Region 20		66,65,47,49,52,53,54,51,50, 48	0.23925
Region 21		9,38,37,36,20,66,48,50,51,5 4,53,52,49,7	19.49095

Lines

	Start Point	End Point	Hydraulic Boundary
Line 1	2	3	AGUAS ARRIBA
Line 2	3	4	AGUAS ARRIBA
Line 3	4	13	
Line 4	13	14	
Line 5	14	15	
Line 6	15	55	
Line 7	55	1	IMPERMEABLE
Line 8	1	2	IMPERMEABLE
Line 9	11	30	PRESION ATMOSFERICA
Line 10	30	56	
Line 11	56	12	IMPERMEABLE
Line 12	12	11	IMPERMEABLE
Line 13	30	29	
Line 14	29	28	
Line 15	28	27	
Line 16	27	26	
Line 17	26	25	
Line 18	25	23	
Line 19	23	57	
Line 20	57	56	IMPERMEABLE
Line 21	23	58	
Line 22	58	59	
Line 23	59	57	IMPERMEABLE
Line 24	17	60	
Line 25	60	45	
Line 26	45	43	
Line 27	43	41	
Line 28	41	61	
Line 29	61	16	
Line 30	16	17	
Line 31	60	58	
Line 32	58	46	
Line 33	46	44	
Line 34	44	42	
Line 35	42	62	
Line 36	62	61	
Line 37	62	15	

Line 38	55	59	IMPERMEABLE
Line 39	61	39	
Line 40	39	40	
Line 41	40	62	
Line 42	4	17	
Line 43	22	23	
Line 44	30	10	PRESION ATMOSFERICA
Line 45	10	21	
Line 46	21	22	
Line 47	10	9	PRESION ATMOSFERICA
Line 48	9	38	IMPERMEABLE
Line 49	38	37	IMPERMEABLE
Line 50	37	36	IMPERMEABLE
Line 51	36	21	
Line 52	17	18	
Line 53	18	31	IMPERMEABLE
Line 54	31	5	IMPERMEABLE
Line 55	5	4	AGUAS ARRIBA
Line 56	60	63	
Line 57	63	18	IMPERMEABLE
Line 58	63	64	IMPERMEABLE
Line 59	64	58	
Line 60	64	32	IMPERMEABLE
Line 61	32	33	IMPERMEABLE
Line 62	33	34	IMPERMEABLE
Line 63	34	35	IMPERMEABLE
Line 64	35	36	IMPERMEABLE
Line 65	63	65	
Line 66	65	66	
Line 67	66	64	
Line 68	66	20	
Line 69	20	36	
Line 70	65	19	
Line 71	19	18	
Line 72	5	6	
Line 73	6	7	
Line 74	7	49	
Line 75	49	47	
Line 76	47	65	

Line 77	49	52	
Line 78	52	53	
Line 79	53	54	
Line 80	54	51	
Line 81	51	50	
Line 82	50	48	
Line 83	48	66	
Line 84	7	9	

Points

	X (m)	Y (m)
Point 1	0	0
Point 2	0	25.3
Point 3	7.57	25
Point 4	10	25
Point 5	38.23	34.41
Point 6	42.43	35.81
Point 7	47.43	35.81
Point 8	0	34.41
Point 9	61.45	30.2
Point 10	71.96	26
Point 11	90	25.61
Point 12	90	0
Point 13	9.3	21.5
Point 14	7.58	21.5
Point 15	8.38	19.5
Point 16	10.33	19.5
Point 17	14.74	25
Point 18	40.79	33.68
Point 19	42.67	34.31
Point 20	47.14	34.31
Point 21	67.42	26.2
Point 22	49.42	26.2
Point 23	49.42	25
Point 24	46.03	25
Point 25	67.42	25
Point 26	68.42	24
Point 27	73.42	24
Point 28	74.42	25

Point 29	75.42	25
Point 30	76.39	25.9
Point 31	40.3	33.81
Point 32	42.37	33.2
Point 33	44.48	32.81
Point 34	46.15	32.6
Point 35	49.49	32.15
Point 36	54.49	31.41
Point 37	58.48	30.76
Point 38	60.8	30.33
Point 39	8.25	20.43
Point 40	8.2	20.41
Point 41	8.66	19.4
Point 42	8.63	19.35
Point 43	10.38	19.4
Point 44	10.4	19.35
Point 45	14.8	24.91
Point 46	14.83	24.87
Point 47	46.29	35.41
Point 48	46.3	35.36
Point 49	47.09	35.41
Point 50	47.04	35.36
Point 51	47.04	35.06
Point 52	47.09	35.11
Point 53	47.34	35.11
Point 54	47.34	35.06
Point 55	8.36	0
Point 56	76.39	0
Point 57	49.42	0
Point 58	15.22	25
Point 59	15.22	0
Point 60	15.07	25
Point 61	8.62	19.5
Point 62	8.57	19.5
Point 63	40.95	33.63
Point 64	41.03	33.6
Point 65	42.99	34.31
Point 66	43.15	34.31

A.2 Datos y resultados del análisis de estabilidad para el modelo 1 en el programa Slide 5.0.

Slide Analysis Information

Document Name

File Name: modelo 2 - presa Yanacocha.sli

Project Settings

Project Title: SLIDE - An Interactive Slope Stability Program

Failure Direction: Right to Left

Units of Measurement: SI Units

Pore Fluid Unit Weight: 9.81 kN/m³

Groundwater Method: Water Surfaces

Data Output: Standard

Calculate Excess Pore Pressure: Off

Allow Ru with Water Surfaces or Grids: Off

Random Numbers: Pseudo-random Seed

Random Number Seed: 10116

Random Number Generation Method: Park and Miller v.3

Analysis Methods

Analysis Methods used:

GLE/Morgenstern-Price with interslice force function: Half Sine

Janbu simplified

Spencer

Number of slices: 25

Tolerance: 0.005

Maximum number of iterations: 50

Surface Options

Surface Type: Circular

Search Method: Grid Search

Radius increment: 10

Composite Surfaces: Disabled

Reverse Curvature: Create Tension Crack

Minimum Elevation: Not Defined

Minimum Depth: Not Defined

Loading

Seismic Load Coefficient (Horizontal): 0.15

Seismic Load Coefficient (Vertical): 0.03

Material Properties

Material: SUELO DE CIMENTACION

Strength Type: Mohr-Coulomb

Unsaturated Unit Weight: 15.3 kN/m³

Saturated Unit Weight: 19.42 kN/m³

Cohesion: 10.79 kPa

Friction Angle: 28 degrees

Water Surface: Water Table

Custom Hu value: 1

Material: CANTERA CL-ML

Strength Type: Mohr-Coulomb

Unsaturated Unit Weight: 21.12 kN/m³

Saturated Unit Weight: 22.92 kN/m³

Cohesion: 24.52 kPa

Friction Angle: 30 degrees

Water Surface: Water Table

Custom Hu value: 1

Material: ENROCADO

Strength Type: Mohr-Coulomb

Unsaturated Unit Weight: 25 kN/m³

Saturated Unit Weight: 25 kN/m³

Cohesion: 40 kPa

Friction Angle: 40 degrees

Water Surface: Water Table

Custom Hu value: 1

Material: FILTRO GW

Strength Type: Mohr-Coulomb

Unsaturated Unit Weight: 21.68 kN/m³

Saturated Unit Weight: 23.45 kN/m³

Cohesion: 30 kPa

Friction Angle: 40 degrees

Water Surface: Water Table

Custom Hu value: 1

Global Minimums

Method: janbu simplified

FS: 0.993507

Center: 19171.223, 34202.409

Radius: 26.498

Left Slip Surface Endpoint: 19154.971, 34181.479

Right Slip Surface Endpoint: 19195.646, 34192.129

Resisting Horizontal Force=2141.28 kN

Driving Horizontal Force=2155.28 kN

Method: spencer

FS: 1.126950

Center: 19171.223, 34208.560

Radius: 31.317

Left Slip Surface Endpoint: 19155.532, 34181.457

Right Slip Surface Endpoint: 19197.883, 34192.129

Resisting Moment=76099.2 kN-m

Driving Moment=67526.6 kN-m

Resisting Horizontal Force=2181.45 kN

Driving Horizontal Force=1935.71 kN

Method: gle/morgenstern-price

FS: 1.125530

Center: 19171.223, 34208.560

Radius: 31.317

Left Slip Surface Endpoint: 19155.532, 34181.457

Right Slip Surface Endpoint: 19197.883, 34192.129

Resisting Moment=76003.1 kN-m

Driving Moment=67526.6 kN-m

Resisting Horizontal Force=2180.86 kN

Driving Horizontal Force=1937.63 kN

Valid / Invalid Surfaces

Method: janbu simplified

Number of Valid Surfaces: 3409

Number of Invalid Surfaces: 1442

Method: Spencer

Number of Valid Surfaces: 3389

Number of Invalid Surfaces: 1462

Method: gle/morgenstern-price

Number of Valid Surfaces: 3385

Number of Invalid Surfaces: 1466

A.3 Datos y resultados del análisis de estabilidad para el modelo 2 en el programa Slide 5.0.

Slide Analysis Information

Document Name

File Name: model 2 - Presa Yanacocha.sli

Project Settings

Project Title: SLIDE - An Interactive Slope Stability Program

Failure Direction: Left to Right

Units of Measurement: SI Units

Pore Fluid Unit Weight: 9.81 kN/m³

Groundwater Method: Water Surfaces

Data Output: Standard

Calculate Excess Pore Pressure: Off

Allow Ru with Water Surfaces or Grids: Off

Random Numbers: Pseudo-random Seed

Random Number Seed: 10116

Random Number Generation Method: Park and Miller v.3

Analysis Methods

Analysis Methods used:

GLE/Morgenstern-Price with interslice force function: Half Sine

Janbu simplified

Spencer

Number of slices: 25

Tolerance: 0.005

Maximum number of iterations: 50

Surface Options

Surface Type: Circular

Search Method: Grid Search

Radius increment: 10

Composite Surfaces: Disabled

Reverse Curvature: Create Tension Crack

Minimum Elevation: Not Defined

Minimum Depth: Not Defined

Loading

Seismic Load Coefficient (Horizontal): 0.15

Seismic Load Coefficient (Vertical): 0.03

Material Properties

Material: SUELO DE CIMENTACION

Strength Type: Mohr-Coulomb

Unsaturated Unit Weight: 15.3 kN/m³

Saturated Unit Weight: 19.42 kN/m³

Cohesion: 10.79 kPa

Friction Angle: 28 degrees

Water Surface: Water Table

Custom Hu value: 1

Material: MAT. CANTERA CL-ML

Strength Type: Mohr-Coulomb

Unsaturated Unit Weight: 21.12 kN/m³

Saturated Unit Weight: 22.92 kN/m³

Cohesion: 24.52 kPa

Friction Angle: 30 degrees

Water Surface: Water Table

Custom Hu value: 1

Material: ENROCADO

Strength Type: Mohr-Coulomb

Unsaturated Unit Weight: 25 kN/m³

Saturated Unit Weight: 25 kN/m³

Cohesion: 40 kPa

Friction Angle: 40 degrees

Water Surface: Water Table

Custom Hu value: 1

Material: FILTRO GW

Strength Type: Mohr-Coulomb

Unsaturated Unit Weight: 21.68 kN/m³

Saturated Unit Weight: 23.45 kN/m³

Cohesion: 30 kPa

Friction Angle: 40 degrees

Water Surface: Water Table

Custom Hu value: 1

Global Minimums

Method: janbu simplified

FS: 1.300350

Center: 19205.686, 34209.060

Radius: 26.782

Left Slip Surface Endpoint: 19180.612, 34199.651

Right Slip Surface Endpoint: 19224.132, 34189.643

Resisting Horizontal Force=3101.05 kN

Driving Horizontal Force=2384.78 kN

Method: spencer

FS: 1.478500

Center: 19206.748, 34220.743

Radius: 37.480

Left Slip Surface Endpoint: 19176.697, 34198.346

Right Slip Surface Endpoint: 19227.554, 34189.569

Resisting Moment=149503 kN-m

Driving Moment=101118 kN-m

Resisting Horizontal Force=3605.48 kN

Driving Horizontal Force=2438.6 kN

Method: gle/morgenstern-price

FS: 1.477880

Center: 19206.748, 34220.743

Radius: 37.480

Left Slip Surface Endpoint: 19176.697, 34198.346

Right Slip Surface Endpoint: 19227.554, 34189.569

Resisting Moment=149439 kN-m

Driving Moment=101118 kN-m

Resisting Horizontal Force=3604.42 kN

Driving Horizontal Force=2438.92 kN

**ANEXO B -
RESULTADOS DE
ENSAYOS DE
LABORATORIO.**

B.1 Clasificación sucs de las calicatas del eje de la presa Yanacocha.



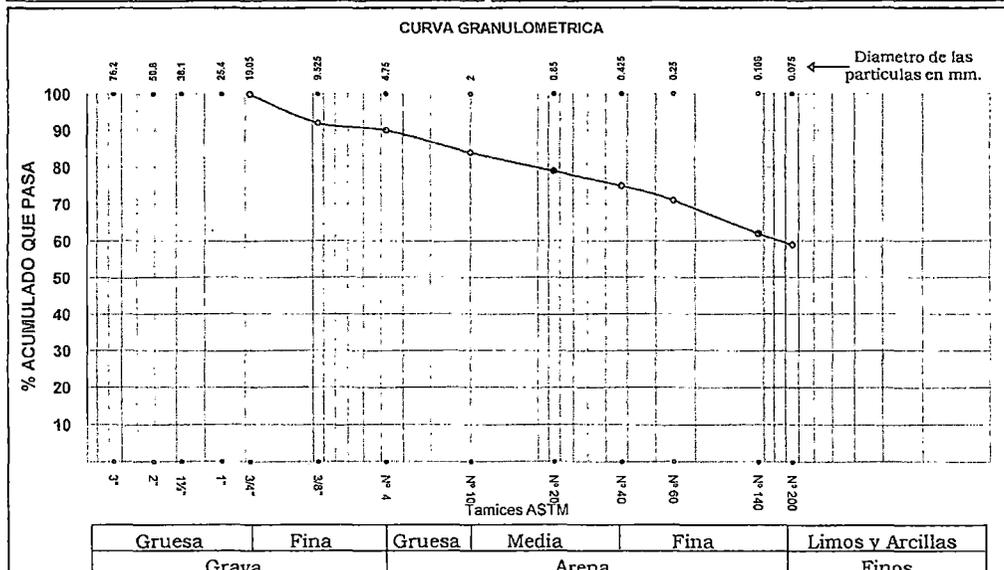
UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIONES RURALES
LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS

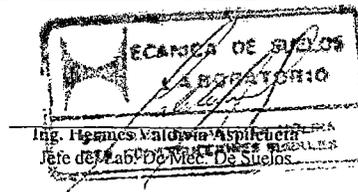
DCR-LMS 169/2011

Solicitante : CARLOS VASQUEZ DURAND Calicata : C - 01
 Proyecto : CONSTRUCCION DE REPRESAMIENTO DE LA LAGUNA DE YANACOCHA Muestra : MAB
 Ubicación : CERRO DE PASCO Profundidad : 2.00 m
 Fecha : La Molina, 31 de mayo de 2011

ANALISIS GRANULOMETRICO POR TAMIZADO NTP 339.128 / ASTM - D 422			LIMITES DE CONSISTENCIA ASTM - D 427 / D 4318	
MALLA	ABERTURA mm.	% QUE PASA		
3"	76.20		Limite liquido (%)	23.7
2"	50.80		Limite plastico (%)	16.88
1 1/2"	38.10		Indice plastico (%)	6.82
1"	25.40		Limite de contraccion (%)	-
3/4"	19.05	100	Resultados: ASTM - D 2487 / D 3282	
3/8"	9.525	92	Coefficiente de:	
Nº 004	4.750	90	-Uniformidad	
Nº 010	2.000	84	-Curvatura	
Nº 020	0.850	79	Material:	
Nº 040	0.425	75	-Grava %	10
Nº 060	0.250	71	-Arena %	31
Nº 140	0.106	62	-Finos %	59
Nº 200	0.075	59	Clasificacion:	
			-AASHTO	
			-SUCS	CL-ML arenoso
			Nombre de grupo:	
			CONTENIDO DE HUMEDAD ASTM - D 2216	
			Humedad natural (%)	5.57



NOTA: La muestra ha sido proporcionada e identificada por el solicitante





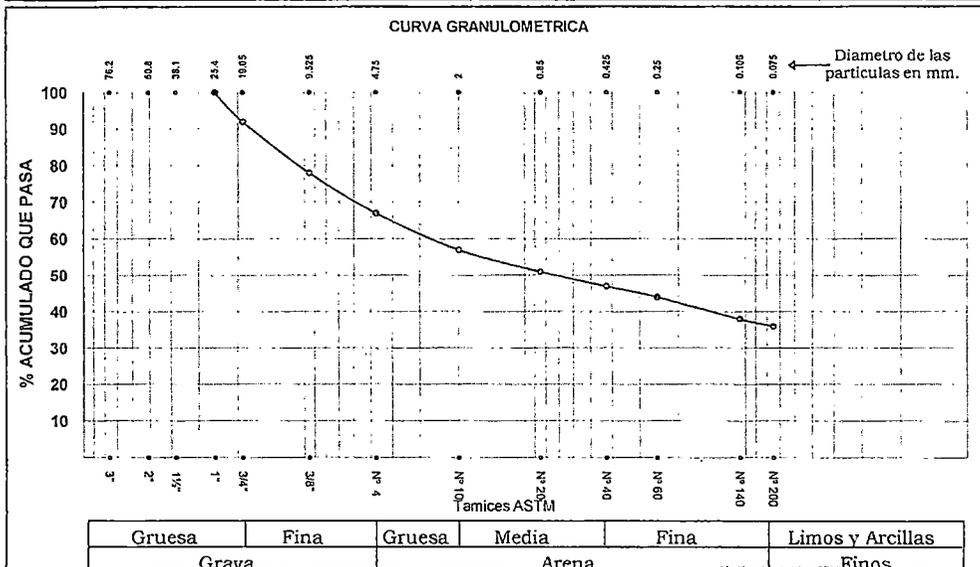
UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIONES RURALES
LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS

DCR-LMS 169/2011

Solicitante : CARLOS VASQUEZ DURAND Calicata : C - 05
 Proyecto : CONSTRUCCION DE REPRESAMIENTO DE LA LAGUNA DE YANACOAHA Muestra : MAB
 Ubicación : CERRO DE PASCO Profundidad : 2.00 m
 Fecha : La Molina, 31 de mayo de 2011

ANALISIS GRANULOMETRICO POR TAMIZADO NTP 339.128 / ASTM - D 422			LIMITES DE CONSISTENCIA ASTM - D 427 / D 4318	
MALLA	ABERTURA mm.	% QUE PASA	Limite liquido (%)	26.84
3"	76.20		Limite plastico (%)	18.58
2"	50.80		Indice plastico (%)	8.26
1 1/2"	38.10		Limite de contraccion (%)	-
1"	25.40	100	Resultados: ASTM - D 2487 / D 3282	
3/4"	19.05	92	<i>Coefficiente de:</i>	
3/8"	9.525	78	-Uniformidad	
Nº 004	4.750	67	-Curvatura	
Nº 010	2.000	57	<i>Material:</i>	
Nº 020	0.850	51	-Grava %	33
Nº 040	0.425	47	-Arena %	31
Nº 060	0.250	44	-Finos %	36
Nº 140	0.106	38	<i>Clasificacion:</i>	
Nº 200	0.075	36	-AASHTO	
			-SUCS	GC con arena
			Nombre de grupo:	
			CONTENIDO DE HUMEDAD ASTM - D 2216	
			Humedad natural (%)	11.05



NOTA: La muestra ha sido proporcionada e identificada por el solicitante

Mecanica de Suelos
LABORATORIO
 Ing. **Gerardo Valdivia Aspícuta**
 Jefe del Lab. De Mec. De Suelos

B.2 Ensayo de corte directo para el suelo de cimentación de la presa.



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIONES RURALES

LABORATORIO MECÁNICA DE SUELOS

DCR - LMS 169/2011

SOLICITANTE : CARLOS VASQUEZ DURAND

PROYECTO : CONSTRUCCION DEL REPRESAMIENTO DE LA LAGUNA DE YANACOCHA

UBICACIÓN : CERRO DE PASCO

SONDAJE : C - 02

PROFUNDIDAD : 2.00 m

FECHA : La Molina , 31 de Mayo de 2011

ENSAYO DE CORTE DIRECTO

Especimen	:	A	B	C
Lado (cm)	:	6.00	6.00	6.00
Altura (cm)	:	2.544	2.544	2.544
Densidad Seca (gr/cm ³)	:	1.56	1.56	1.56
Humedad Inicial (%)	:	26.95	26.95	26.95
Humedad Saturación (%)	:	27.98	28.21	27.68
Esfuerzo Normal (kg/cm ²)	:	0.50	1.00	1.50

Deformación Unitaria (ϵ - %)	Esfuerzo Cortante (kg/cm ²)		
	A	B	C
0.5	0.11	0.21	0.30
1.0	0.20	0.39	0.30
2.0	0.33	0.50	0.68
3.0	0.39	0.60	0.82
4.0	0.43	0.65	0.91
5.0	0.44	0.68	0.98
7.0	0.44	0.70	1.05
9.0	0.42	0.71	1.08
11.0	0.41	0.72	1.06
13.0	0.40	0.72	1.05
15.0	0.39	0.72	1.05

Angulo de Fricción Interna del Suelo (°) 27.96

Cohesión Aparente del Suelo (kg/cm²) 0.11

LABORATORIO DE SUELOS
LA MOLINA
Ing. Hernán A. Valdivia Arce
Jefe Lab. Mecánica de Suelos



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

Email: mecanicadesuelos_unalm@yahoo.com

Apdo 456 - La Molina, Lima - Perú

Telefax: 349-5679

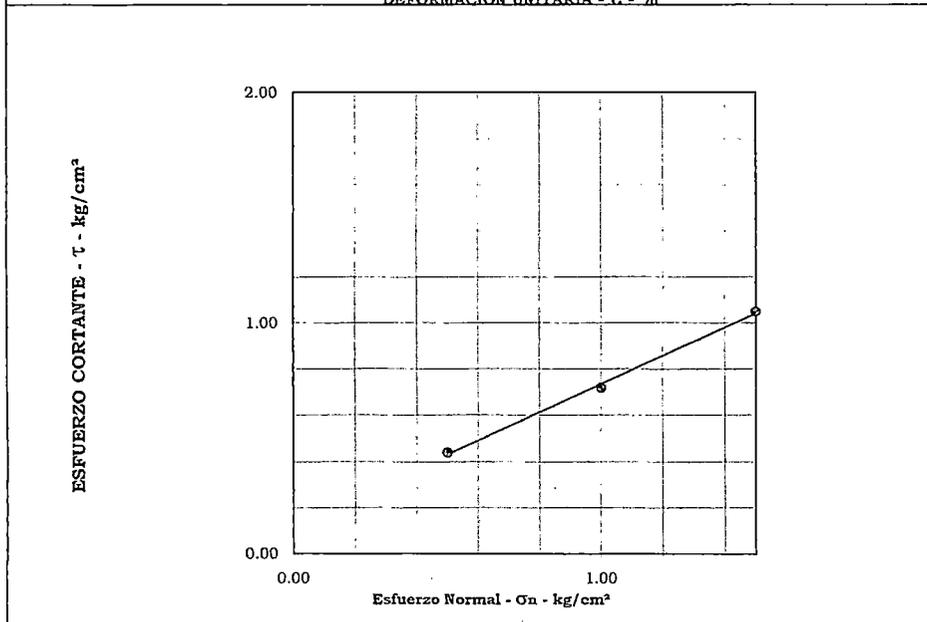
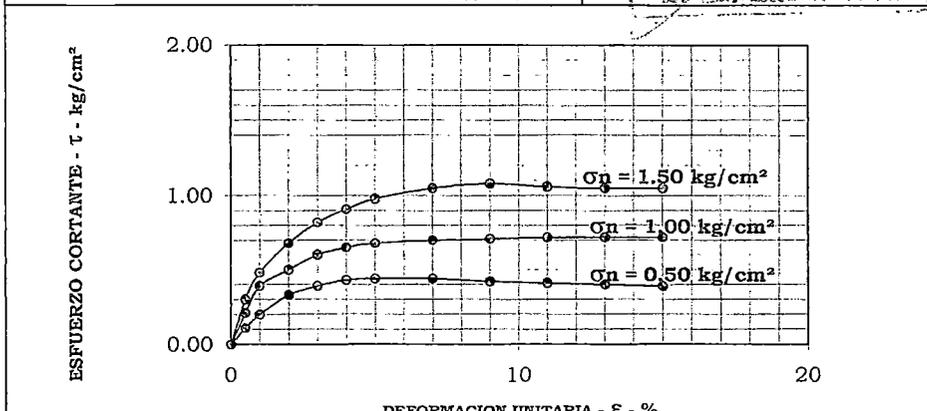
DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIONES RURALES

LABORATORIO DE MECANICA DE SUELOS

ENSAYO DE CORTE DIRECTO ASTM D - 3080

Solicitante : CARLOS VASQUEZ DURAND	Expediente: DCR - LMS 169/2011
Proyecto : CONSTRUCCION DEL REPRESAMIENTO DE LA LAGUNA DE YANACOCHA	Fecha: 31-05-11
Ubicación : CERRO DE PASCO	
Sondaje : C - 02	
Muestra : MAB - 1 Profundidad 2.00 m	

Angulo de fricción interna del suelo :	27.96 °	
Cohesión Aparente del suelo :	0.11 kg/cm²	
Densidad Seca Promedio ($\gamma_d < N^{\circ}4$) :	1.56 gr/cm³	
Humedad Natural (%) :	26.95 %	



Observación : Densidad Proporcionada por Solicitante

B.4 Ensayos de compresión simple de roca, relación de soporte de california y permeabilidad para las canteras.



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

Apdo. 456 La Molina, Lima 1
Av. La Molina s/n, Lima, Perú

Telefax 349-5679 C.T. 349-5647 Axo. 209

LABORATORIO DE PRUEBA Y ENSAYO DE MATERIALES
INFORME N° 1088 - 11' LP y EM

LABORATORIO DE PRUEBA Y ENSAYO DE MATERIALES
DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIONES RURALES

SOLICITANTE : Carlos Vásquez

OBRA: Construcción y Represamiento de la Laguna Yanacocha

LUGAR : Distrito de Timyahuarco - Cerro de Pasco

ENSAYO : COMPRESION SIMPLE DE ROCA

FECHA: La Molina, 12 de Diciembre del 2011

ASTM-C 42 / NTP. 339.059: "Metodo de Ensayo para la Extracion y Prueba de Corazones Diamantinos"

MUESTRA	FECHA	DIMENSIONES	AREA	CARGA	RESISTENCIA
ROCA	ENSAYO	PULG.	cm ²	kg	kg/cm ²
M-1	08/12/2011	4" x 2"	20.268	11600	572.33
M-1	ROCA TIPICA				

Ing. Carlos Bravo Aguilar
Jefe del Lab. Del Laboratorio
de Prueba y Ensayo de
Materiales



UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

CENTRO PERUANO JAPONÉS DE INVESTIGACIONES SÍSMICAS Y MITIGACIÓN DE DESASTRES
LABORATORIO GEOTÉCNICO



Av. Túpac Amaru Nº 1150, Lima 25, Perú - Telf (51-1) 482-0804, 481-0170, 482-0777 - Correo labgeoc@uni.edu.pe - Página <http://www.cismid-uni.org>

ENSAYO DE LA RELACION DE SOPORTE CALIFORNIA

(ASTM - D1883)

Informe Nº : LG11-352 Fecha : Diciembre, 2011
Solicitante : CARLOS VASQUEZ DURAND
Proyecto : Construcción del Represamiento de la Laguna Yanacocha
Ubicación : Dist. Tinyahuarco, Prov. Pasco, Dpto. Pasco
Sondaje : CANTERA ARCILLA AASHTO : A-4(0)
Muestra : --- SUCS : CL - ML // Arcilla limosa arenosa
Profundidad (m) : 3.00

ETAPA DE COMPACTACIÓN			
Capas		5.00	5.00
Golpes por capa		10.00	25.00
Diámetro (cm)		15.00	15.00
Altura (cm)		12.50	12.49
Humedad inicial (%)		9.05	9.11
Humedad final (%)		15.48	13.60
Densidad seca (g/cm ³)		1.89	1.99

CONTROL DE DEFORMACIÓN			
Tiempo (horas)		70	70
Deformación (%)		---	0.14

APLICACIÓN DE LA CARGA			
Penetración		Resistencia	
(mm)	(Pulg.)	(Lb/pulg ²)	
0.000	0.00	0.00	0.00
0.635	0.25	18.86	44.02
1.270	0.05	56.59	138.34
1.905	0.08	84.89	237.37
2.540	1.00	106.90	312.83
3.810	1.50	127.33	421.30
5.080	0.20	144.62	531.34
6.350	2.50	160.34	616.22
7.620	3.00	176.06	710.54
10.160	0.40	196.50	831.59
12.700	0.50	216.94	930.62

PRESION CORREGIDA							
Penetración (Pulg.)		0.1"	0.2"	0.1"	0.2"	0.1"	0.2"
Presión (Lb/Pulg ²)		106.9	144.6	312.8	531.3	330.1	597.4
C. B. R. (%)		10.7	9.6	31.3	35.4	33.0	39.8

Observaciones : La muestra ha sido proporcionada e identificada por el solicitante.

David Jona Laupan
DAVID JONA LAUPAN
INGENIERO CIVIL - C.R. 45833
JEFE DEL LAB. GEOTÉCNICO





UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

CENTRO PERUANO JAPONÉS DE INVESTIGACIONES SÍSMICAS Y MITIGACIÓN DE DESASTRES
LABORATORIO GEOTÉCNICO



Av. Túpac Amaru Nº 1150, Lima 25, Perú - Telf. (51-1) 482-0804, 481-0170, 482-0777 - Correo labgeoc@uni.edu.pe - Página http://www.cismid-uni.org

ENSAYO DE LA RELACION DE SOPORTE CALIFORNIA

(ASTM - D1883)

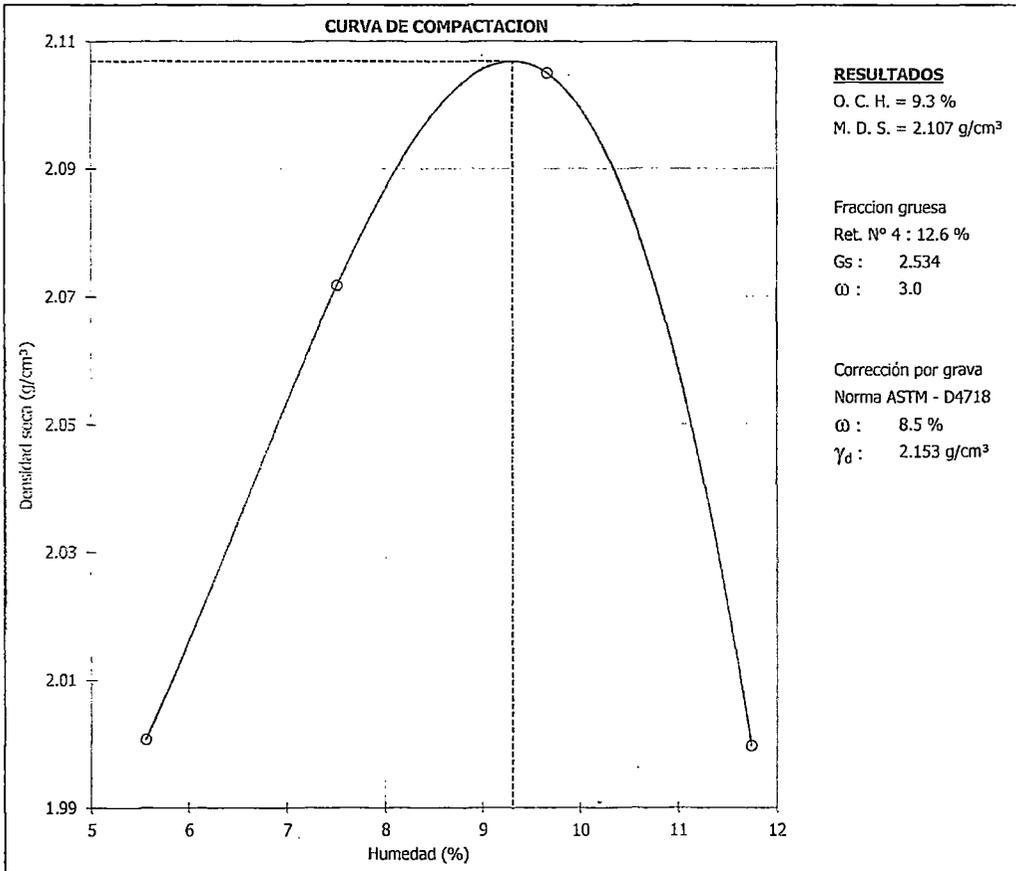
Informe Nº : LG11-352
Solicitante : CARLOS VASQUEZ DURAND
Proyecto : Construcción del Represamiento de la Laguna Yanacocha

Fecha : Diciembre, 2011

Ubicación : Dist. Tinyahuarco, Prov. Pasco, Dpto. Pasco

Sondaje : CANTERA ARCILLA AASHTO : A-4(0)
Muestra : --- S U C S : CL - ML // Arcilla limosa arenosa
Profundidad (m) : 3.00

ENSAYO PRELIMINAR : Proctor Modificado (ASTM - D1557 / Método A)				
Humedad (%)	5.6	7.5	9.7	11.7
Densidad seca (g/cm ³)	2.001	2.072	2.105	2.000



Observaciones : La muestra ha sido proporcionada e identificada por el solicitante.

David Luna Durán
DAVID LUNA DURÁN
INGENIERO CIVIL - Nº 10963
PRESENTE DEL LABORATORIO





UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

CENTRO PERUANO JAPONÉS DE INVESTIGACIONES SÍSMICAS Y MITIGACIÓN DE DESASTRES
LABORATORIO GEOTÉCNICO



Av. Túpac Amaru Nº 1150, Lima 25, Perú - Telf. (51-1) 482-0804, 481-0170, 482-0777 - Correo labgeoc@uni.edu.pe - Página http://www.cismid-uni.org

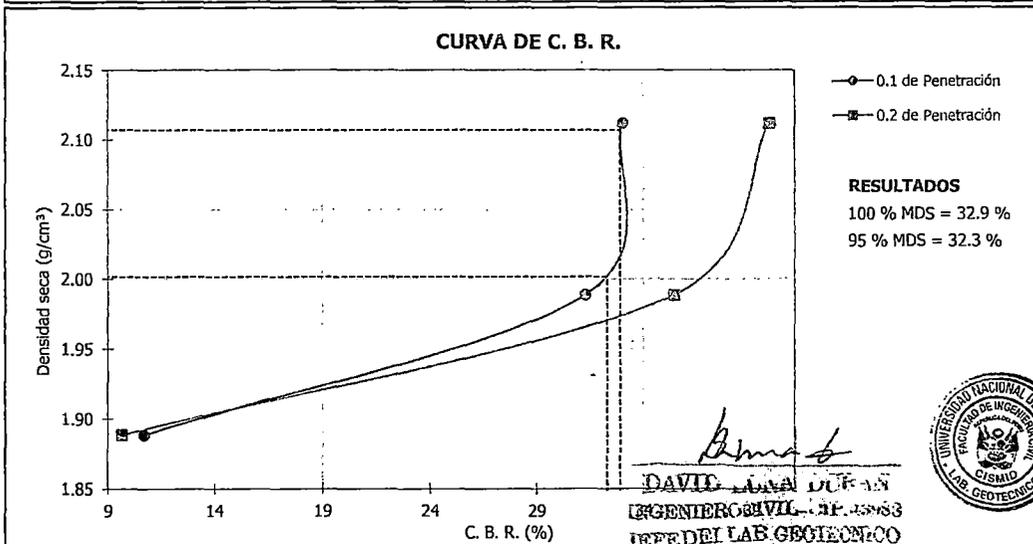
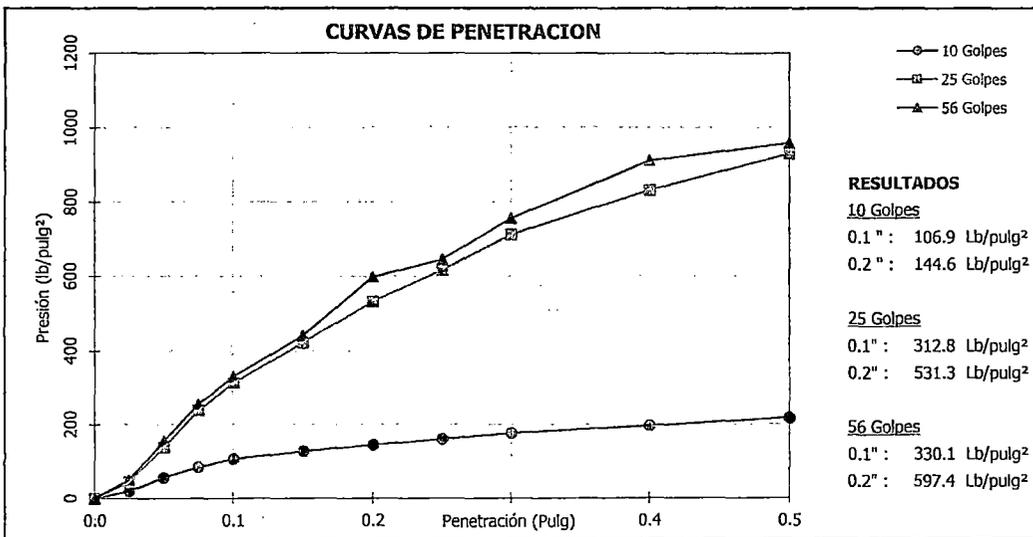
ENSAYO DE LA RELACION DE SOPORTE CALIFORNIA
(ASTM - D1883)

Informe Nº : LG11-352
Solicitante : CARLOS VASQUEZ DURAND
Proyecto : Construcción del Represamiento de la Laguna Yanacocha

Fecha : Diciembre, 2011

Ubicación : Dist. Tinyahuarco, Prov. Pasco, Dpto. Pasco

Sondaje : CANTERA ARCILLA AASHTO : A-4(0)
Muestra : --- SUCS : CL - ML // Arcilla limosa arenosa
Profundidad (m) : 3.00





UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

CENTRO PERUANO JAPONÉS DE INVESTIGACIONES SÍSMICAS Y MITIGACIÓN DE DESASTRES
LABORATORIO GEOTÉCNICO



Av. Túpac Amaru Nº 1150, Lima 25, Perú - Telf. (51-1) 482-0804, 481-0170, 482-0777 - Correo labgeoc@uni.edu.pe - Página <http://www.cismid-uni.org>

PERMEABILIDAD
(Pared Flexible ASTM - D5084)

Informe : LG11-352
Solicitante : CARLOS VASQUEZ DURAND
Proyecto : Construcción del Represamiento de la Laguna Yanacocha

Fecha : Diciembre, 2011

Ubicación : Dist. Tinahuarco, Prov. Pasco, Dpto. Pasco

Sondaje : C - 01
Muestra : ---
Prof. (m) : 5.00
Estado : Inalterado

AASHTO : A-6 (11)
SUCS : CL / Arcilla delgada
Hoja : 1 de 1

Datos del espécimen

Diámetro	: 4.87 cm	Humedad inicial	: 20.6 %
Altura	: 10.03 cm	Humedad final	: 24 %
Densidad seca	: 1.64 g/cm ³	Saturación inicial	: 84.7 %
Gravedad de sólidos	: 2.72	Saturación final	: 98.6 %

Cálculo de parámetro "B"

Presión de celda
Inicial : 3.08 kg/cm³
Final : 3.29 kg/cm³

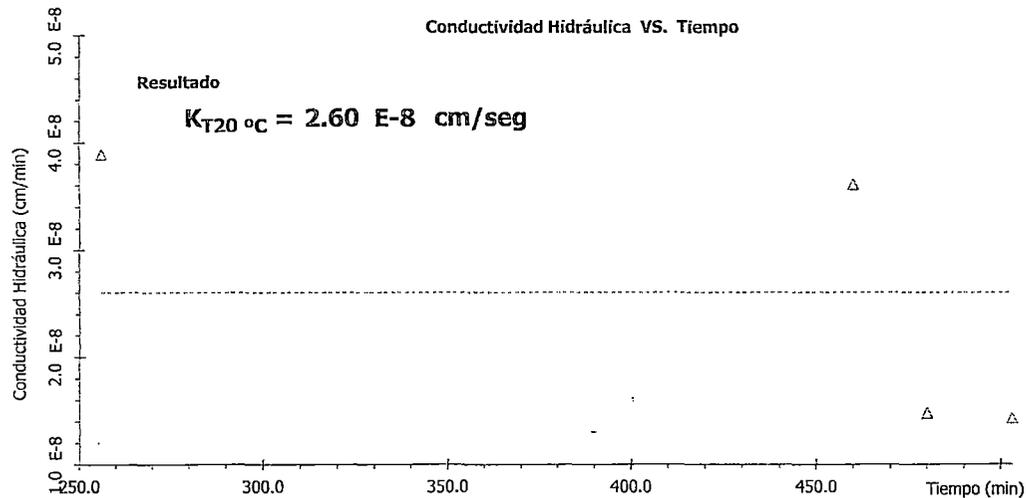
Presión de poros
Inicial : 2.88 kg/cm³
Final : 3.09 kg/cm³

Contrapresión
Inicial : 2.88 kg/cm³
Final : 3.09 kg/cm³

Parám. "B" : 96.7 %

Cálculo de conductividad hidráulica

P. Entrada (kg/cm ²)	Tiempo (seg)	Volumen (cm ³)	Temp. (°C)	Gradiente (l)	Velocidad (cm/seg)	K _{T20 °C} (cm/seg)
3.33	30180	0.20	23.0	23.0	3.56 E-7	1.44 E-8
3.34	28800	0.20	22.0	24.0	3.73 E-7	1.48 E-8
3.35	27600	0.50	23.0	25.0	9.73 E-7	3.61 E-8
3.35	15360	0.30	23.0	25.0	1.05 E-6	3.89 E-8



Observación :

La muestra ha sido identificada y entregada por el solicitante.

David Luna Durán
DAVID LUNA DURÁN
INGENIERO CIVIL - M.P. 43983
LABORATORIO GEOTÉCNICO





UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

CENTRO PERUANO JAPONÉS DE INVESTIGACIONES SÍSMICAS Y MITIGACIÓN DE DESASTRES
LABORATORIO GEOTÉCNICO



Av. Túpac Amaru N° 1150, Lima 25, Perú - Telf. (51-1) 482-0804, 481-0170, 482-0777 - Correo labgeoc@uni.edu.pe - Página http://www.cismid-uni.org

PERMEABILIDAD
(Pared Flexible ASTM - D5084)

Informe : LG11-352
Solicitante : CARLOS VASQUEZ DURAND
Proyecto : Construcción del Represamiento de la Laguna Yanacocha

Fecha : Diciembre, 2011

Ubicación : Dist. Tinyahuarco, Prov. Pasco, Dpto. Pasco

Sondaje : C - 02
Muestra : ---
Prof. (m) : 12.00
Estado : Remoldeado

AASHTO : A-4 (11)
SUCS : CL - ML / Arcilla limosa arenosa
Hoja : 1 de 1

Datos del espécimen

Diámetro : 5 cm
Altura : 10.1 cm
Densidad seca : 1.81 g/cm³
Gravedad de sólidos : 2.73

Humedad inicial : 12 %
Humedad final : 18.3 %
Saturación inicial : 64.4 %
Saturación final : 98.4 %

Cálculo de parámetro "B"

Presión de celda

Inicial : 3.98 kg/cm³
Final : 4.19 kg/cm³

Presión de poros

Inicial : 3.8 kg/cm³
Final : 4.01 kg/cm³

Contrapresión

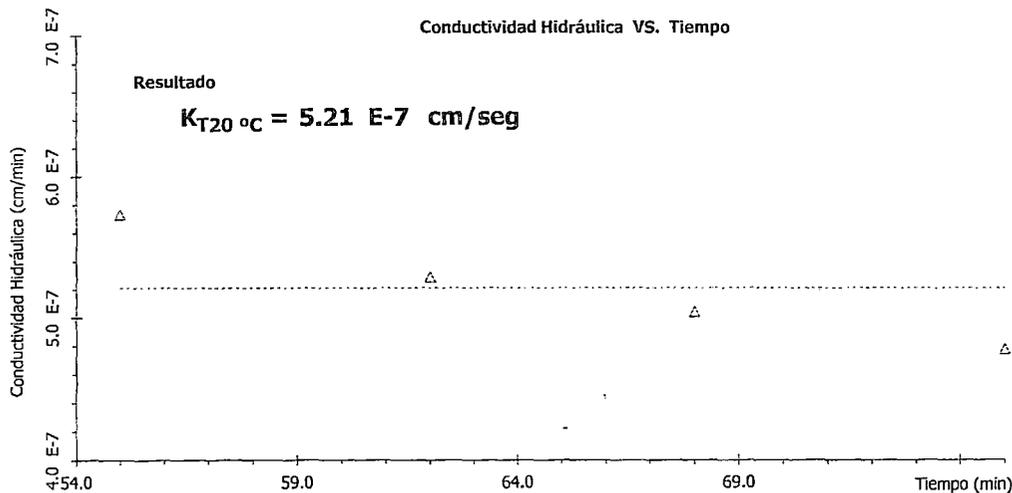
Inicial : 3.8 kg/cm³
Final : 4.02 kg/cm³

Parám. "B" : 98.3 %

Cálculo de conductividad hidráulica

P. Entrada (kg/cm ²)	Tiempo (seg)	Volumen (cm ³)	Temp. (°C)	Gradiente (l)	Velocidad (cm/seg)	K _{T20 °C} (cm/seg)
4.24	4500	1.00	23.0	22.0	1.13 E-5	4.78 E-7
4.25	4080	1.00	23.0	23.0	1.25 E-5	5.04 E-7
4.26	3720	1.00	23.0	24.0	1.37 E-5	5.29 E-7
4.27	3300	1.00	23.0	25.0	1.54 E-5	5.73 E-7

Conductividad Hidráulica VS. Tiempo



Observación :

La muestra ha sido identificada y entregada por el solicitante. Máxima humedad remoldeable = 12.0% (humedad sugerida = 17.5%), densidad seca = 1.81g/cm³. Los datos de remoldeo son responsabilidad del solicitante.

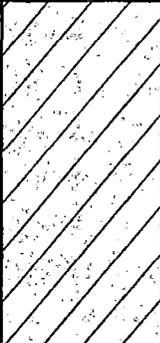
David Luna Durán
DAVID LUNA DURÁN
INGENIERO CIVIL - Nº 10983
REPRESENTANTE LEGAL

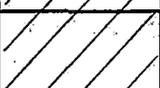
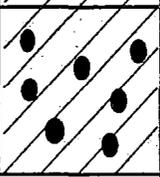


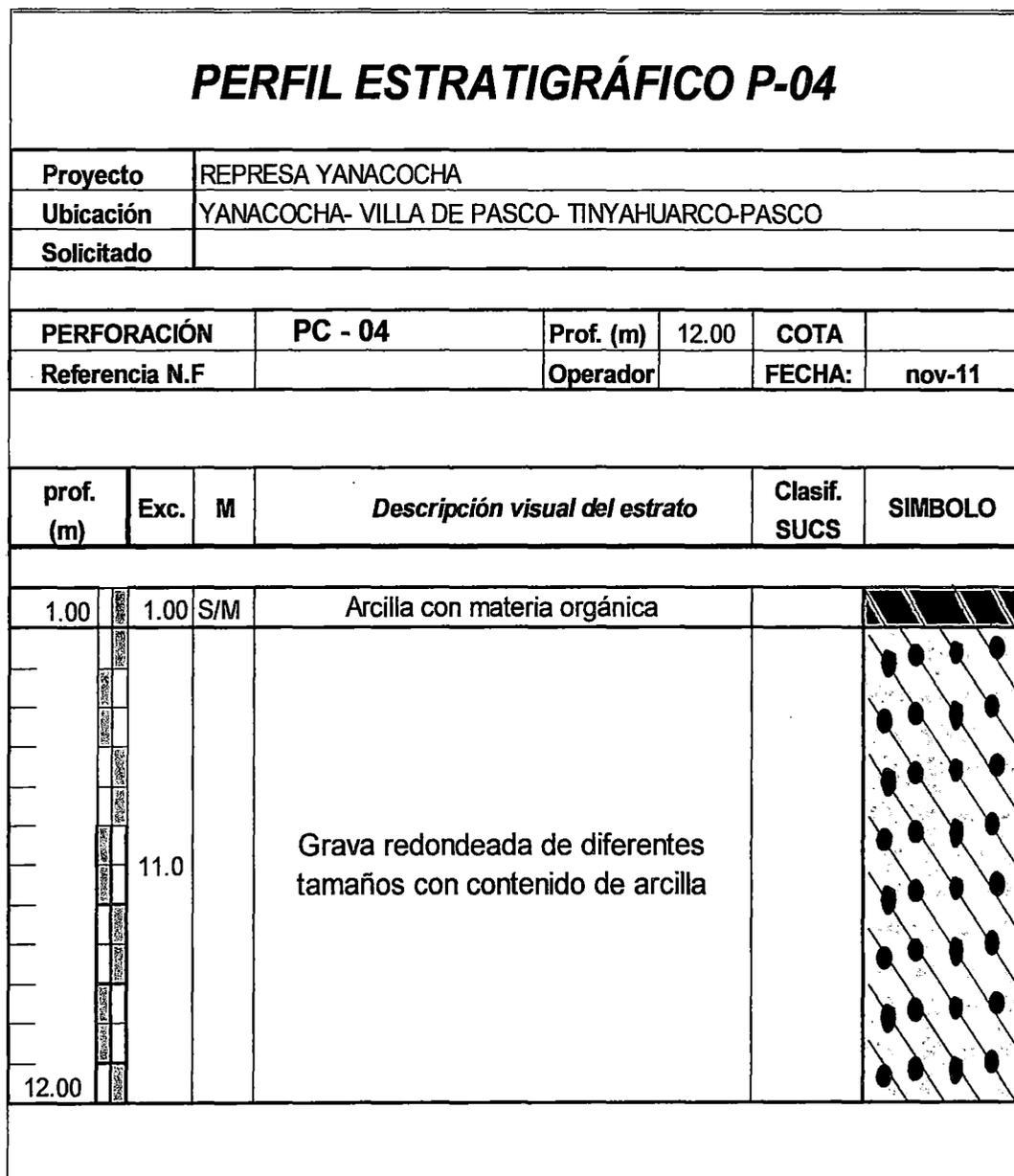
ANEXO C - PERFILES DE SUELO.

C.1 Perfil estratigráfico de las perforaciones diamantinas realizadas.

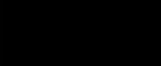
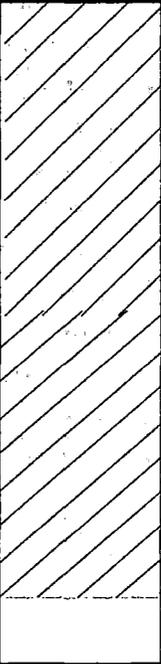
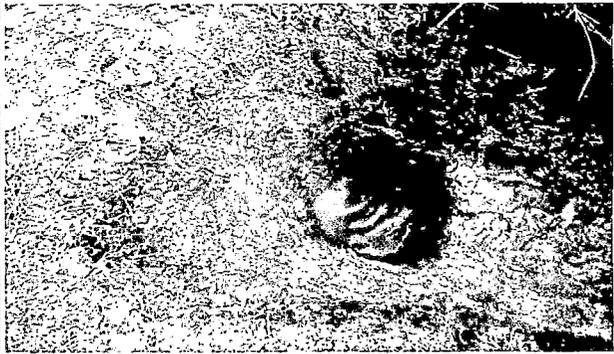
PERFIL ESTRATIGRÁFICO P-01					
Proyecto	REPRESA YANACOCHA				
Ubicación	YANACOCHA- VILLA DE PASCO- TINYAHUARCO-PASCO				
Solicitado					
PERFORACIÓN	P - 01	Prof. (m)	25.00	COTA	
Referencia N.F	0.20 m	Operador		FECHA:	nov-11
prof. (m)	Exc.	M	Descripción visual del estrato	Clasif. SUCS	SIMBOLO
2.00	2.00	S/M	Arcilla con alto contenido de materia orgánica, color pardo oscuro, humedo.		
5.80	3.80		Arcilla de color amarillo		
7.50	2.70		Arcilla de color marrón		
10.50	3.00		Arcilla de color gris		
22.00			Arcilla de color amarillo en estado húmedo		
25.00			Arcilla de color amarillo en estado y medianamente compacto		

PERFIL ESTRATIGRÁFICO P-02					
Proyecto	REPRESA YANACOCHA				
Ubicación	YANACOCHA- VILLA DE PASCO- TINYAHUARCO-PASCO				
Solicitado					
PERFORACIÓN	P - 02	Prof. (m)	20.00	COTA	
Referencia N.F	1.50 m	Operador		FECHA:	nov-11
prof. (m)	Exc.	M	Descripción visual del estrato	Clasif. SUCS	SIMBOL
1.00	1.00	S/M	Arcilla con materia orgánica, color pardo.		
8.00	7.00		Arcilla de color amarillo		
11.00	3.00		Arena arcillosa		
17.00	6.00		Arcilla de color amarillo		
18.80	1.80		Arcilla de color gris		
20.00			Grava redondeada de diferentes tamaños		

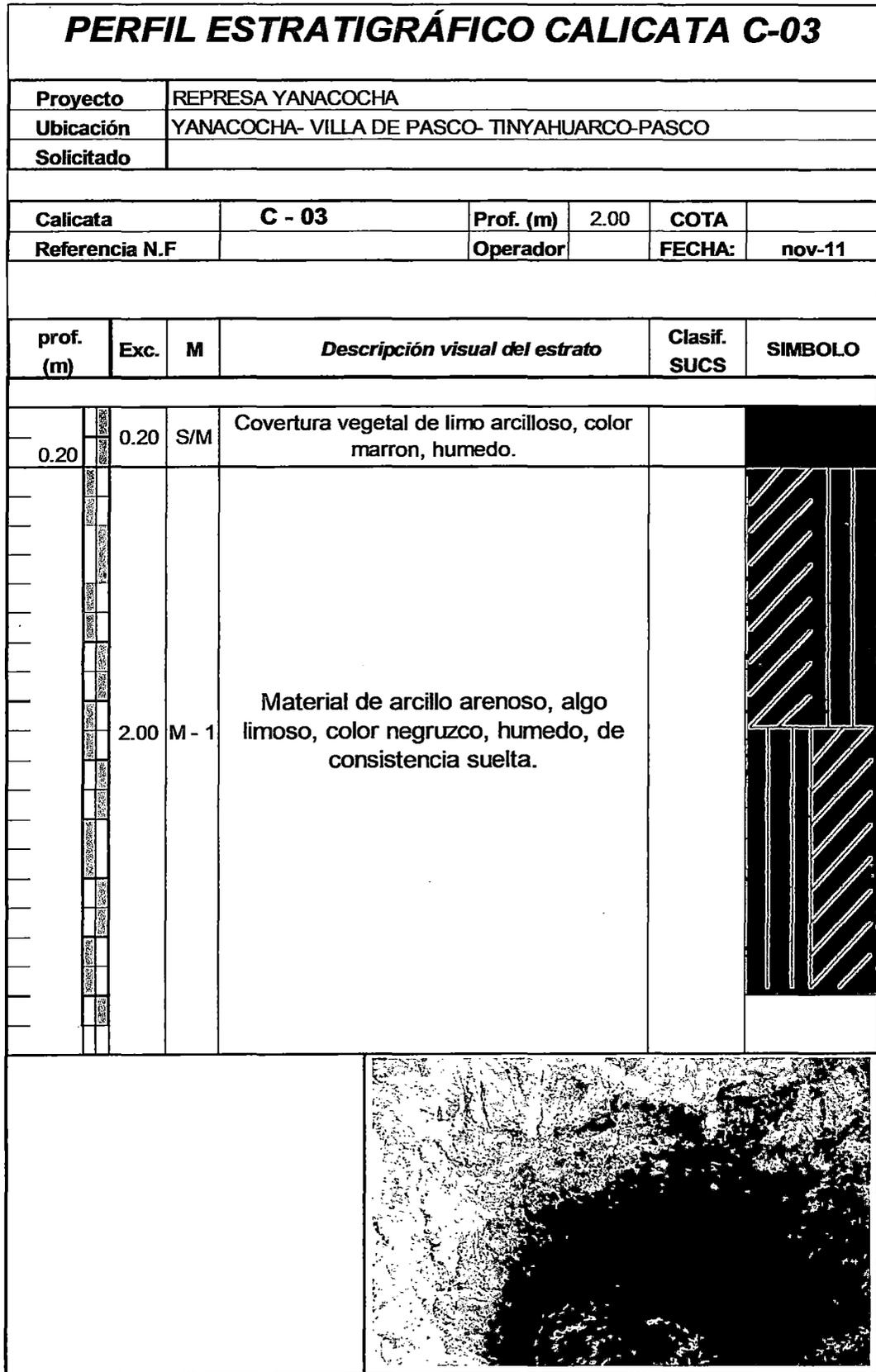
PERFIL ESTRATIGRÁFICO P-03						
Proyecto	REPRESA YANACOCHA					
Ubicación	YANACOCHA- VILLA DE PASCO- TINYAHUARCO-PASCO					
Solicitado						
PERFORACIÓN	P - 03	Prof. (m)	18.00	COTA		
Referencia N.F		Operador		FECHA:	nov-11	
prof. (m)	Exc.	M	Descripción visual del estrato		Clasif. SUCS	SIMBOLO
0.50	0.50	S/M	Materia orgánica			
10.00			Arcilla de color amarillo			
11.00	1.00		Arcilla de color girs			
12.00	1.00		Arcilla de color amarillo			
14.00	2.00		Arcilla de color girs			
18.00	4.00		Grava redondeada de diferentes tamaños con contenido de arcilla			

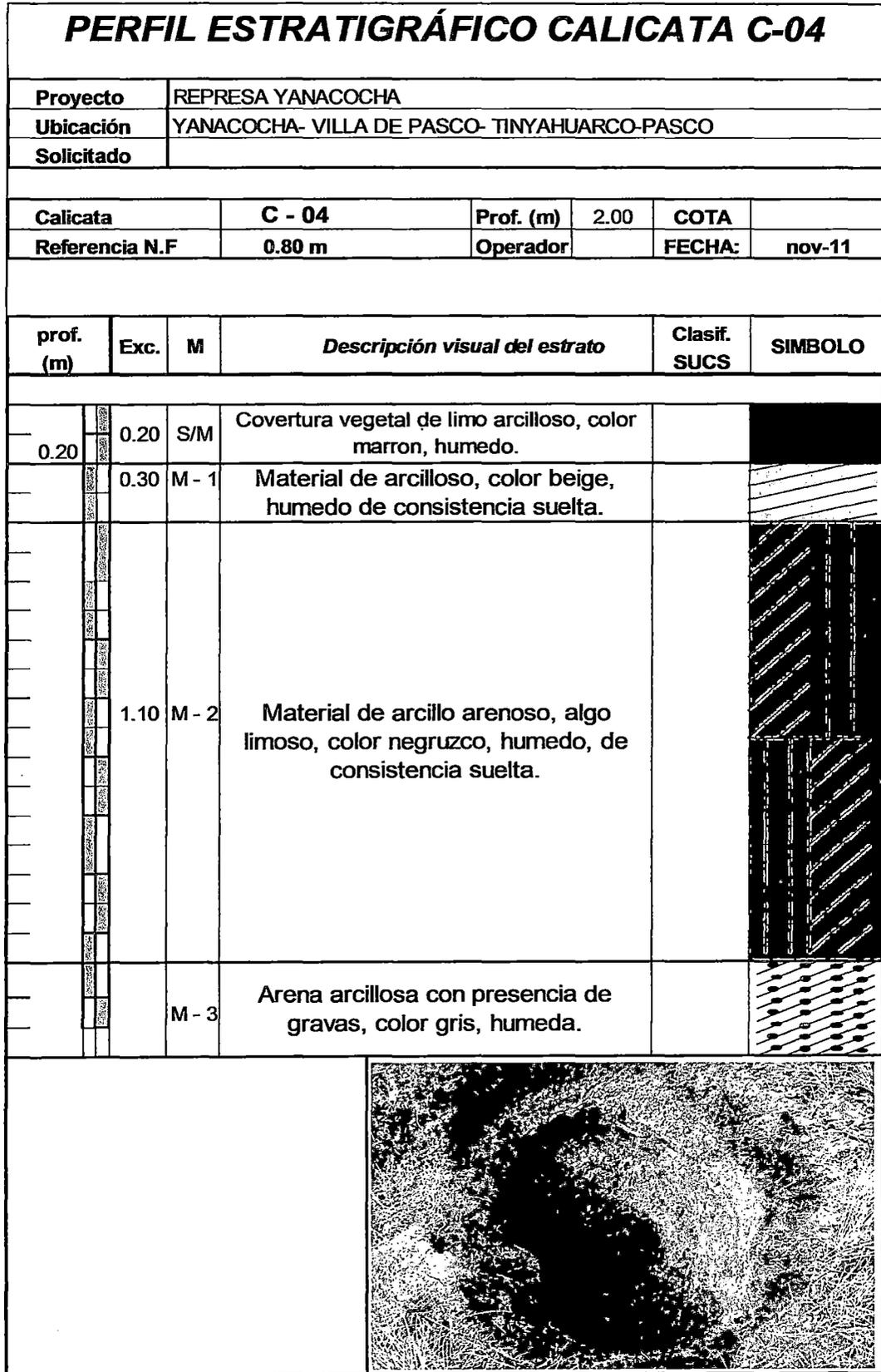


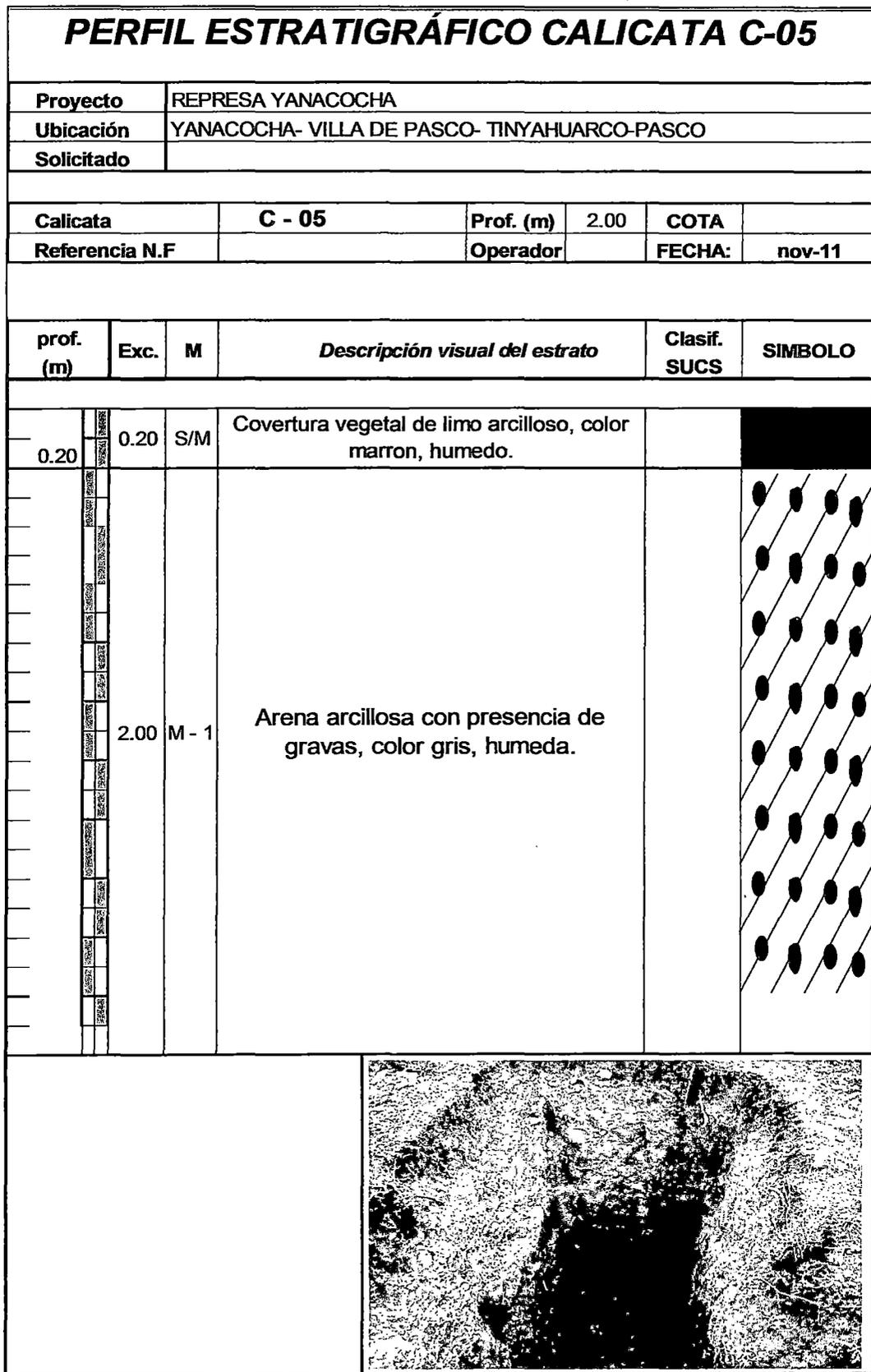
C.2 Perfil estratigráfico de las calicatas realizadas en el eje de la presa Yanacocha.

PERFIL ESTRATIGRÁFICO CALICATA C-01					
Proyecto	REPRESA YANACOCHA				
Ubicación	YANACOCHA- VILLA DE PASCO- TINYAHUARCO-PASCO				
Solicitado					
Calicata	C - 01	Prof. (m)	2.00	COTA	
Referencia N.F	1.50 m	Operador		FECHA:	nov-11
prof. (m)	Exc.	M	Descripción visual del estrato	Clasif. SUCS	SIMBOLO
0.20	0.20	S/M	Covertura vegetal de limo arcilloso, color marron, humedo.		
	2.00	M - 1	Material de arcilloso, color beige amarillento, humedo de consistencia suelta.		
					

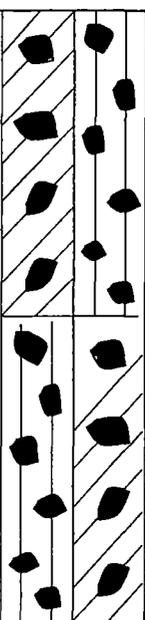
PERFIL ESTRATIGRÁFICO CALICATA C-02					
Proyecto		REPRESA YANACOCHA			
Ubicación		YANACOCHA- VILLA DE PASCO- TINYAHUARCO-PASCO			
Solicitado					
Calicata		C - 02	Prof. (m)	2.00	COTA
Referencia N.F		0.20 m	Operador		FECHA: nov-11
prof. (m)	Exc.	M	Descripción visual del estrato	Clasif. SUCS	SIMBOL
0.20	0.20	S/M	Coertura vegetal de limo arcilloso, color marron, humedo.		
	2.00	M - 1	Material de arcilloso, color beige amarillento, humedo de consistencia semi suelta.		
					

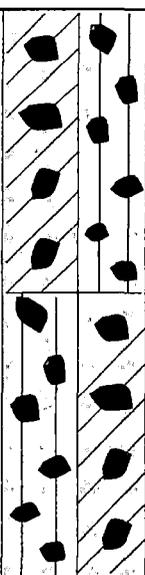


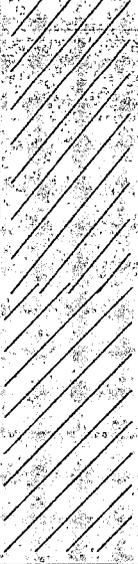




C.3 Perfil estratigráfico de las calicatas realizadas en las canteras cercanas a la presa Yanacocha.

REGISTRO DE CANTERA 1						
Proyecto		REPRESA YANACOCCHA				
Ubicación		YANACOCCHA VILLA DE PASCO TINYAHUARCO PASCO				
Solicitado						
Calicata		CANTERA 1		Prof. (m)	COTA	
Referencia N.F		-		Operador	J.D.M. / Y.P.I.	FECHA: nov-11
prof. (m)	Exc.	M	Descripción visual del estrato	Clasif. SUCS	SIMBOL	
1.00			Grava sub angular con matriz , limo arcillosa, humeda, color beige, presenta gravas menores de 3" de diametro.	GP		
2.00						
3.00						
				Croquis		

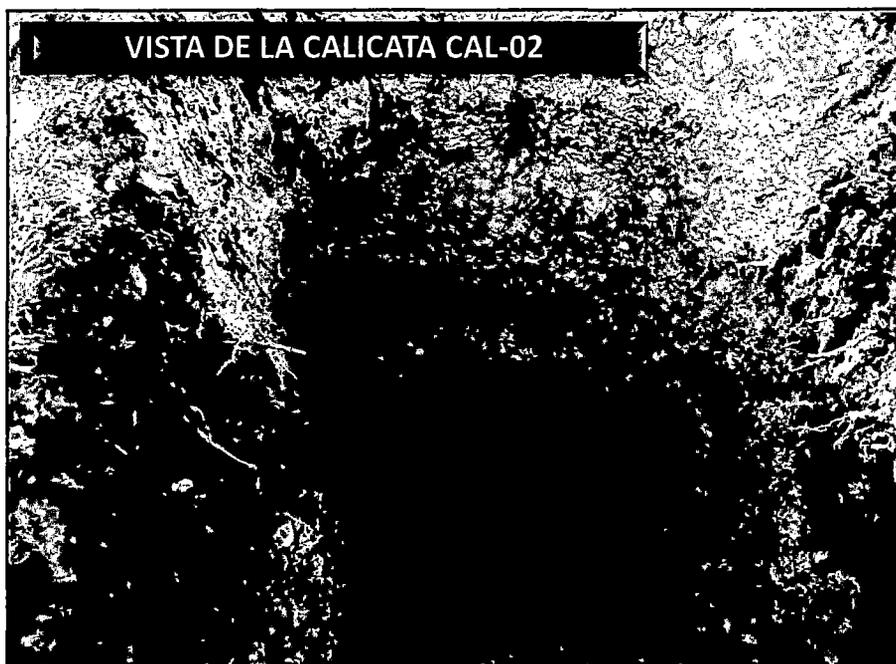
REGISTRO DE CANTERA 2						
Proyecto		REPRESA YANACocha				
Ubicación		YANACocha VILLA DE PASCO TINYAHUARCO PASCO				
Solicitado		CONSTRUCTORA G Y G SAC.				
Calicata		CANTERA 2		Prof. (m)	COTA	
Referencia N.F		-		Operador	J.D.M. / Y.P.I.	FECHA: nov-11
prof. (m)	Exc.	M	Descripción visual del estrato	Clasif. SUCS	SIMBOL	
<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="border-right: 1px solid black; width: 10px; height: 100%; margin-right: 5px;"></div> <div style="font-size: 8px; line-height: 1.2;"> 0.00 0.10 0.20 0.30 0.40 0.50 0.60 0.70 0.80 0.90 1.00 1.10 1.20 1.30 1.40 1.50 1.60 1.70 1.80 1.90 2.00 2.10 2.20 2.30 2.40 2.50 2.60 2.70 2.80 2.90 3.00 </div> </div>			Grava sub angular con matriz , areno limosa, humeda, color beige, presenta gravas menores de 3" de diametro.	GP		
			Croquis			

REGISTRO DE CANTERA 3						
Proyecto		REPRESA YANACOCHA				
Ubicación		YANACOCHA VILLA DE PASCO TINYAHUARCO PASCO				
Solicitado		CONSTRUCTORA G Y G SAC.				
Calicata		CANTERA 3	Prof. (m)		COTA	
Referencia N.F		-	Operador	J.D.M. / Y.P.I.	FECHA:	nov-11
prof. (m)	Exc.	M	Descripción visual del estrato	Clasif. SUCS	SIMBOL	
1.00			arcilla limosa, humeda, color amarillenta	ML		
2.00						
3.00						
			Croquis			

ANEXO D - PLANOS.

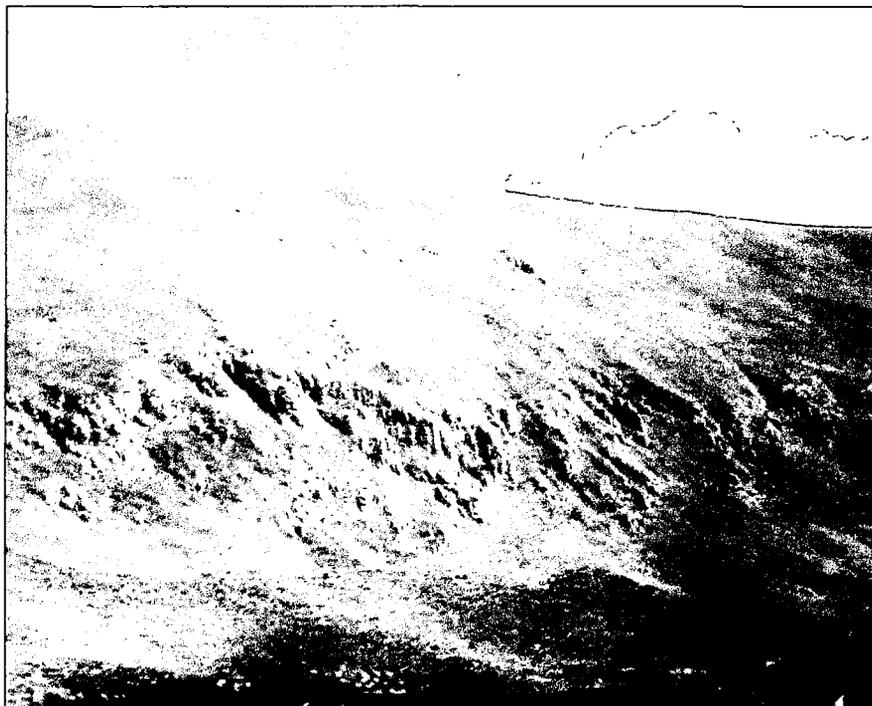
**ANEXO E - PANEL
FOTOGRAFICO.**

E.1 Panel fotográfico de calicatas del eje de presa y calicatas de canteras.

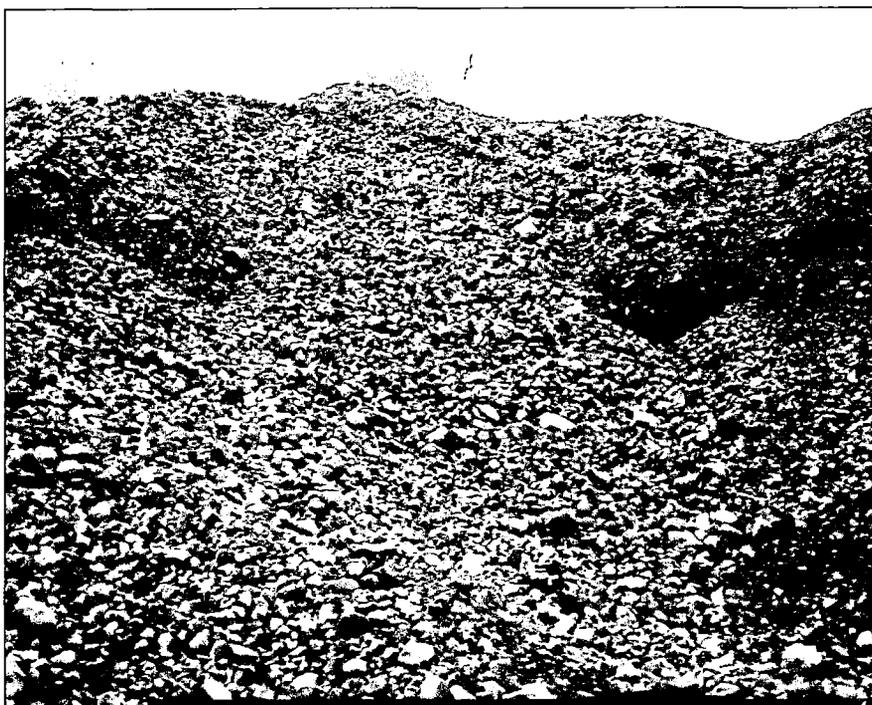




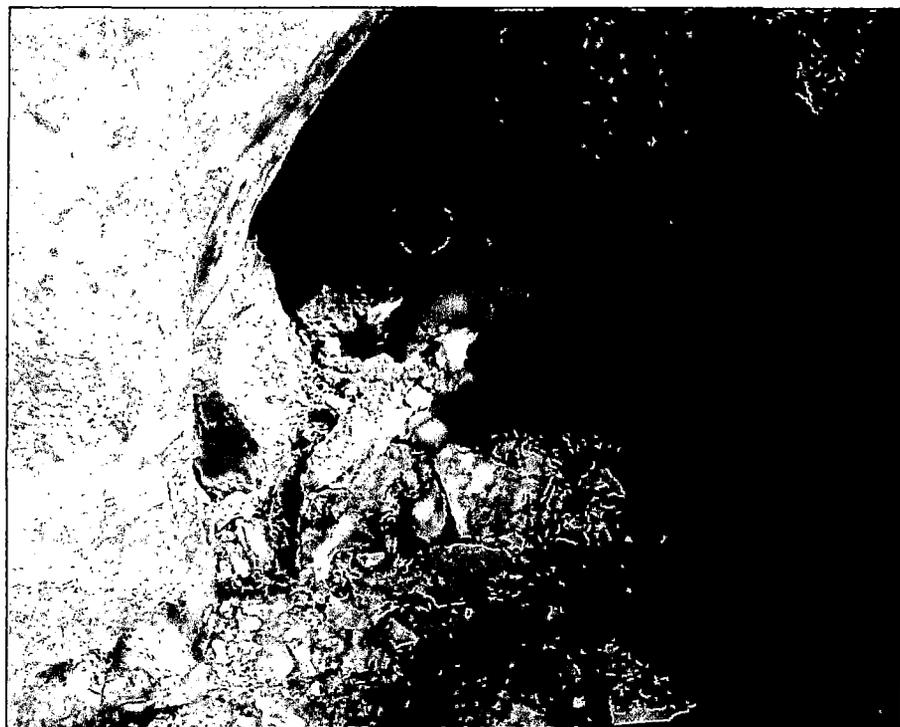




**ORIENTACIÓN DEL ESTRATO ROCOSO EN LA MARGEN
IZQUIERDA DE LA LAGUNA**



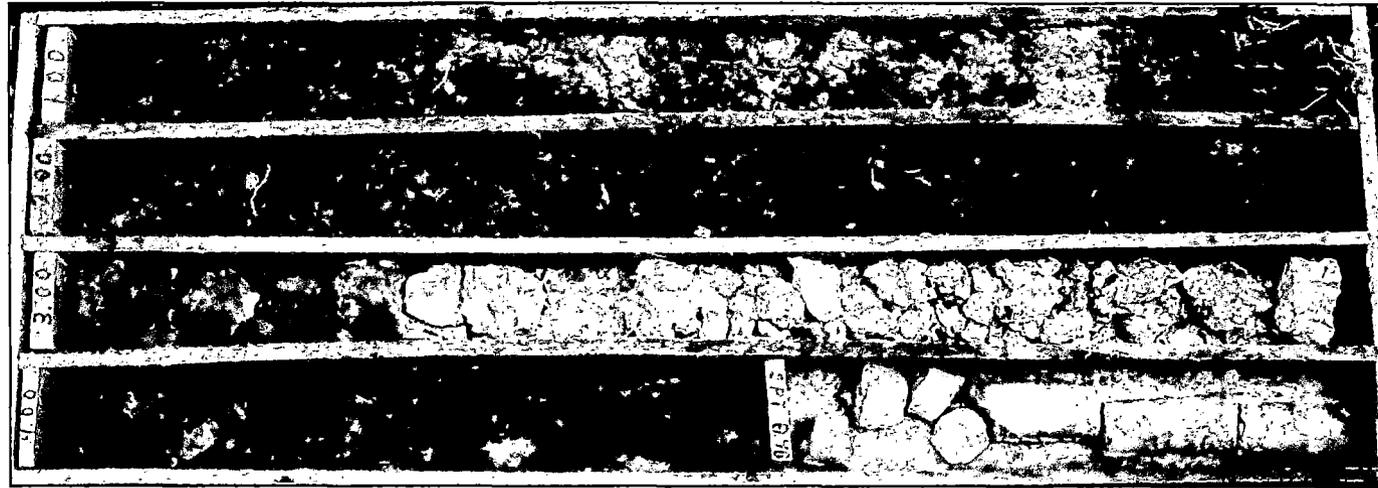
**CANTERA DE MATERIAL AGREGADO GRUESO EN LA
QUEBRADA DE ANGASCANCHA**



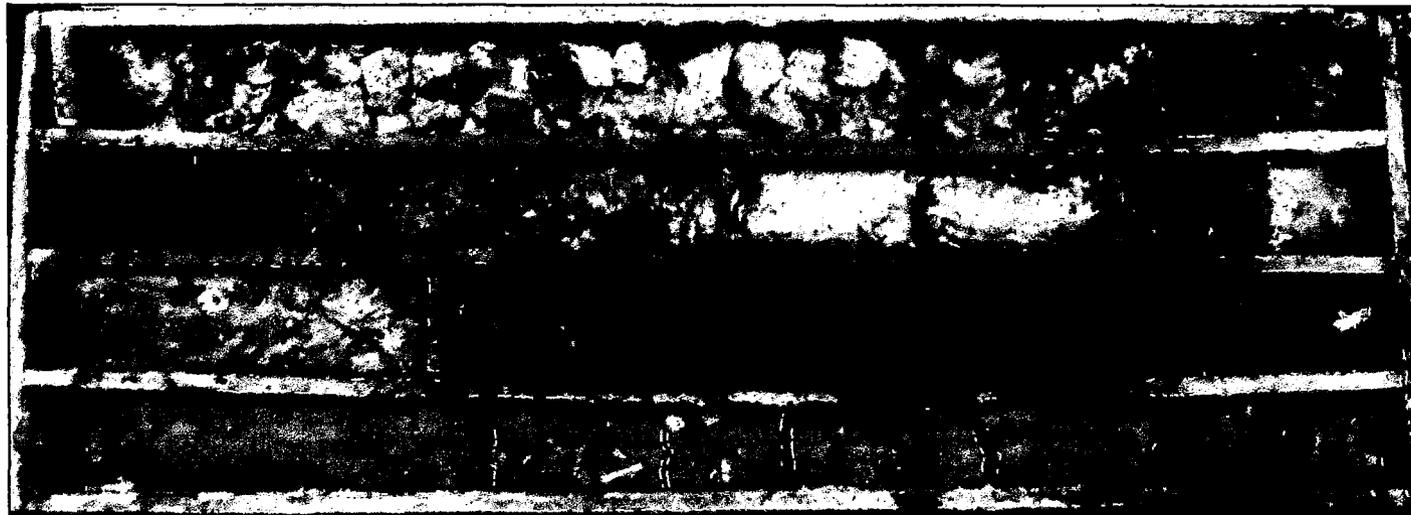
CANTERA DE ARCILLA EN LA QUEBRADA DE YANACOCHA

E.2 Panel fotográfico de los ensayos de perforación diamantina, SPT y permeabilidad.

PERFORACIÓN DIAMANTINA N° 1



DE 0.00 A 4.00 m DE PROFUNDIDAD



DE 4.00 A 8.00 m DE PROFUNDIDAD



DE 8.00 A 12.00 m DE PROFUNDIDAD



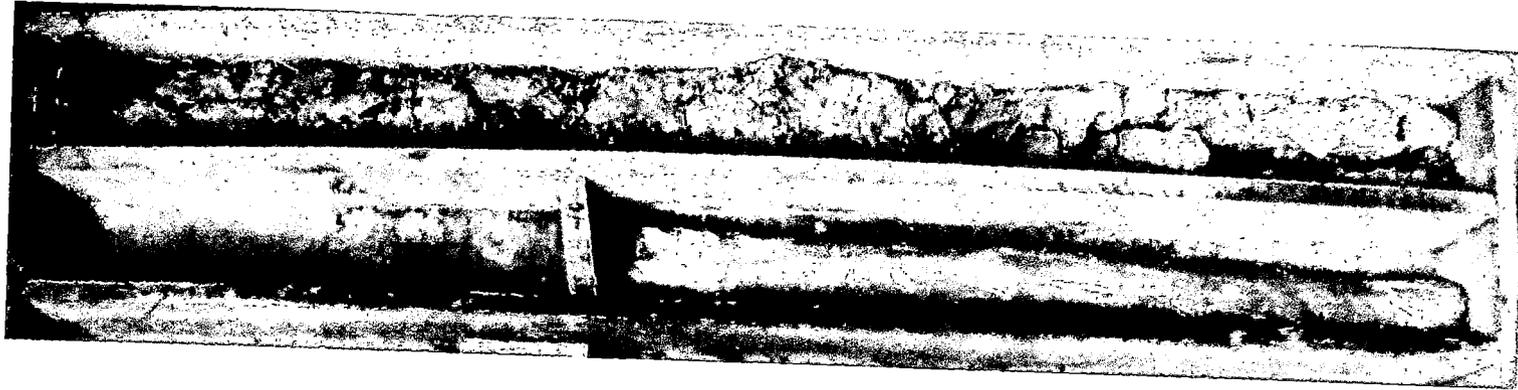
DE 12.00 A 16.00 m DE PROFUNDIDAD



DE 16.00 A 20.00 m DE PROFUNDIDAD



DE 20.00 A 24.00 m DE PROFUNDIDAD

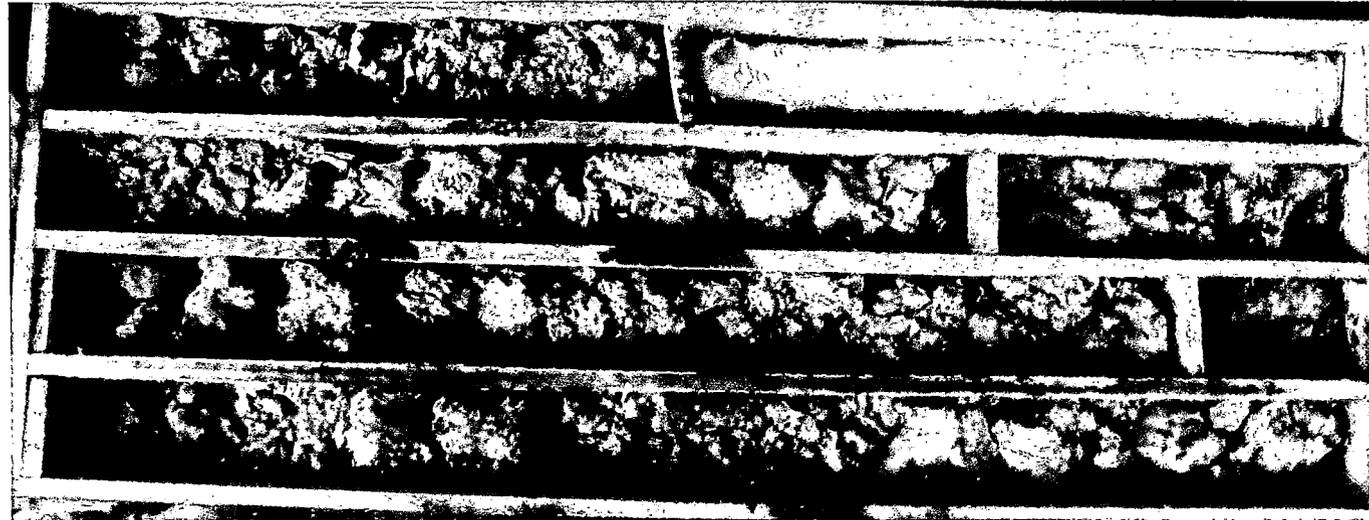


DE 24.00 A 25.45 m DE PROFUNDIDAD

PERFORACIÓN DIAMANTINA N° 2



DE 0.00 A 4.00 m DE PROFUNDIDAD



DE 4.00 A 7.00 m DE PROFUNDIDAD



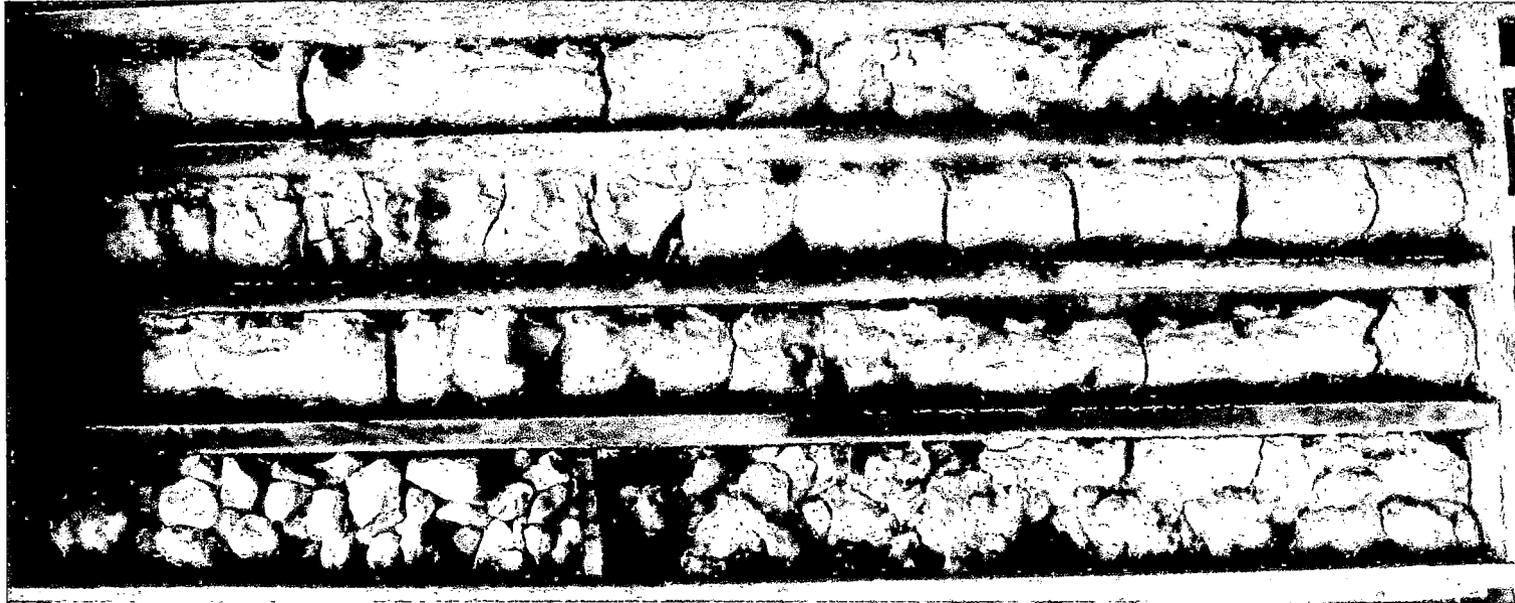
DE 7.00 A 10.50 m DE PROFUNDIDAD



DE 10.50 A 13.50 m DE PROFUNDIDAD



DE 13.50 A 16.65 m DE PROFUNDIDAD



DE 16.15 A 19.30 m DE PROFUNDIDAD



DE 19.50 A 20.00 m DE PROFUNDIDAD

PERFORACIÓN DIAMANTINA N° 3



DE 0.00 A 4.00 m DE PROFUNDIDAD



DE 4.00 A 8.00 m DE PROFUNDIDAD



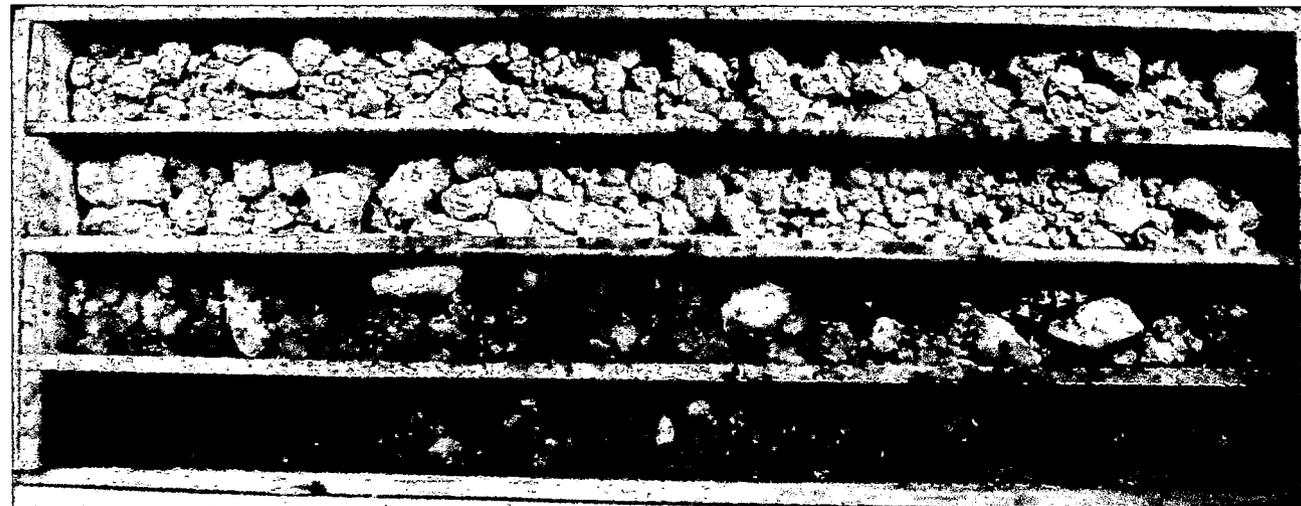
DE 8.00 A 12.00 m DE PROFUNDIDAD



DE 12.00 A 18.00 m DE PROFUNDIDAD
PERFORACIÓN DIAMANTINA N° 4



DE 0.00 A 4.00 m DE PROFUNDIDAD



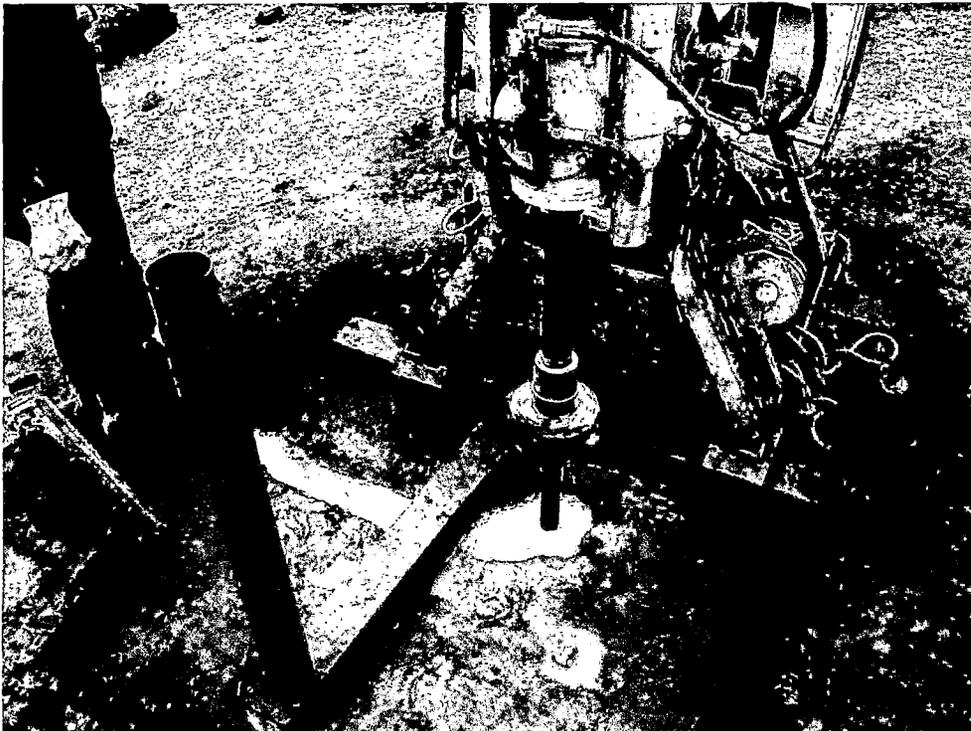
DE 4.00 A 8.00 m DE PROFUNDIDAD



DE 8.00 A 12.00 m DE PROFUNDIDAD



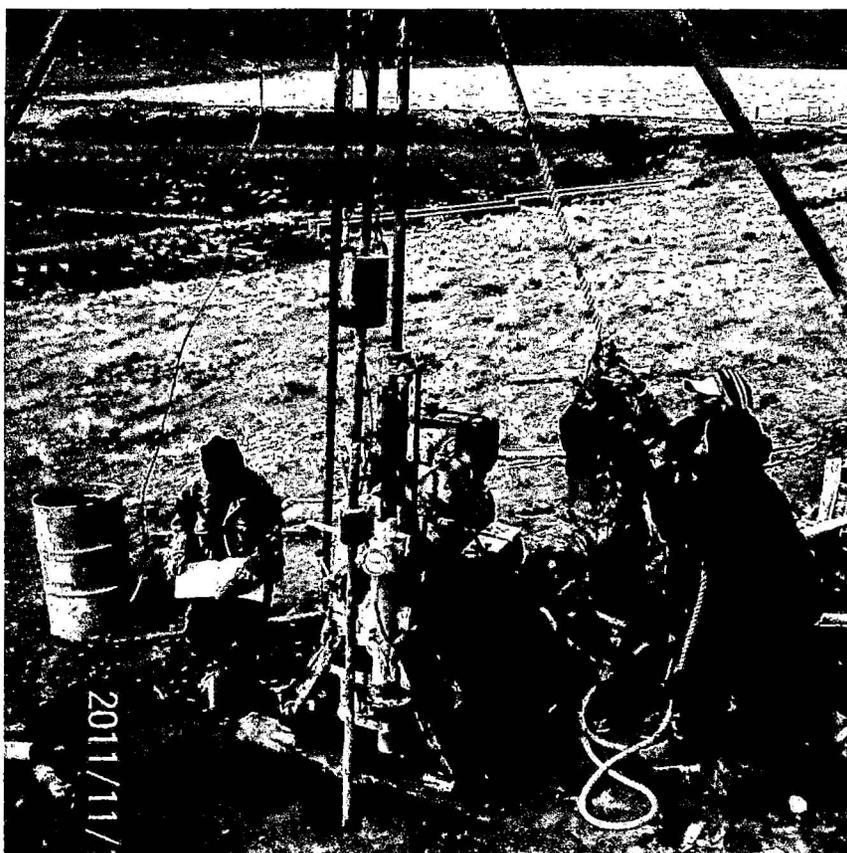
INSTALACIÓN DE LA MÁQUINA PERFORADORA DIAMANTINA



PROCESO DE PERFORACIÓN



PERFORACIÓN DIAMANTINA NÚMERO DOS



ENSAYO DE PENETRACIÓN ESTANDAR