



UNIVERSIDAD PERUANA DE CIENCIAS APLICADAS

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA ACADÉMICO DE INGENIERÍA CIVIL

**Análisis de control de infiltraciones en la fundación de la presa coltani-
tacna aplicando la técnica de pilotes secantes**

TESIS

Para optar el título profesional de Ingeniero Civil

AUTOR(ES)

Jayo Vidal, Piero (0000-0003-3963-1857)

Vélez Machado, Julio César Santiago (0000-0000-3816-3270)

ASESOR

Cárdenas Guillen, Jorge Luis ([0000-0002-8112-5168](https://orcid.org/0000-0002-8112-5168))

Lima, 23 de Noviembre del 2021

DEDICATORIA

Dedicado a nuestras familias cuyo apoyo incondicional nos permitió culminar con éxito todos nuestros objetivos propuestos. Y a nuestros amigos por su constante apoyo y confianza depositada en nosotros.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Dios por brindarnos bienestar y fuerza en todo momento, especialmente en esta época de pandemia. A nuestras familias por permitirnos realizar y culminar con éxito nuestra carrera profesional. A nuestros amigos por el constante apoyo y confianza en nosotros. A nuestro asesor por compartir sus conocimientos y experiencia, guiándonos a lo largo del desarrollo de esta investigación. Y especialmente al Ing. Vélez Bardales por brindarnos el expediente técnico completo de la presa Coltani cuya información fue de gran valor para la elaboración de esta tesis.

RESUMEN

Este documento tiene como objetivo brindar propuestas de mejoramiento para evitar las infiltraciones en la presa Coltani - Tacna realizando un análisis del expediente técnico de la obra, la cual está actualmente paralizada. Estas serán realizadas por medio de la implementación de un muro impermeable conformado por Pilotes Secantes la cual es una técnica utilizada en presas de tierra para afrontar esta clase de problemas de ingeniería civil.

La investigación estará dividida en secciones estratégicas para el entendimiento global, manteniendo un orden de la información. Primero, se definirán conceptos generales como los tipos de presas de tierra, sus elementos principales, requerimientos técnicos, principales fallas, técnicas de mejoramiento de suelos, infiltraciones, entre otros. Posteriormente se detallarán las características generales y específicas, tanto geológicas como geotécnicas del terreno del proyecto, recopilando la información necesaria del estudio de suelos. Luego se procederá a realizar un análisis de infiltración, mediante el uso del programa SLIDE, analizando el comportamiento del flujo del agua y caudales respuesta de la presa en su condición inicial, es decir sin la implementación del muro pantalla. Una vez analizado este comportamiento, se procederá a obtener el Caudal de Infiltración Máximo Permisible, cuyo valor servirá de base para las diferentes propuestas a considerar. Las variaciones de las alternativas para el control de infiltraciones estarán en base a dos diámetros diferentes (1.3 y 1.5m) de Pilotes Secantes con 3 posibles ubicaciones distintas, respecto a la presa (inicio, centro y final), con profundidades comprendidas entre 10 – 59m. Después se analizará el proceso constructivo de la técnica, la comparación en términos económicos respecto al costo de ejecución y se presentaran los planos y esquemas de las respectivas propuestas a considerar. Finalmente se elegirá la alternativa que presente un mayor potencial en base a la constructabilidad y costo para ser implementada como solución de la infiltración del agua en la presa Coltani.

Palabras clave: [análisis; infiltración; muro impermeable; pilotes secantes; caudal]

ABSTRACT

The purpose of this document is to provide improvement proposals to avoid seepage in the Coltani - Tacna dam by analyzing the technical record of the project, which is currently paralyzed. These will be carried out through the implementation of an impermeable wall made up of Secant Piles, which is a technique used in earth dams to face this kind of civil engineering problems.

The research will be divided into strategic sections for global understanding, maintaining an order of information. First, general concepts such as the types of earth dams, their main elements, technical requirements, main faults, soil improvement techniques, seepage, among others, will be defined. Subsequently, the general and specific characteristics, both geological and geotechnical, of the project land will be detailed, compiling the necessary information from the soil study. Then, a seepage analysis will be carried out, using the SLIDE program, analyzing the behavior of the water flow and response flows of the dam in its initial condition, that is, without the implementation of the screen wall. Once this behavior has been analyzed, the Maximum Permissible Seepage Flow will be obtained, whose value will serve as the basis for the different proposals to be considered. The variations of the alternatives for seepage control will be based on two different diameters (1.3 and 1.5m) of Secant Piles with 3 different possible locations, according to the dam (start, center and end), with depths between 10 - 59m. Afterwards, the construction process of the technique will be analyzed, the comparison in economic terms by the execution cost and the plans and diagrams of the respective proposals to be considered will be presented. Finally, the alternative that presents the greatest potential based on constructability and cost will be chosen to be implemented as a solution for water seepage in the Coltani dam.

Keywords: [analysis; seepage; impermeable wall; secant piles; flow]

TABLA DE CONTENIDOS

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	REALIDAD PROBLEMÁTICA Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA ...	1
1.2	ESTADO DEL ARTE.....	2
1.3	JUSTIFICACIÓN, HIPÓTESIS, OBJETIVOS, METODOLOGÍA Y LIMITACIONES.....	4
2	CAPITULO 1: MARCO TEORICO	5
2.1	DEFINICION DE EMBALSES Y PRESAS	5
2.2	TIPOS DE PRESAS.....	8
2.3	CARACTERISTICAS DE UNA PRESA DE TIERRA	11
2.4	PRINCIPALES FALLAS EN PRESAS DE TIERRA	14
2.5	SISTEMAS DE MEJORAMIENTO DE FUNDACIÓN	17
2.5.1	Inyección de Lechada	18
2.5.2	Pantalla de Pilotes.....	20
2.5.3	Pantallas Plásticas	21
2.6	GEOTECNIA: FILTRACIONES	24
2.6.1	Flujo de agua en suelos:	25
2.6.2	Ecuaciones hidrodinámicas que rigen el flujo de agua a través de los suelos	27
2.7	PROGRAMA SLIDE	32
2.8	METODOS DE ELEMENTOS FINITOS (MEF).....	33
3	CAPITULO 2: METODOLOGIA	35
3.1	NIVEL DE INVESTIGACIÓN:.....	35
3.2	DISEÑO DE INVESTIGACIÓN:	35
3.3	PROCEDIMIENTO:.....	35
4	CAPITULO 3: ESTUDIO PRESA COLTANI	37
4.1	GENERALIDADES	37
4.2	INVESTIGACIONES GEOTÉCNICAS.....	38
4.3	ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN	57
4.3.1	Definición de Parámetros Hidráulicos - Condiciones del terreno.....	57

4.3.2	Calculo del Análisis de Infiltración - Condición Inicial	65
4.3.3	Calculo de Análisis de infiltración - Condición Muro Impermeable	69
4.3.4	Diseño de pantalla de pilotes - Diámetro, Longitud y Cantidad	79
4.3.5	Proceso Constructivo.....	111
4.3.6	Comparación de Alternativas con respecto al Costo de Ejecución.....	115
4.3.7	Diseño Global (Planos a detalle y Esquemas)	117
5	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	126
5.1	CONCLUSIONES	126
5.2	RECOMENDACIONES	128
6	REFERENCIAS	129
7	ANEXOS	136

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Causas comunes de fallas de presas (Middlebrooks, 1953).....	16
Tabla 2-2 Cuadro Comparativo de Técnicas de Mejoramiento de Suelos (Elaboración propia, 2020).....	23
Tabla 4-1 Resumen de calicatas y ensayos en el Eje de la Presa (Expediente Técnico Presa Coltani, 2013).....	40
Tabla 4-2 Resumen de calicatas y ensayos en el Vaso de la Presa (Expediente Técnico Presa Coltani, 2013).....	40
Tabla 4-3 Resumen de ensayos de Penetración Estándar (SPT) Parte 1 (Expediente Técnico Presa Coltani, 2013)	42
Tabla 4-4 Resumen de ensayos de Penetración Estándar (SPT) Parte 2 (Expediente Técnico Presa Coltani, 2013)	42
Tabla 4-5 Resumen de perforaciones (Expediente Técnico Presa Coltani, 2013)	44
Tabla 4-6 Perforación dcd-c-01 (Expediente Técnico Presa Coltani, 2013).....	44
Tabla 4-7 Perforación dcd-c-02 (Expediente Técnico Presa Coltani, 2013).....	45
Tabla 4-8 Perforación dcd-c-03 (Expediente Técnico Presa Coltani, 2013).....	45
Tabla 4-9 Perforación dcd-c-04 (Expediente Técnico Presa Coltani, 2013).....	46
Tabla 4-10 Perforación dcd-c-05 (Expediente Técnico Presa Coltani, 2013).....	46
Tabla 4-11 Perforación dcd-c-06 (Expediente Técnico Presa Coltani, 2013).....	47
Tabla 4-12 Perforación dcd-c-07 (Expediente Técnico Presa Coltani, 2013).....	47
Tabla 4-13 Perforación dcd-c-08 (Expediente Técnico Presa Coltani, 2013).....	48
Tabla 4-14 Resumen de resultados de ensayos Estándar Eje de la Presa (Expediente Técnico Presa Coltani, 2013)	50
Tabla 4-15 Resumen de resultados de ensayos Estándar Vaso de la Presa (Expediente Técnico Presa Coltani, 2013).....	50
Tabla 4-16 Resumen de ensayos de densidad in-situ (Expediente Técnico Presa Coltani, 2013).....	51
Tabla 4-17 Resumen de resultados de ensayos de peso unitario en suelos cohesivos - eje presa (Expediente Técnico Presa Coltani, 2013).....	52
Tabla 4-18 Resumen de resultados de ensayos de compresión simple en roca - eje presa (Expediente Técnico Presa Coltani, 2013)	52
Tabla 4-19 Clases de permeabilidad de los suelos para obras de ingeniería civil (FAO, 2020)	57

Tabla 4-20 Resultados de Permeabilidad - Sondaje dcd-c-01 (Expediente Técnico Presa Coltani, 2013).....	58
Tabla 4-21 Resultados de Permeabilidad - Sondaje dcd-c-02 (Expediente Técnico Presa Coltani, 2013).....	59
Tabla 4-22 Resultados de Permeabilidad – Sondaje dcd-c-03 (Expediente Técnico Presa Coltani, 2013).....	59
Tabla 4-23 Resultados de Permeabilidad - Sondaje dcd-c-04 (Expediente Técnico Presa Coltani, 2013).....	60
Tabla 4-24 Resultados de Permeabilidad - Sondaje dcd-c-05 (Expediente Técnico Presa Coltani, 2013).....	61
Tabla 4-25 Resultados de Permeabilidad - Sondaje dcd-c-07 (Expediente Técnico Presa Coltani, 2013).....	61
Tabla 4-26 Resultados de Permeabilidad - Sondaje dcd-c-08 (Expediente Técnico Presa Coltani, 2013).....	62
Tabla 4-27 Resultados de permeabilidad en calicatas del Eje y Vaso (Expediente Técnico Presa Coltani, 2013)	63
Tabla 4-28 Tabla de datos de Conductividad Hidráulica (K) a utilizar en los análisis (Elaboración propia, 2020).....	64
Tabla 4-29 Tabla con Valores de Ks Promediados (Elaboración propia, 2020).....	66
Tabla 4-30 Tabla con Valores de Ks (Mayores) (Elaboración propia, 2020)	67
Tabla 4-31 Tabla con Valores de Ks (Menores) (Elaboración propia, 2020)	68
Tabla 4-32 Mohr-Coulomb parameters for modelling of concrete structures According to P. Jiménez Montoya (Plaxis,2016)	70
Tabla 4-33 Caudal Respuesta Muro Inicio de la presa con h= 10 m y 1.5m de diámetro (1er Análisis) (Elaboración propia, 2020)	71
Tabla 4-34 Caudal Respuesta Muro Inicio de la presa con h= 20 m y 1.5m de diámetro (1er Análisis) (Elaboración propia, 2020)	72
Tabla 4-35 Caudal Respuesta Muro Inicio de la presa con h= 30 m y 1.5m de diámetro (1er Análisis) (Elaboración propia, 2020)	72
Tabla 4-36 Caudal Respuesta Muro Centro de la presa con h= 10 m y 1.5m de diámetro (1er Análisis) (Elaboración propia, 2020)	73
Tabla 4-37 Caudal Respuesta Muro Centro de la presa con h= 20 m y 1.5m de diámetro (1er Análisis) (Elaboración propia, 2020)	74

Tabla 4-38 Caudal Respuesta Muro Centro de la presa con h= 30 m y 1.5m de diámetro (1er Análisis) (Elaboración propia, 2020)	75
Tabla 4-39 Caudal Respuesta Muro Final de la presa con h= 10 m y 1.5m de diámetro (1er Análisis) (Elaboración propia, 2020)	76
Tabla 4-40 Caudal Respuesta Muro Final de la presa con h= 20 m y 1.5m de diámetro (1er Análisis) (Elaboración propia, 2020)	77
Tabla 4-41 Caudal Respuesta Muro Final de la presa con h= 30 m y 1.5m de diámetro (1er Análisis) (Elaboración propia, 2020)	78
Tabla 4-42 Resumen Comparación de caudal respuesta a diferentes posiciones y profundidad (1er Análisis) (Elaboración propia, 2020)	79
Tabla 4-43 Caudal Respuesta Muro Inicio de la presa con h= 59m y 1.3m de diámetro (2do Análisis) (Elaboración propia, 2020)	81
Tabla 4-44 Caudal Respuesta Muro Centro de la presa con h= 59m y 1.3m de diámetro (2do Análisis) (Elaboración propia, 2020)	82
Tabla 4-45 Caudal Respuesta Muro Final de la presa con h= 59m y 1.3m de diámetro (2do Análisis) (Elaboración propia, 2020)	83
Tabla 4-46 Caudal Respuesta Muro Inicio de la presa con h= 59m y 1.5m de diámetro (2do Análisis) (Elaboración propia, 2020)	84
Tabla 4-47 Caudal Respuesta Muro Centro de la presa con h= 59m y 1.5m de diámetro (2do Análisis) (Elaboración propia, 2020)	85
Tabla 4-48 Caudal Respuesta Muro Final de la presa con h= 59m y 1.5m de diámetro (2do Análisis) (Elaboración propia, 2020)	86
Tabla 4-49 Resumen Comparación de caudal respuesta a diferentes posiciones y profundidad a 59m (2do Análisis) (Elaboración propia, 2020)	87
Tabla 4-50 Caudal Respuesta Muro Inicio de la presa con h= 25m y 1.3m de diámetro (3er Análisis) (Elaboración propia, 2020)	88
Tabla 4-51 Caudal Respuesta Muro Inicio de la presa con h= 30m y 1.3m de diámetro (3er Análisis) (Elaboración propia, 2020)	89
Tabla 4-52 Caudal Respuesta Muro Inicio de la presa con h= 35m y 1.3m de diámetro (3er Análisis) (Elaboración propia, 2020)	90
Tabla 4-53 Caudal Respuesta Muro Centro de la presa con h= 25m y 1.3m de diámetro (3er Análisis) (Elaboración propia, 2020)	91

Tabla 4-54 Caudal Respuesta Muro Centro de la presa con h= 30m y 1.3m de diámetro (3er Análisis) (Elaboración propia, 2020)	92
Tabla 4-55 Caudal Respuesta Muro Centro de la presa con h= 35m y 1.3m de diámetro (3er Análisis) (Elaboración propia, 2020)	93
Tabla 4-56 Caudal Respuesta Muro Final de la presa con h= 25m y 1.3m de diámetro (3er Análisis) (Elaboración propia, 2020)	94
Tabla 4-57 Caudal Respuesta Muro Final de la presa con h= 30m y 1.3m de diámetro (3er Análisis) (Elaboración propia, 2020)	95
Tabla 4-58 Caudal Respuesta Muro Final de la presa con h= 35m y 1.3m de diámetro (3er Análisis) (Elaboración propia, 2020)	96
Tabla 4-59 Caudal Respuesta Muro Inicio de la presa con h= 25m y 1.5m de diámetro (3er Análisis) (Elaboración propia, 2020)	97
Tabla 4-60 Caudal Respuesta Muro Inicio de la presa con h= 30m y 1.5m de diámetro (3er Análisis) (Elaboración propia, 2020)	98
Tabla 4-61 Caudal Respuesta Muro Inicio de la presa con h= 35m y 1.5m de diámetro (3er Análisis) (Elaboración propia, 2020)	99
Tabla 4-62 Caudal Respuesta Muro Centro de la presa con h= 25m y 1.5m de diámetro (3er Análisis) (Elaboración propia, 2020)	100
Tabla 4-63 Caudal Respuesta Muro Centro de la presa con h= 30m y 1.5m de diámetro (3er Análisis) (Elaboración propia, 2020)	101
Tabla 4-64 Caudal Respuesta Muro Centro de la presa con h= 35m y 1.5m de diámetro (3er Análisis) (Elaboración propia, 2020)	102
Tabla 4-65 Caudal Respuesta Muro Final de la presa con h= 25m y 1.5m de diámetro (3er Análisis) (Elaboración propia, 2020)	103
Tabla 4-66 Caudal Respuesta Muro Final de la presa con h= 30m y 1.5m de diámetro (3er Análisis) (Elaboración propia, 2020)	104
Tabla 4-67 Caudal Respuesta Muro Final de la presa con h= 35m y 1.5m de diámetro (3er Análisis) (Elaboración propia, 2020)	105
Tabla 4-68 Resumen Comparación de caudal respuesta a diferentes posiciones, diámetros y profundidad (3er Análisis) (Elaboración propia, 2020).....	106
Tabla 4-69 Resumen de la cantidad de pilotes respecto a las alternativas propuestas (Elaboración propia, 2020).....	110
Tabla 4-70 Longitud Total en (m) de las 5 Alternativas (Elaboración propia, 2020)	116

Tabla 4-71. Presupuesto para cada Diámetro de Pilote (Elaboración propia, 2020).....	116
Tabla 4-72. Presupuesto Total para cada Alternativa (Elaboración propia, 2020).....	117

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Embalse en Madrid (Iagua, 2020).....	5
Figura 2-2 Presa Gallito Ciego – Perú (Gobierno del Perú, 2019).....	7
Figura 2-3 Presa de Gravedad (UPC, 2020)	9
Figura 2-4 Presa Arco (UPC, 2020)	10
Figura 2-5 Presa de Contrafuerte (UPC, 2020)	10
Figura 2-6 Presa de Materiales Suelos (UPC, 2020).....	11
Figura 2-7 Partes de una presa de tierra (Ing. Washington Sandoval, 2016)	13
Figura 2-8 Partes de una Presa de tierra (Jaime Suarez Díaz, 2016).....	13
Figura 2-9 Partes de una Presa de tierra (Jaime Suarez Díaz, 2016).....	14
Figura 2-10 Tipos de fallas en presas de tierra (Jaime Suarez Díaz, 2016)	15
Figura 2-11 Frecuencia de fallas de presas a nivel internacional (Conagua, 2000)	16
Figura 2-12 Falla hidráulica (Desbordamiento) Pakistán (Jaime Suarez Díaz, 2016)	17
Figura 2-13 Falla por infiltración (Jaime Suarez Díaz, 2016).....	17
Figura 2-14 Tratamiento de inyecciones en presas de núcleo de arcilla. (Houlsby, A.C., 1990).....	18
Figura 2-15 Cortinas de inyección de relleno homogéneo. (Rico R.,2019)	19
Figura 2-16 Disposición típica de tratamiento de inyección. (USACE, 2017)	20
Figura 2-17 Imagen de los sistemas de pilotes tangentes y secantes (Víctor Yepes Pisqueras, 2015).....	21
Figura 2-18 Proceso constructivo de Pantallas Plásticas (Víctor Yepes Pisqueras, 2015)..	22
Figura 2-19 Cabeza cortadora o Hidrofresa (Víctor Yepes Pisqueras, 2015)	23
Figura 2-20 Representación del movimiento del agua subterránea (Lambe y Whitman, 1996)	25
Figura 2-21 Plano de referencia para deducir la energía total por unidad de masa (Lambe y Whitman, 1996).....	26
Figura 2-22 Esquema de Red de flujo (Geología y geotecnia, 2010).....	27
Figura 2-23 Flujo estacionario representación (Geología y geotecnia, 2010).....	28
Figura 2-24 Red de flujo (La Guía, 2012)	30
Figura 2-25 Definición de las condiciones límites Laplace (La Guía, 2012).....	30
Figura 2-26 Transformación de suelo anisotrópico a isotrópico (La Guía, 2012)	32
Figura 2-27 Elaboración de una Presa en el programa SLIDE (Elaboración Propia, 2020)33	
Figura 2-28 Método de Elementos Finitos en una Presa (Elaboración Propia, 2020)	34

Figura 4-1 Mapa de ubicación de la presa Coltani (Expediente Técnico Presa Coltani, 2013)	37
Figura 4-2 Ubicación (Expediente técnico presa Coltani, 2013)	54
Figura 4-3 Sección Geotecnia 1-1 Eje de Presa (Expediente Técnico Presa Coltani, 2013)	55
Figura 4-4 Sección Geotecnia 2-2 Eje de Presa (Expediente Técnico Presa Coltani, 2013)	56
Figura 4-5 Parámetros Geotécnicos (Expediente Técnico Presa Coltani, 2013)	65
Figura 4-6 Vectores de Circulación del Agua (Parámetros Hidráulicos Promediados) (Elaboración propia, 2020)	66
Figura 4-7 Vectores de Circulación del Agua (Parámetros Hidráulicos Mayores) (Elaboración propia, 2020)	68
Figura 4-8 Vectores de Circulación del Agua (Parámetros Hidráulicos Menores) (Elaboración propia, 2020)	69
Figura 4-9 Análisis de Infiltración Muro al Inicio de la presa con $h = 10$ m y 1.5m de diámetro (1er Análisis) (Elaboración propia, 2020)	70
Figura 4-10 Análisis de Infiltración Muro al Inicio de la presa con $h = 20$ m y 1.5m de diámetro (1er Análisis) (Elaboración propia, 2020)	71
Figura 4-11 Análisis de Infiltración Muro al Inicio de la presa con $h = 30$ m y 1.5m de diámetro (1er Análisis) (Elaboración propia, 2020)	72
Figura 4-12 Análisis de Infiltración Muro al Centro de la presa con $h = 10$ m y 1.5m de diámetro (1er Análisis) (Elaboración propia, 2020)	73
Figura 4-13 Análisis de Infiltración Muro al Centro de la presa con $h = 20$ m y 1.5m de diámetro (1er Análisis) (Elaboración propia, 2020)	74
Figura 4-14 Análisis de Infiltración Muro al Centro de la presa con $h = 30$ m y 1.5m de diámetro (1er Análisis) (Elaboración propia, 2020)	75
Figura 4-15 Análisis de Infiltración Muro al Final de la presa con $h = 10$ m y 1.5m de diámetro (1er Análisis) (Elaboración propia, 2020)	76
Figura 4-16 Análisis de Infiltración Muro al Final de la presa con $h = 20$ m y 1.5m de diámetro (1er Análisis) (Elaboración propia, 2020)	77
Figura 4-17 Análisis de Infiltración Muro al Final de la presa con $h = 30$ m y 1.5m de diámetro (1er Análisis) (Elaboración propia, 2020)	78

Figura 4-18 Análisis de Infiltración Muro al Inicio de la presa con $h = 59\text{m}$ y 1.3m de diámetro (2do Análisis) (Elaboración propia, 2020).....	81
Figura 4-19 Análisis de Infiltración Muro al Centro de la presa con $h = 59\text{m}$ y 1.3m de diámetro (2do Análisis) (Elaboración propia, 2020).....	82
Figura 4-20 Análisis de Infiltración Muro al Final de la presa con $h = 59\text{m}$ y 1.3m de diámetro (2do Análisis) (Elaboración propia, 2020).....	83
Figura 4-21 Análisis de Infiltración Muro al Inicio de la presa con $h = 59\text{m}$ y 1.5m de diámetro (2do Análisis) (Elaboración propia, 2020).....	84
Figura 4-22 Análisis de Infiltración Muro al Centro de la presa con $h = 59\text{m}$ y 1.5m de diámetro (2do Análisis) (Elaboración propia, 2020).....	85
Figura 4-23 Análisis de Infiltración Muro al Final de la presa con $h = 59\text{m}$ y 1.5m de diámetro (2do Análisis) (Elaboración propia, 2020).....	86
Figura 4-24 Análisis de Infiltración Muro al Inicio de la presa con $h = 25\text{m}$ y 1.3m de diámetro (3er Análisis) (Elaboración propia, 2020).....	88
Figura 4-25 Análisis de Infiltración Muro al Inicio de la presa con $h = 30\text{m}$ y 1.3m de diámetro (3er Análisis) (Elaboración propia, 2020).....	89
Figura 4-26 Análisis de Infiltración Muro al Inicio de la presa con $h = 35\text{m}$ y 1.3m de diámetro (3er Análisis) (Elaboración propia, 2020).....	90
Figura 4-27 Análisis de Infiltración Muro al Centro de la presa con $h = 25\text{m}$ y 1.3m de diámetro (3er Análisis) (Elaboración propia, 2020).....	91
Figura 4-28 Análisis de Infiltración Muro al Centro de la presa con $h = 30\text{m}$ y 1.3m de diámetro (3er Análisis) (Elaboración propia, 2020).....	92
Figura 4-29 Análisis de Infiltración Muro al Centro de la presa con $h = 35\text{m}$ y 1.3m de diámetro (3er Análisis) (Elaboración propia, 2020).....	93
Figura 4-30 Análisis de Infiltración Muro al Final de la presa con $h = 25\text{m}$ y 1.3m de diámetro (3er Análisis) (Elaboración propia, 2020).....	94
Figura 4-31 Análisis de Infiltración Muro al Final de la presa con $h = 30\text{m}$ y 1.3m de diámetro (3er Análisis) (Elaboración propia, 2020).....	95
Figura 4-32 Análisis de Infiltración Muro al Final de la presa con $h = 35\text{m}$ y 1.3m de diámetro (3er Análisis) (Elaboración propia, 2020).....	96
Figura 4-33 Análisis de Infiltración Muro al Inicio de la presa con $h = 25\text{m}$ y 1.5m de diámetro (3er Análisis) (Elaboración propia, 2020).....	97

Figura 4-34 Análisis de Infiltración Muro al Inicio de la presa con h =30m y 1.5m de diámetro (3er Análisis) (Elaboración propia, 2020).....	98
Figura 4-35 Análisis de Infiltración Muro al Inicio de la presa con h =35m y 1.5m de diámetro (3er Análisis) (Elaboración propia, 2020).....	99
Figura 4-36 Análisis de Infiltración Muro al Centro de la presa con h =25m y 1.5m de diámetro (3er Análisis) (Elaboración propia, 2020).....	100
Figura 4-37 Análisis de Infiltración Muro al Centro de la presa con h =30m y 1.5m de diámetro (3er Análisis) (Elaboración propia, 2020).....	101
Figura 4-38 Análisis de Infiltración Muro al Centro de la presa con h =35m y 1.5m de diámetro (3er Análisis) (Elaboración propia, 2020).....	102
Figura 4-39 Análisis de Infiltración Muro al Final de la presa con h =25m y 1.5m de diámetro (3er Análisis) (Elaboración propia, 2020).....	103
Figura 4-40 Análisis de Infiltración Muro al Final de la presa con h =30m y 1.5m de diámetro (3er Análisis) (Elaboración propia, 2020).....	104
Figura 4-41 Análisis de Infiltración Muro al Final de la presa con h =35m y 1.5m de diámetro (3er Análisis) (Elaboración propia, 2020).....	105
Figura 4-42 Diseño de la Presa Coltani – Planta (Expediente Técnico Presa Coltani, 2013)	107
Figura 4-43 Secant Wall (Cutoffs for dam murs parafoilles, 2018).....	108
Figura 4-44 Esquema de Distribución de Pilotes Secantes (Elaboración propia, 2020) ...	110
Figura 4-45 SR150C Perforadora Giratoria (SANY, 2020).....	111
Figura 4-46 Pilotes Primarios y Secundarios (Geofortis, s/f).....	112
Figura 4-47 Perforación y Excavación (Pilotes Keller, s/f).....	112
Figura 4-48 Colocación de Armadura en Pilotes Primarios.....	112
Figura 4-49 Habilidad y Colocación de Armadura (Pilotes Keller, s/f).....	113
Figura 4-50 Proceso de uso de la tubería Tremie (Fultum, 2020).....	113
Figura 4-51 Pilotes con Entubación (Pilotes Keller, s/f).....	114
Figura 4-52 Colocación del concreto a través del tubo Tremie (Pilotes Keller, s/f).....	114
Figura 4-53 Descripción del Proceso (Pilotes Keller, s/f).....	115
Figura 4-54 Plano Alternativas de ubicación de muro pantalla por medio de Pilotes Secantes (Expediente Técnico Presa Coltani, 2013).....	118
Figura 4-55 Plano en Planta de los Pilotes Secantes (Elaboración propia, 2020).....	119
Figura 4-56 Esquema Perfil de los Pilotes Secantes (Elaboración propia, 2020).....	120

Figura 4-57 Esquema: Perfil de alternativas de Muros Pantalla conformado por Pilotes Secantes (Elaboración propia, 2020).....	121
Figura 4-58 Plano: Cortes para Vista Transversal de alternativas del Muro Pantalla (Elaboración propia, 2020).....	122
Figura 4-59 Esquema Transversal de muro conformado por Pilotes Secantes (Elaboración propia, 2020).....	123
Figura 4-60 Esquema Sección Transversal Corte 1 -1: Alternativa 1 (Elaboración propia, 2020).....	123
Figura 4-61 Esquema Sección Transversal Corte 2 -2: Alternativa 2 (Elaboración propia, 2020).....	124
Figura 4-62 Esquema Sección Transversal Corte 2 -2: Alternativa 4 (Elaboración propia, 2020).....	124
Figura 4-63 Esquema Sección Transversal Corte 3 -3: Alternativa 3 (Elaboración propia, 2020).....	125
Figura 4-64 Esquema Sección Transversal Corte 3 -3: Alternativa 5 (Elaboración propia, 2020).....	125
Figura 7-1 Informe de Investigaciones Geotécnicas (Expediente Técnico Presa Coltani, 2013).....	136
Figura 7-2 Expediente Técnico Geología y Geotecnia (Expediente Técnico Presa Coltani, 2013).....	136

1 INTRODUCCIÓN

1.1 REALIDAD PROBLEMÁTICA Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Actualmente el proyecto, “Construcción de un sistema de almacenamiento y regulación en el sector de la quebrada Coltani para el mejoramiento de áreas agrícolas”, referido en esta tesis como represa Coltani, se encuentra paralizada indefinidamente. Esto a causa de irregularidades ocurridas tanto en el diseño como en la construcción de la misma causando, el principal problema, infiltraciones de agua en el vaso de la presa mayores al Caudal de Infiltración Máximo Permisible (Q_{imp}). Dicha falla comprometió el proyecto ya que su reparación o corrección, dadas las circunstancias, suponen una elevación importante de costos. Esto conlleva a un sobredimensionamiento de costos en la obra, lo cual generó denuncias, arbitrajes y el paro indefinido del proyecto a pesar de tener un avance físico del 30%. (Diario Correo, 2015).

En una primera instancia se creyó que el principal fallo para el problema de la filtración de agua fue un ineficiente estudio geotécnico en la zona del proyecto, sin embargo, esto no fue así. Al revisar el expediente técnico de la obra, tomando en cuenta diversos estudios, se determinó que este problema se debió principalmente a una no adecuada interpretación de los estudios de suelos del lugar. Conforme al expediente técnico se recomendó excavar a una mayor profundidad para alcanzar el material impermeable del suelo, sin embargo, el tipo de suelo de la zona (roca volcánica dacita fragmenta o fracturada en su mayoría) no era el adecuado, ni a grandes profundidades. Las características geotécnicas de la zona no permitirán un eficiente rendimiento si no se consideran técnicas de mejoramiento de suelos, los cuales son muy recurrentes en la actualidad para diversos tipos de proyectos de ingeniería civil.

Teniendo en cuenta la realidad problemática de la presa Coltani en la actualidad, la formulación del problema que se llevará a cabo en esta investigación será la siguiente:

¿Cuál es la metodología para definir el mejoramiento de la fundación de la presa Coltani?

1.2 ESTADO DEL ARTE

El presente trabajo de investigación se está llevando a cabo con la intención de controlar las infiltraciones en fundación de la presa de tierra Coltani ubicada en Tacna, Perú. Para ello se realizó la identificación del problema y sus posibles causas. A continuación, se presenta la descripción de los artículos científicos primordiales para el trabajo de investigación, los cuales brindan un mejor entendimiento del tema.

Los autores en esta investigación tienen como objetivo determinar la magnitud del impacto que tiene el uso de la cortina de lechada para mejorar las propiedades de la presa de tierra. Esto podemos apreciarlo de una mejor manera en la conclusión del estudio. De acuerdo con los resultados de los piezómetros y pozos de observación, se puede decir que la implementación de grandes partes de la cortina de lechada tendría un impacto insignificante a comparación de un mejor diseño intelectual y el uso de la capacidad de impermeabilidad de LBR capa. El volumen de operaciones de lechada y perforación puede ser potencialmente para reducir filtraciones de agua, pero mayormente este problema es evitado por un buen diseño de presa. (Aghda, GanjaliPour, & Esmaeilzadeh, 2019)

En este artículo, los autores realizaron un estudio de comparación entre 2 diferentes alternativas con respecto al diseño de presas, la cual, la primera alternativa es con un núcleo arcilloso mientras que el otro es la elaboración de un diafragma realizando un sistema de “muro de zanja” compuesta por pilotes secantes. Además, mostrará la elaboración del hormigón compuesto de arcilla con cemento para llenar los pilotes secantes mediante todas las pruebas realizadas con las diferentes composiciones. Finalmente, presentan el tipo de maquinarias el cual fueron utilizadas para la ejecución del proyecto de la presa, las características globales de las perforaciones que se realizaron y el proceso de lechada, así como la tecnología que emplearon como parte del desarrollo, el cual jugaran un papel muy importante en cuanto a tiempo de ejecución del muro de zanja. (Kudrin et al., 20)

Los autores en esta investigación se centran en el uso de columnas de suelos lateríticos compactados al ser una solución interesante para la mejora de suelos tropicales plegables. Esta es más simple y requiere menos tiempo para el tratamiento. Esto podemos apreciarlo en las conclusiones del estudio. El uso de suelos lateríticos compactados como geo material es una alternativa a los métodos actuales de mejora. La nueva idea es utilizar columnas de suelo lateríticas compactadas como tratamiento para suelos colapsables, permitiendo el uso de cimientos poco profundos en estos suelos problemáticos. El método es económicamente

atractivo y fácil de usar, realizar y requiere de un equipo relativamente simple. Además, el suelo local se puede utilizar como material de relleno. (de Freitas, Tsuha, & Vilar, 2017)

En este artículo, los investigadores dan a conocer la experiencia que tuvieron en las etapas de diseño y posteriormente a la construcción de la presa de tierra ubicado en el Bajo Bureya utilizando un diafragma de “muro de zanja”. Inicialmente, se tuvo un primer diseño el cual estaba conformado por un núcleo. Asimismo, mediante el transcurso de la construcción de la presa, se realizó una revisión al proyecto, originando un nuevo diseño de la presa de tierra mediante una barrera de filtración comprendida por pilotes secantes los cuales serán desarrollados por algunas empresas encargadas de su ejecución. Finalmente, desarrollan, de las 2 etapas de ejecución, una serie de comentarios en relación a su experiencia que obtienen al haber realizado esta construcción, brindando datos importantes para los futuros proyectos que comprendan la utilización de este método. (Borzunov et al., 2019)

Además, los artículos seleccionados se dividieron en cuatro grupos. El primer grupo está enfocado en las diversas técnicas de mejoramiento de la fundación de las presas de tierra argumentado con ensayos mecánicos y estudios teóricos (lechada, chimeneas, muros de corte, tuberías, inyecciones de base cortada, dedos de pie, nanos compuestos, inyección de concreto, cementicia y GIN) (“Shakouri & Mohammadi, 2020”, “Neeve & Brown, 2018”, “Calamak, Yilmaz, & Yanmaz, 2018”, “Giacconi, L. & Flores, R. & Giacconi M., 2012”, “Sainov, 2020” y “Kurt & Akbulut, 2017”). El segundo grupo está enfocado en las nuevas formas de investigación de la fundación de las presas de tierra, brindando opciones alternas a la invasión de la presa para su estudio (monitoreo de calidad de compactación basado en tecnología de compensación de posicionamiento y ondas de corte del modo polarizado horizontalmente (“Ratiat, Khettal, & Meddi, 2020”, “Zhong, Li, Cui, Wu, & Liu, 2018” y “Woolery, 2018”). El tercer grupo de los artículos seleccionados son los antecedentes de problemas de fundación en presas donde podemos apreciar las diferentes soluciones y alternativas a llevar a cabo ante diferentes problemáticas en presas y zonas similar a nuestro estudio (Presa Mosul y Presa Logan Martin) (“Sissakian, Adamo, & Al-Ansari, 2020” y “Sprayberry, Williams, Espinal-Todd, & Holland, 2012”). Finalmente, el último grupo se basa en los diferentes manuales de diseño de presas de tierra brindando una visión más amplia de nuestro tema de estudio y los parámetros a considerar al momento del diseño y construcción de la misma (“Suárez, 2016” y “Bureau of Reclamation, 2007”)

1.3 JUSTIFICACIÓN, HIPÓTESIS, OBJETIVOS, METODOLOGÍA Y LIMITACIONES

Hipótesis

- La técnica adecuada para controlar infiltraciones mayores al Q_{fmp} en la fundación de la presa Coltani es la implementación de una pantalla impermeable conformado por pilotes secantes.

Objetivo General

- Establecer la solución, en base a la técnica de pilotes secantes, para controlar la infiltración en la presa Coltani.

Objetivos Específicos

- Interpretar las investigaciones geotécnicas en la presa Coltani.
- Modelar la presa Coltani en base a las investigaciones geotécnicas
- Realizar el análisis de infiltración de la presa Coltani para la condición inicial y la condición muro impermeable
- Determinar la cantidad de pilotes a utilizar, en la presa Coltani, respecto a los diferentes diámetros considerados y ubicación

Limitaciones

El tema de investigación a realizar se basará en estudios previos de la presa Coltani. Se discutirán los datos obtenidos y se recopilara información de las nuevas técnicas de mejoramiento de fundación en presas de tierra. Es por ello que contamos con las siguientes limitaciones:

- No se desarrollará análisis tridimensional
- El estudio se enfocará únicamente en presas de tierra
- No se desarrollará el diseño estructural de los pilotes secantes

2 CAPITULO 1: MARCO TEORICO

2.1 DEFINICION DE EMBALSES Y PRESAS

Embalses

Los embalses son volúmenes de agua retenidos en un vaso topográfico natural o artificial gracias a la realización de obras hidráulicas. Lo habitual es que se cierre la boca de un valle a través de una presa o de un dique, almacenando el agua de un río o de un arroyo. El agua retenida podrá ser usada para abastecer poblaciones cercanas, producir energía eléctrica o regar terrenos (áreas de cultivo).

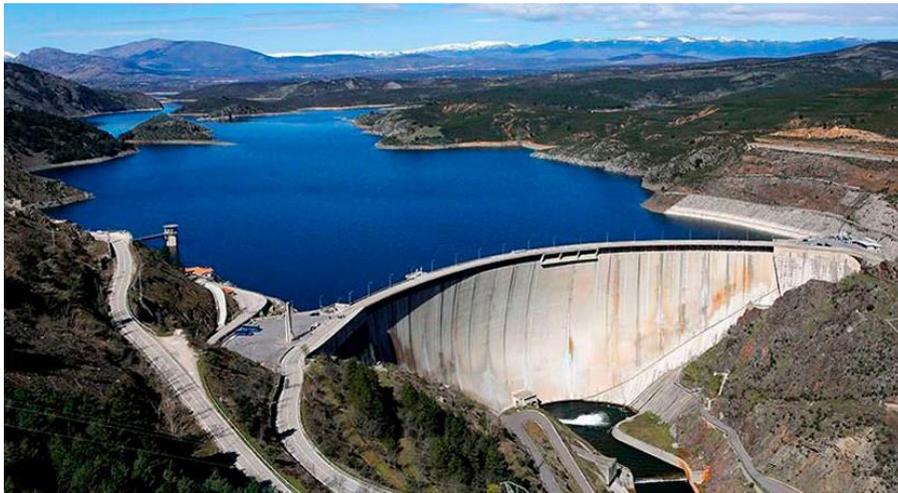


Figura 2-1 Embalse en Madrid (iagua, 2020)

Para la evaluación de embalses, hay que tener en cuenta dos parámetros. Respecto a la hidrología, estos brindan datos exactos de las ofertas de agua diaria, mensual y anual y datos de las avenidas máximas para diferentes periodos de retorno entre 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500 y 1000 años. Por otro lado, tenemos la geología y la geotecnia la cual nos brinda la información del tipo y calidad de la roca y suelo, lo que será de utilidad para el diseño de la presa y de cada una de las obras conexas. Esto determinara si efectivamente se puede construir una estructura segura en el emplazamiento elegido.

Los embalses también se diferencian por su función y tamaño. Esto permitiendo la regulación en su uso y diseño ya que se tomará en cuenta el objetivo del mismo. Según su función podemos encontrar los embalses de acumulación (los cuales almacenan excesos de agua en periodos de alto escurrimiento), embalses de distribución (aquellos que facilitan regularizar el funcionamiento de sistemas de suministro de agua, plantas de tratamiento o estaciones de bombeo) y pondajes (pequeños almacenamientos para suplir consumos locales o demandas pico). Respecto al tamaño, el cual está influenciado por la función que tienen,

podemos encontrar embalses gigantes (volumen $> 100\ 000\ \text{Mm}^3$), embalses muy grandes ($100\ 000\ \text{Mm}^3 > \text{volumen} > 10\ 000\ \text{Mm}^3$), embalses grandes ($10\ 000\ \text{Mm}^3 > \text{volumen} > 1000\ \text{Mm}^3$), embalses medianos ($1000\ \text{Mm}^3 > \text{volumen} > 1\ \text{Mm}^3$) y embalses pequeños o también llamados pondajes (volumen $< 1\ \text{Mm}^3$)

Estos almacenamientos de agua tienen diversas ventajas en el mejoramiento de zonas y mejora de calidad de vida. En estas podemos encontrar las siguientes: mejoramiento del suministro de agua a poblados en épocas de sequía, mantenimiento de reservas de agua para diferentes usos, aumento de las posibilidades y superficie de riegos, mejoramiento de condiciones ambientales y paisajistas, control de crecientes de los ríos y daños causados por inundaciones e incremento de las posibilidades de recreación. Sin embargo, su construcción, a pesar que sean con un fin benéfico, este puede traer diversas desventajas en las zonas en su alrededor. Entre estas podemos encontrar: pérdidas en la actividad agroindustrial por inundación en zonas con alto índice de desarrollo, cambios en la ecología de la zona, traslado de asentamientos humanos (difíciles y costosos), inestabilidad de taludes y un posible incremento de la actividad sísmica (especialmente durante el llenado de embalses muy grandes).

Con esto se puede entender que la mano humana en la naturaleza genera cambios importantes. A pesar que las actividades o proyecto a realizar sean con el objetivo de brindar mejoras y desarrollo, este siempre impactara de una u otra manera el medio ambiente. Es por ello que este debe ser tomado en cuenta en todo momento durante el desarrollo de un proyecto.

Presas

Una presa es una estructura que retiene agua provocando una gran elevación del cauce del río debido a la altura de la infraestructura. Estas tienen dos funciones principales: retener y aumentar la lámina de agua. Es por ello que deben ser impermeables (no dejar pasar el agua a través de estas) y resistentes antes los empujes que esta ejerce sobre el cuerpo de presa.

Estas pueden tener diversos usos, teniendo en cuenta el objetivo del proyecto, por lo cual puede ser clasificadas respecto a su función. Entre estas se encuentran 3 tipos de presas. Una de ellas son las presas de almacenamiento, las cuales sirven para embalsar agua en épocas de lluvia y ser utilizada en épocas de estiaje. Luego, las presas de derivación cuyo principal

objetivo es proporcionar la carga hidráulica necesaria para desviar el agua hacia túneles, canales, etc. Se utilizan para diversos proyectos como energía, uso industrial, riego, agua potable, etc. Por último, se tienen las presas reguladoras las cuales sirven para controlar el escurrimiento de las avenidas y para detener los sedimentos. Estas evitan las inundaciones y las consecuencias derivadas de este fenómeno.

De acuerdo con lo establecido en la Comisión Internacional de Presas Grandes, estas pueden clasificarse en dos categorías:

- **Presas grandes:** (Dimensiones: altura > 15 m, corona > 500 m, embalse > 1 Hm³ o Capacidad de desagüe > 2000 m³/s, también por características especiales de cimentación o diseño)
- **Presas pequeñas:** Todas las que no cumplen lo anterior



Figura 2-2 Presa Gallito Ciego – Perú (Gobierno del Perú, 2019)

Este tipo de proyecto también puede ser clasificado por material. Estos variarían dependiendo del tipo de presa que se construya y los requerimientos específicos que se necesiten. Entre estos se encuentran presas construidas con tierra (materiales compactados, no rígidos, seleccionados y con un grado de humedad óptimo además que puede ser homogéneas o zonificadas por diferentes granulometrías), enrocados (grandes diámetros) y de concreto (concreto convencional o CCR “Concreto compactado con rodillo”)

Para el diseño de la presa se deben tener en consideración diferentes requerimientos técnicos, de tal modo que estas no presenten fallas o dificultades en el futuro. La presa, la cimentación y los estribos deben ser estables para todo tipo de condiciones de carga estáticas y dinámicas.

La infiltración a través de la fundación el terraplén debe ser controlada para evitar deslizamiento, presiones de levantamiento en el pie de la presa, sifonamiento de los materiales o erosión en juntas, grietas o cavidades. Las infiltraciones no deben superiores a las permisibles para que la presa cumpla eficientemente con su propósito. La presa debe contener las obras y elementos requeridos para garantizar unas infiltraciones aceptables. El borde libre debe ser suficiente para evitar el paso de agua sobre la presa debido a cambios de caudal, ascenso de las olas, y asentamientos del terraplén. El vertedero debe tener una capacidad suficiente para manejar los caudales de excesos durante la vida de la presa.

Además, previo al diseño, las principales informaciones requeridas para su elaboración son: topografía, hidrología (características de la cuenca), geología, geotecnia, materiales disponibles, cimentación, capacidad de soporte (estabilidad general, asentamientos y filtraciones). También se debe considerar el clima y su efecto en la construcción, posibilidades de desvío del río durante la construcción, utilización planeada del proyecto, actividad sísmica y efectos ambientales. Un buen diseño y estudio eficiente de los diferentes parámetros a considerar brindaran seguridad y un buen desempeño de la presa.

2.2 TIPOS DE PRESAS

Existen numerosas tipologías de presas sin embargo se pueden clasificar en dos grandes grupos. En estos se encuentran las presas de concreto (de hormigón) y presas de materiales sueltos (más comunes por su versatilidad). La elección de tipología se verá en función de las necesidades, autorizaciones y el recurso hídrico existente, además de las necesidades para aguantar la presión hidrostática, para así adaptarla a las características orográficas de la zona. Estos parámetros también influirán en la manera de construir el proyecto.

PRESAS DE CONCRETO

Son presas relativamente esbeltas, construidas con hormigón. A su vez, estas se clasifican en tres subgrupos los cuales son presas de gravedad, presas arco y presas de contrafuertes.

Presas de Gravedad

Son estructuras de concreto maciza, el cual basa su estabilidad en su propio peso (resistencia al deslizamiento). El mecanismo resistente de este tipo de presas es llamado rozamiento del cuerpo de presa con el terreno. Para evitar el vuelco la resultante de los empujes del agua y el peso propio debe estar contenida en la base del cuerpo de la presa. Retienen el agua gracias al tipo de materiales empleados, como mampostería u hormigones. Este es armado únicamente en los puntos concretos sometidos a fuertes tracciones, como lo son las galerías.

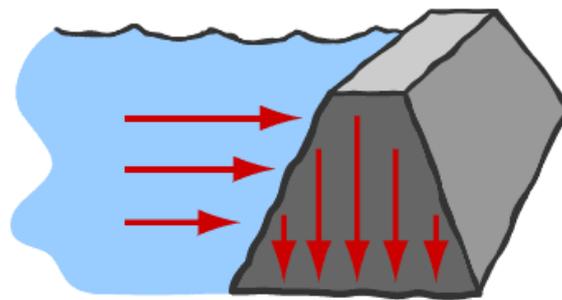


Figura 2-3 Presa de Gravedad (UPC, 2020)

Presas Arco – Arco Bóveda

Este tipo de presa generalmente se realizan para aprovechar las condiciones geográficas de la zona. Son estructuras cuyas solicitaciones o esfuerzos se disipan lateralmente hacia la fundación. Estos esfuerzos de compresión son transmitidos a los estribos de la cerrada por lo cual estos deben tener gran resistencia. Es por ello que las laderas deben ser rocosas muy resistentes y además debe encontrarse en un valle amplio pero cerrado. Además, la tipología de este tipo de presa se puede dividir en 3, las cuales son: presa arco, de doble curvatura y arco – gravedad.

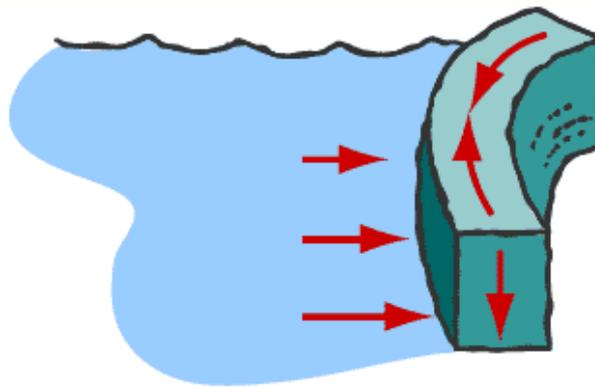


Figura 2-4 Presa Arco (UPC, 2020)

Presa de Contrafuerte

Este tipo de presa consta de una especie de pantalla y apuntalada de contrafuertes. Esta es una pared impermeable situada aguas arriba y contrafuertes resistentes para su estabilidad. Posee un mecanismo resistente similar al de las presas de gravedad con diferencia que carecen de supresión, lo cual, junto a la contribución del peso de la cuña del agua sobre la cabeza, hace que tengan mucha menos masa de hormigón. Debido a su complejidad de forma, se requieren gran cantidad de mano de obra. Es por ello que, a pesar de tener menos material, resultan más caras. Su construcción es casi nula actualmente.

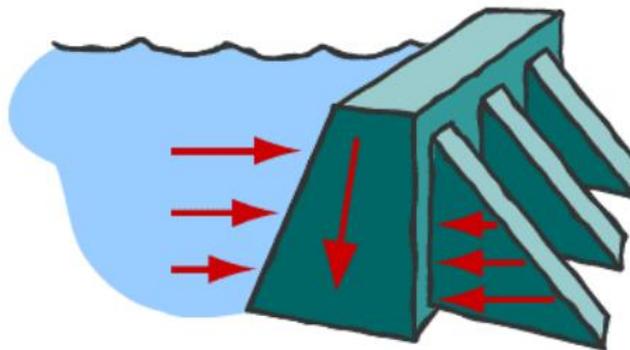


Figura 2-5 Presa de Contrafuerte (UPC, 2020)

PRESAS DE MATERIALES SUELTOS

Este tipo de presas es constituido por material colocado en capas y compactada para darle la forma deseada. Son muy versátiles ya que se construyen prácticamente con cualquier material, por lo que son las más abundantes actualmente en el mundo. Estas tienen sección trapezoidal y son menos esbeltas que las presas de concreto siendo su principal característica la zonificación de sus materiales (cada material se coloca donde mejor ejerce su función).

Estas a su vez puede ser clasificadas en 3 grandes grupos, según sea el elemento impermeable empleado, los cuales son:

- **Presas homogéneas:** Uso de material impermeable en todo el cuerpo de la presa. Empleado en alturas pequeñas y medias siendo el ancho de su base en torno a 6 y 8 veces la altura de la presa.
- **Presas de Núcleo:** Poseen un núcleo impermeable en su parte interna, cubierto por un material resistente tipo escollera. Según la forma, la presa puede subclasificarse. La morfología del núcleo puede ser delgado o grueso y puede o no tener inclinación.
- **Presas Pantalla:** Poseen una pantalla impermeable que se apoya sobre el talud de aguas arriba del cuerpo de la presa. Esta pantalla puede ser de distintos materiales entre los cuales podemos encontrar hormigón (presas grandes, medianas y pequeñas), pantalla asfáltica (presas medianas y pequeñas) y pantalla plástica (presas pequeñas). El ancho de la base suele ser el triple de la altura de la presa.

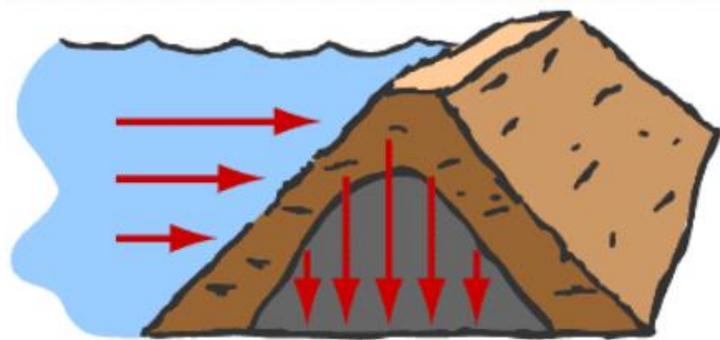


Figura 2-6 Presa de Materiales Suelos (UPC, 2020)

2.3 CARACTERÍSTICAS DE UNA PRESA DE TIERRA

Es importante definir una presa o represa que tiene como capacidad la retención de agua en grandes cantidades para luego ser distribuido a diferentes lugares. Se sabe que la utilización de estas estructuras fue desde los principios de la civilización. En el antiguo país de Ceilán, para el año 504 antes de Jesucristo, se construyó una presa de tierra de 17,7 kilómetros de largo, 21,3 metros de altura y con un volumen de terraplén, de 22,2 millones de metros cúbicos. En la actualidad, las presas de tierra cuentan con el 70% del total de presas que se construyen.

Según los autores definen una represa de tierra como la composición en su gran mayoría por materiales finos, homogéneos o zonificados. Además, indica que normalmente la

impermeabilidad es generada por la arcilla compactada y la sección transversal es definida de acuerdo a los estudios de percolación generando así taludes con inclinación como 1 Vertical: 2.2 Horizontal a 2.5 Horizontal. (Aguirre, L y Álvarez, A, 2014)

Las presas de tierra se construyen usualmente cuando se tiene un embalse pequeño. Además, generalmente son más económicas y resisten mejor los asentamientos de la cimentación. El enrocado siempre está incluido en estas, el cual también es uno de los materiales más utilizados en la construcción de presas

Los principales elementos de las presas en general son:

1. **Corona:** Parte superior de la estructura, por lo general se encuentra revestida para prevenir el secado del corazón y es impermeable.
2. **Filtros:** Provee retención y drenaje. Deben tener suficiente permeabilidad para actuar como un dren.
3. **Núcleo:** Material impermeable que puede situarse en la franja central de la presa o ligeramente inclinado con respecto a esta.
4. **Dentellón:** Parte del núcleo fundado en el estrato impermeable
5. **Embalse:** Volumen de agua que queda retenido por la presa
6. **Vaso:** Parte del valle, el cual está inundado, que contiene el agua embalsada.
7. **Borde Libre:** Distancia vertical entre la cresta de la presa y la altura máxima del agua en el vertedero para la inundación de diseño
8. **Drenes:** Sistema de captación de las aguas que atraviesan el núcleo
9. **Espaldón:** Permite la estabilidad de los taludes respectivos. Además, el espaldón aguas abajo sirve de drenaje.
10. **Berma:** Sirve para mitigar efectos de las subpresiones
11. **Estrato Permeable:** Estrato donde el material deja pasar, a través de él, una cantidad considerable de agua
12. **Estrato Impermeable:** Estrato donde el material no permite pasar, a través de él, cantidades de agua y esta es despreciable
13. **Línea de saturación:** Línea entre las regiones de líquido y líquido – vapor.

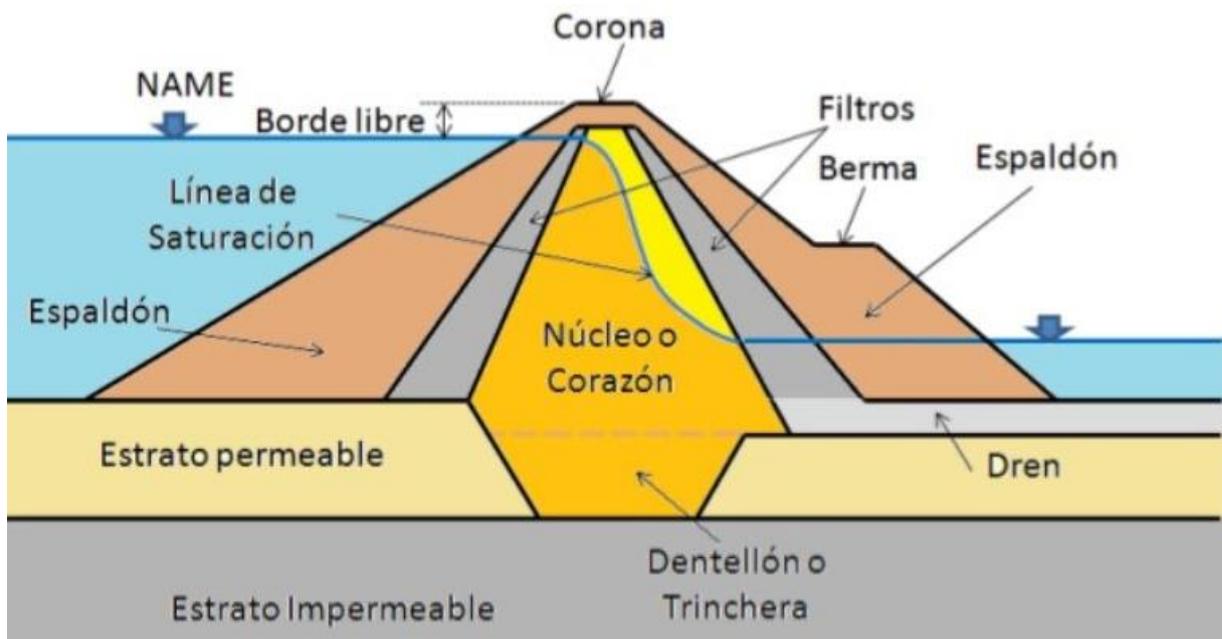


Figura 2-7 Partes de una presa de tierra (Ing. Washington Sandoval, 2016)

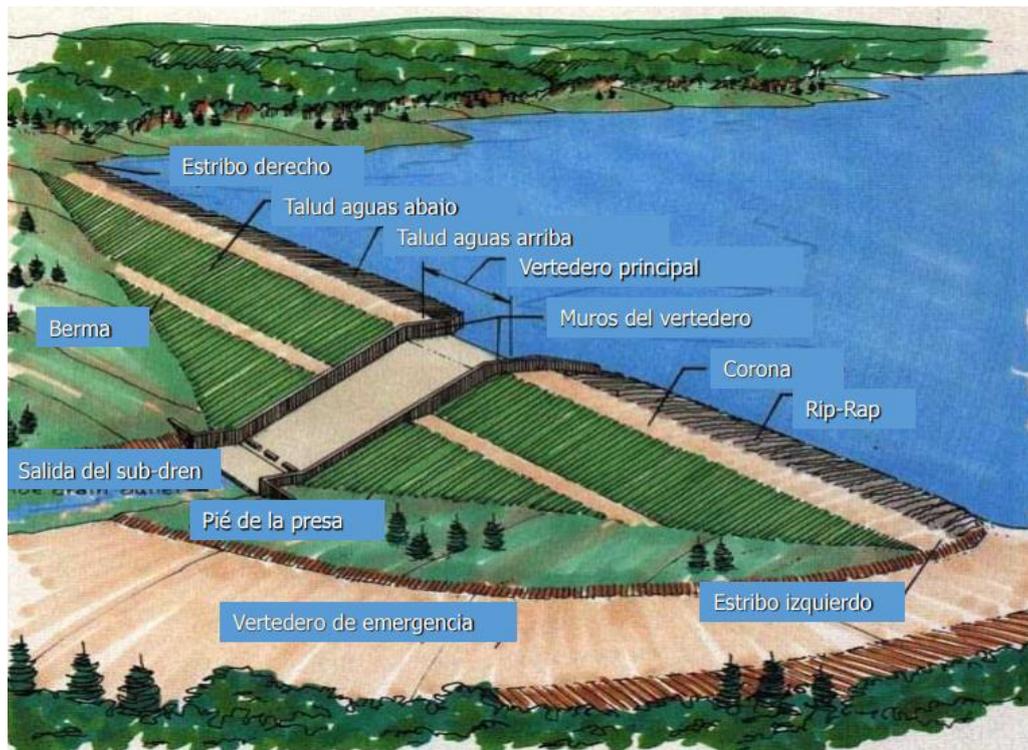


Figura 2-8 Partes de una Presa de tierra (Jaime Suarez Díaz, 2016)

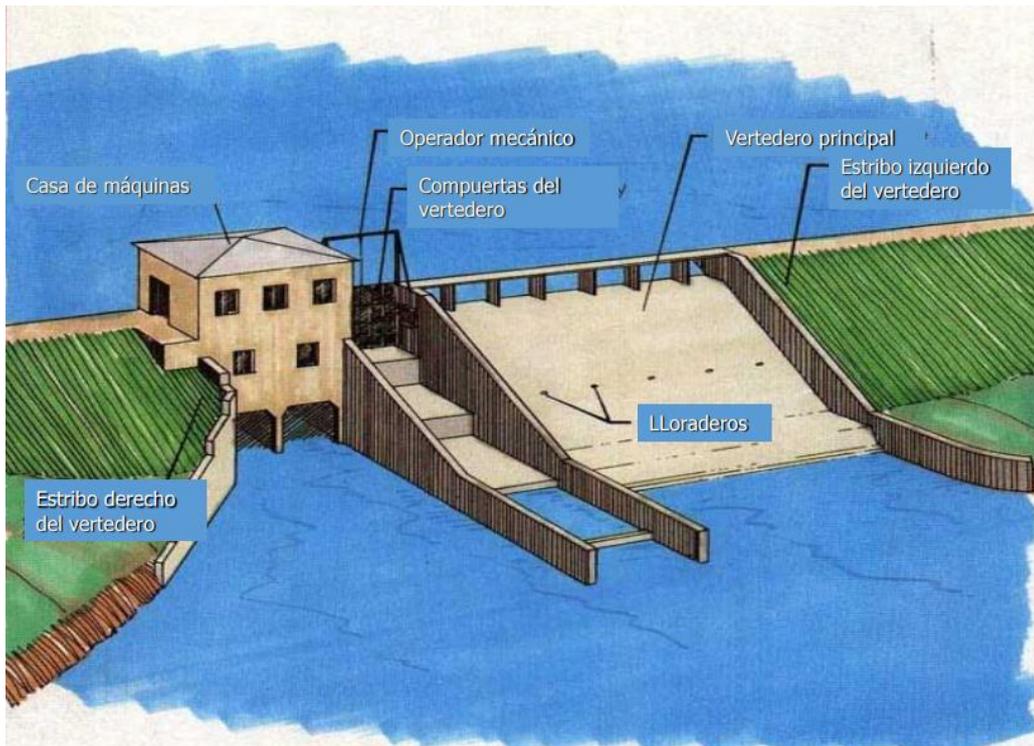


Figura 2-9 Partes de una Presa de tierra (Jaime Suarez Díaz, 2016)

2.4 PRINCIPALES FALLAS EN PRESAS DE TIERRA

En todos los casos de presas de tierra existe un riesgo potencial de incidentes o emergencias por problemas de operación, mal funcionamiento o fallas. Sin embargo, estas deben ser reducidas en su mayoría para evitar desastres ya que proyectos de esta magnitud supondrían el peligro de altas cantidades de vidas e impacto al ecosistema en donde se encuentra, aparte de la completa erradicación de la actividad de la cual el proyecto fue realizado. El FEMA (Federal Guidelines for Dam Safety) propone la siguiente clasificación respecto al nivel de riesgo:

- **Bajo potencial de riesgo:** Falla u operación inadecuada resulta en la no pérdida probable de vidas humanas y pérdidas bajas económicas o ambientales
- **Potencial significativo de riesgo:** Falla u operación inadecuada resulta en la no pérdida probable de vidas humanas, pero puede causar pérdidas económicas o ambientales o alteración de líneas vitales o impactar con otros elementos. Generalmente son localizadas en zonas rurales.

- **Alto potencial de riesgo:** Falla u operación inadecuada probablemente causa la pérdida de vidas humanas

Generalmente la ineficiente ejecución de las presas de tierra es debido a fallas en los estudios previos (hidrológicos, geológicos y geotécnicos), diseño, construcción, operación o mantenimiento. Una mala ejecución de cualquier de estas actividades generaran diversos problemas y desastres con el tiempo,

El cuidado de los estudios previos es fundamental, siendo la base de toda construcción ya que establecerá los parámetros e información necesaria para tomar decisiones y realizar un buen diseño. Los estudios hidrológicos son los encargados de determinar los caudales máximos y mínimos y la capacidad requerida para la operación del embalse y la capacidad requerida para el vertedero. La mayoría de las fallas en presas ocurren por la incapacidad del vertedero para manejar los caudales extraordinarios. Los estudios geológicos y geotécnicos requieren de un análisis de la geología y características geotecnicas de la zona de la presa y del área del embalse de manera detallada (no es suficiente la descripción geológica que se adjunta típicamente a los diseños). En estos estudios se debe tener en cuenta la inspección geológica del sitio, determinación de la habilidad estructural del material de fundación para resistir las cargas geostaticas e hidráulicas, determinar la posibilidad de filtraciones, estabilidad de taludes junto al embalse, posibilidad de problemas de filtración, la disponibilidad y calidad de materiales.



Figura 2-10 Tipos de fallas en presas de tierra (Jaime Suarez Díaz, 2016)

Se encuentran diversas fallas en las presas de tierra relacionados con los parámetros anteriormente mencionados. Cerca del 35% de las fallas de presas se relacionan a fenómenos hidráulicos. Las fallas por filtración de agua suponen más del 57% en presas de tierra. Se debe tener en cuenta que en todas las presas se presenta filtración, la cual no genera daño,

sin embargo, si esta es excesiva conlleva a un problema. También existen fallas por deslizamiento de taludes los cuales conllevan entre el 25 – 30% en presas de tierra. Estas ocurren debido a que las pendientes de los taludes son mayores a las pendientes de estabilidad, la filtración de agua genera presiones de poro que producen deslizamiento y el desembalse rápido en el talud aguas arriba genera presiones holgadas las cuales pueden producir falla en el talud. Otros problemas encontrados son fallas por el uso de materiales muy permeables, fallas de flujo por saturación, fallas por asentamiento, falla tectónica, fallas por eventos sísmicos, entre otros.

En resumen, se puede decir que las causas más comunes de fallas en presas de tierra con sus respectivos porcentajes son los siguientes:

Tabla 2-1 Causas comunes de fallas de presas (Middlebrooks, 1953)

Causa	%
Desbordamiento	30 – 40
Flujo de agua a través de la presa	25 – 30
Deslizamiento taludes	15 – 30
Fugas en ductos	10 – 20
Erosión superficial	5 - 10



Figura 2-11 Frecuencia de fallas de presas a nivel internacional (Conagua, 2000)

A continuación, se presentarán algunos tipos de fallas en presas en casos de la vida real para resaltar la importancia de un buen diseño de las mismas, al igual de los peligros que conllevan con el territorio y las personas que se encuentran en cercanía a estas mismas:



Figura 2-12 Falla hidráulica (Desbordamiento) Pakistán (Jaime Suarez Díaz, 2016)



Figura 2-13 Falla por infiltración (Jaime Suarez Díaz, 2016)

2.5 SISTEMAS DE MEJORAMIENTO DE FUNDACIÓN

A lo largo del tiempo, siempre se ha requerido tener un buen suelo, el cual cuenta con las características necesarias para los diferentes proyectos de ingeniería civil. Esta puede ser su capacidad portante, permeabilidad, estabilidad, etc. Sin embargo, cuando las condiciones de la zona de trabajo no son las más adecuadas, se ha optado por el mejoramiento del mismo de tal manera que cumpla con las especificaciones necesarias para el trabajo.

Puede presentarse en proyectos de ingeniería de cualquier tipo y su presencia en el desarrollo de presas de tierra no es la excepción. Este tipo de obra, aparte de necesitar parámetros de capacidad portante específicos, la permeabilidad de la zona es fundamental para su construcción y operación de manera adecuada. A continuación, se presentarán los diversos

métodos de mejoramiento, tratamiento del terreno, control y manejo de filtraciones para la fundación en presas de tierra.

2.5.1 Inyección de Lechada

El uso de tratamientos con inyección o en inglés “grouting”, se dio inicio en el imperio romano, utilizado en estructuras para el refuerzo de muros, puentes y otras obras construidas. El uso de este método fue para mejorar las condiciones del terreno en el siglo XVII en construcción de iglesias, utilizando mezcla con cal caliente el cual se endurece rápidamente y obtiene alta resistencia. A mediados del siglo XIX, se utilizaron inyecciones con diferentes mezclas para llenar espacios detrás de los revestimientos de túneles mineros, en el país de Francia se inyectó una lechada de arcilla en la base de esclusas para prevenir fugas de agua. Entre los primeros trabajos de inyección registrados en obras de gran envergadura fue localizada en el dique seco naval de Rochefort en el año 1818. Para este caso se utilizó inyecciones de lechada con puzolanas.

Según la empresa TECNOSUELO (2014), las inyecciones se definen por la introducción de mezclas (lechada) en los vacíos que existen en el suelo, con la finalidad de reducir la permeabilidad y mejorar las características del terreno. En el caso de una presa, su objetivo es minimizar la filtración que pueda existir a través de la fundación al igual que el mejoramiento de las propiedades físicas de los rocosos macizos. Todas las inyecciones existentes en macizos rocosos implican el llenado en grietas y discontinuidades del suelo.

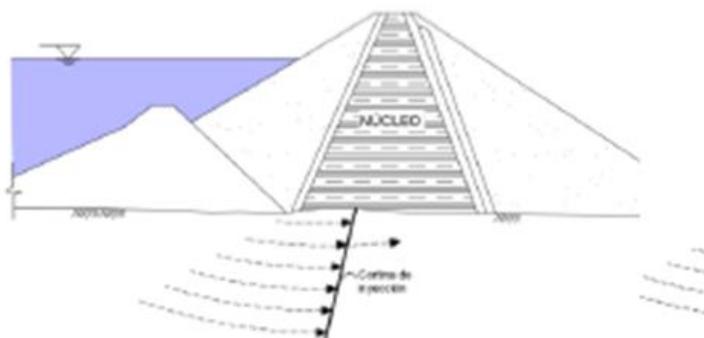


Figura 2-14 Tratamiento de inyecciones en presas de núcleo de arcilla. (Houlsby, A.C., 1990)

En presas de relleno homogéneo:

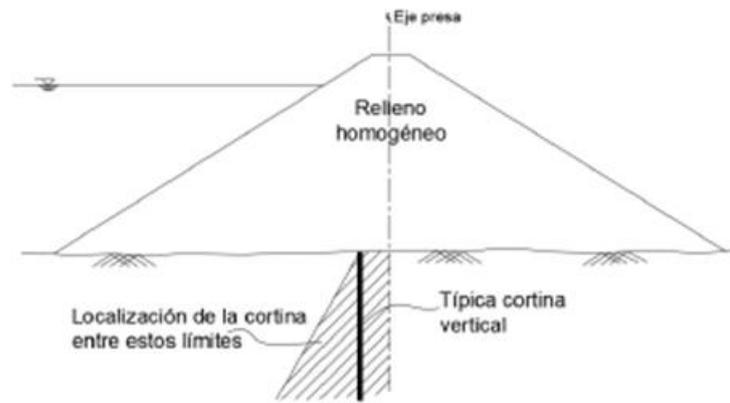


Figura 2-15 Cortinas de inyección de relleno homogéneo. (Rico R.,2019)

El cuerpo de ingenieros del ejército de los estados unidos (USACE) brinda el proceso constructivo del tratamiento, así como su planificación de las inyecciones. El proceso constructivo inicia con el reconocimiento del sitio, determinando la posibilidad de utilizar el método con inyecciones, el cual será respecto a toda la información geológica general del terreno, al igual que la información específica del sitio en estudio. En la siguiente etapa de factibilidad, involucra todo el estudio que engloba posibles soluciones, evaluación de costos, beneficios y preparación de diferentes diseños, con la culminación de un plan para dar solución al problema. Luego, de acuerdo a la evaluación de la etapa de factibilidad cumpliendo ciertos requisitos, se avanzará a la fase de diseño. En esta se realiza todos los documentos referidos al diseño como preparación de planos, especificaciones técnicas, y los documentos contractuales requeridos. Finalmente, para la fase de procedimientos de perforación e inyección por etapas, se seleccionará la secuencia de inyección que se deberá realizar para el tratamiento macizo, si es mediante inyecciones ascendentes o inyecciones descendentes.

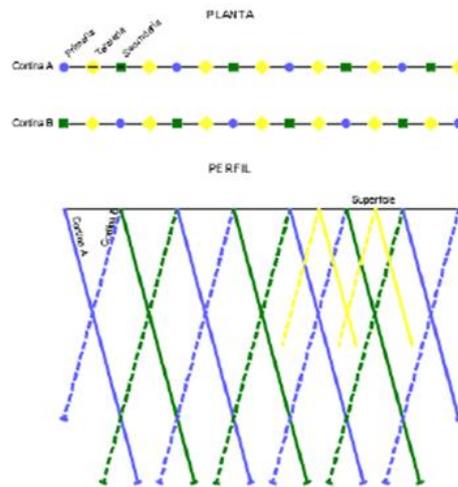


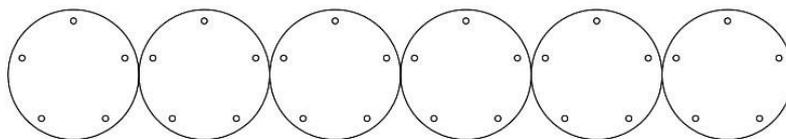
Figura 2-16 Disposición típica de tratamiento de inyección. (USACE, 2017)

2.5.2 Pantalla de Pilotes

La pantalla de pilotes es un sistema desarrollado para la contención de terrenos altamente cohesivos. Este consiste en la ejecución de una pantalla continua mediante el posicionamiento de pilotes de manera continua, con cierta diferencia dependiendo de sus diferentes variantes. Al posicionarse en una metodología de perforación, este permite trabajar en una vasta gama de suelos con o sin presencia de nivel freático.

Existen 3 variantes de esta técnica, la cuales dependen de la separación entre pilotes. Estos son: pantalla de pilotes separados (el terreno trabaja por efecto arco entre pilote y pilote), pantallas de pilotes tangentes (colocación de pilotes de manera continua separados por el diámetro de cada pilote respecto a su centro, empleado generalmente sin nivel freático) y pantallas de pilotes secantes (colocación de pilotes de manera continua separados por una distancia menor a su diámetro respecto a su centro, siendo una solución de contención empleada para rebajes de la excavación en roca y bajo nivel freático). Debido a nuestro objeto de estudio, el sistema de pilotes tangentes y secantes serán los más esenciales.

Pantalla de pilotes tangentes



Pantalla de pilotes secantes

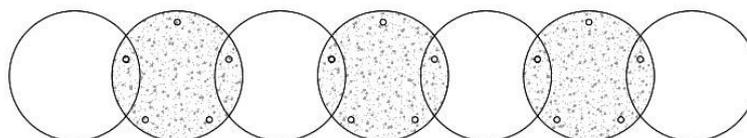


Figura 2-17 Imagen de los sistemas de pilotes tangentes y secantes (V́ctor Yepes Pisqueras, 2015)

El proceso constructivo de ambas variaciones es similar. Este comienza con la localización del muro de pilotes por medio de la topografía y la construcción de un muro guía. Luego se da lugar a la perforación del pilote por medio de herramientas de perforación (barrenas helicoidales o brocas de roca) que cortan y remueven el suelo al momento de la actividad. Al alcanzar la profundidad requerida se procede a la limpieza del fondo de excavación y a la colocación de armadura de los pilotes previamente confeccionada. Finalmente se procede con el vaciado de los pilotes utilizando una tubería Tremie, el cual evita segregación y que el concreto aumente de abajo hacia arriba. En caso de ser pantalla de pilotes tangentes, los pilotes secundarios se perforan de manera alterna, el vaciado de los pilotes secundarios se realiza antes de los primarios y no contienen armadura.

2.5.3 Pantallas Plásticas

La pantalla de suelo-cemento con hidrofresa es una técnica de mejora de suelos que se emplea para generar pantallas impermeabilizantes verticales mediante el uso de hidrofresas y el propio material del terreno. Este consiste en excavar el terreno en paneles verticales mediante una cabeza cortadora suspendida de un brazo grúa articulado. Las actividades permitirán ejecutar muros continuos, los cuales se dividirán en paneles primarios y

secundarios, que se solapan con los anteriores con juntas frescas si los paneles no han fraguado o con solapes duros en caso ya se haya endurecido.

Existen dos formas de ejecución de esta técnica de mejoramiento de suelos. En pantallas poco profundas (menor a 20m) se ejecuta en una fase, la cual consiste en inyectar la bentonita-cemento según se triture el terreno y en tiempos cortos de perforación para evitar el fraguado del cemento. Por otro lado, a mayores profundidades, se realiza en dos fases, cuya primera es la excavación hasta la cota deseada y luego durante el ascenso se inyecta la mezcla. Tras el fraguado del cemento se obtiene una pantalla impermeable.

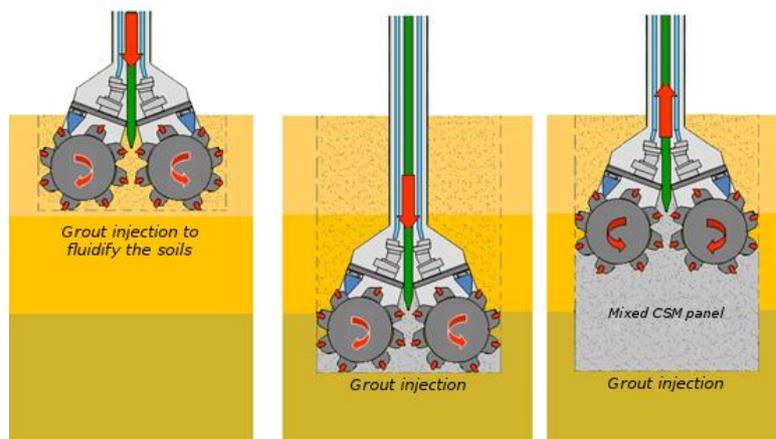


Figura 2-18 Proceso constructivo de Pantallas Plásticas (V́ctor Yepes Pisqueras, 2015)

La cabeza cortadora, también llamada hidrofresa, cuenta con características especiales para este trabajo. Esta presenta dos elementos cortantes giratorios provistos de dientes de corte que giran en direcciones opuestas para expulsar el material excavado durante la actividad. También posee un inyector en la parte central de las dos ruedas cortantes por la cual se inyecta una mezcla de bentonita-cemento. La mezcla, debido al movimiento giratorio de los dientes y de las paletas giratorias, se combinará con los detritos formando un nuevo material.



Figura 2-19 Cabeza cortadora o Hidrofresa (V́ctor Yepes Pisqueras, 2015)

Entre los diferentes tipos y/o alternativas para el mejoramiento de fundación en presas de tierra, se elaboró un cuadro comparativo entre estas para poder visualizar sus diferencias de manera más directa y así poder confirmar nuestra decisión respecto a la técnica de pantalla de pilotes secantes como solución al problema.

Tabla 2-2 Cuadro Comparativo de Técnicas de Mejoramiento de Suelos (Elaboración propia, 2020)

	Inyecciones	Pantalla de Pilotes Secantes	Pantallas Plásticas
Tipo de Suelo	Rocosos macizos	Todos	Arcillas y granos finos
Método	Llenado de grietas	Perforación de suelo	Vía húmeda/Vía seca
Profundidad	25 m	100 m	< 20 m
Diámetro	Ninguno	1.5 m	0.6 – 2.4 m
Instalación	Fácil	Difícil	Difícil
Costos	Medio	Alto	Medio
Ventajas	Reduce la permeabilidad	Reduce infiltraciones	Estabilizar el terreno
	Mejora las características del terreno	Mejora las características del terreno	Mejora la capacidad portante
		Estanqueidad	Reduce el tiempo de construcción
		Poca deformación	Económico

Gracias al cuadro se puede determinar las características principales al momento de la elección de la técnica a utilizar. Con esto se obtiene que la técnica de pilotes secantes cumple de una manera más eficaz a la solución al problema de estudio. Esto es debido a su versatilidad al poder ser usado en todo tipo de suelo, a grandes profundidades y su buena capacidad de permeabilidad. El costo y la facilidad de instalación son factores importantes pero la eficacia y solución total al problema es lo primordial.

2.6 GEOTECNIA: FILTRACIONES

La constante existencia de flujo de agua a través de los suelos es una realidad que se acepta debido a que no existen suelos totalmente impermeables en el mundo. Es por ello que cuando se habla de un suelo impermeable este es en base a su relación con otro tipo de suelo con magnitudes mayores en conductividad hidráulica. El agua presente en un estrato se clasifica en 3 categorías dependiendo de su movilidad dentro del suelo:

- **Agua absorbida:** Ligada a las partículas del suelo por fuerzas de origen eléctrico. Al no existir movimiento en el interior de la masa porosa, no participa en el flujo.
- **Agua capilar:** Fracción de agua ocupada en los microporos del suelo por medio de su tensión superficial siendo la reserva hídrica del suelo. En casos de análisis de infiltración, debido a su pequeña magnitud, suele despreciarse por las complicaciones que se daría al ser tomada en cuenta.
- **Agua libre o gravitacional:** Volumen de agua que se mueve al interior de las masas, bajo efecto de la gravedad terrestre, en base a su viscosidad y la estructura del suelo. La teoría de flujo se enfoca exclusivamente en esta categoría.

El control de movimiento del agua a través del suelo, evitando los daños que causa, es de suma importancia en la ingeniería civil. Esto se presenta en diversos proyectos como en la construcción de autopistas, caminos, excavaciones, cimentaciones y presas de tierra. La información fundamental obtenida es:

- El gasto o caudal de infiltración siendo el volumen de agua que filtra por unidad de tiempo hacia una excavación abierta o, como en el caso del presente estudio, la cantidad de agua embalsada perdida por infiltración a través del dique.
- Presiones dentro de la masa de suelo o estructuras.
- Sobrepressiones de infiltración.

- Influencia del flujo sobre la estabilidad general de la masa del suelo donde filtra.
- Posibilidad de arrastres de material sólido, erosiones, tubificación y más debido a la infiltración del agua.

La presión intersticial (presión del agua en los vacíos de un suelo) con frecuencia suele ser creada por el flujo del agua a través de los poros del suelo. Cuando esta empieza el suelo pasa de valores iniciales a finales, las cuales deben ser compatibles con los cambios de volumen que se producen en el suelo y las nuevas condiciones hidráulicas del borde. En este periodo, el análisis de infiltración suele ser complicado y se opta por no realizarlo debido a que, durante el proceso de cambio, el flujo varía en función del tiempo haciéndolo no permanente. Una vez obtenida la presión intersticial equilibrada, con las nuevas condiciones del terreno, se obtiene un flujo permanente (o estacionario) debido a que el mismo se vuelve independiente del tiempo siendo constante en todo momento. Hay que tener en cuenta que el tiempo del proceso de equilibrio dependerá del material que conforma el suelo. Por ejemplo, este proceso puede ser rápido o casi instantáneo en arenas o gravas o puede demorar años en establecerse como lo es en las arcillas.

2.6.1 Flujo de agua en suelos:

Intuitivamente se piensa que el agua siempre viaja del punto más alto al punto más bajo de altura en todo momento. Esto no es del todo cierto ya que, frecuentemente, el agua subterránea circula hacia arriba e incluso llega a desplazarse de manera vertical. Esto es debido a que el agua tiende a circular desde los puntos de mayor a los de menor energía. En la siguiente imagen se observa un suelo con dos perforaciones donde la altura de agua en la columna izquierda es mayor que a la derecha. Es por ello que el agua se desplaza hacia arriba, representado por las flechas, en dirección al punto de menor energía

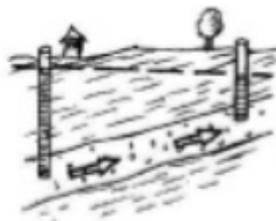


Figura 2-20 Representación del movimiento del agua subterránea (Lambe y Whitman, 1996)

Esta energía es denominada Potencial Hidráulico, la cual es la altura de la columna de agua en un punto. Junto con la Energía Cinética (debido a la velocidad) y la Energía de Presión

se obtiene la Energía Total de una unidad de volumen de agua. Sin embargo, debido a que la velocidad en el agua subterránea es tan lenta la energía cinética es despreciable a lado de las demás.

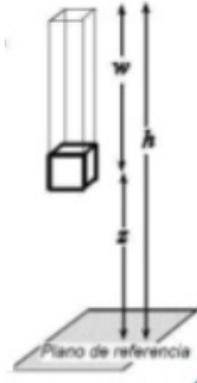


Figura 2-21 Plano de referencia para deducir la energía total por unidad de masa (Lambe y Whitman, 1996)

Considerando un volumen de agua de densidad (d) situado en el espacio a una altura “ z ” respecto a un nivel de referencia y existiendo un volumen de agua encima con una altura “ w ” se tiene:

$$\text{Energía Potencial} = \text{Masa} * \text{Gravedad} * \text{Altura} = d * g * z$$

La presión que soporta el volumen unitario es el peso de la columna de agua dividido por la superficie.

$$\text{Peso} = \text{Masa} * \text{Gravedad} = \text{Volumen} * d * g = \text{Base} * \text{Altura} * d * g = 1 * w * d * g$$

$$\text{Energía de Presión} = \frac{\text{Peso}}{\text{Superficie}} = \frac{w * d * g}{1}$$

$$\text{Energía total por unidad de volumen} = d * g * z + w * d * g$$

Dividiendo por la densidad (d) brindaría la Energía total por unidad de masa

$$\text{Energía total por unidad de masa } (\phi) = h * g$$

La representación gráfica de los caminos recorridos por el agua en el suelo es denominada red de flujo o red de corriente. Esta es conformada por dos líneas las cuales son: líneas de flujo y líneas equipotenciales. La primera representa la trayectoria de las partículas por escurrimiento o filtración a lo largo de una masa de suelo saturado. En la imagen a continuación, dicho flujo son las líneas curvas, suaves y sólidas. Esta empieza en un punto localizado sobre A-B, con una carga de presión ($h = h_1 - h_2$), que es disipada por la fricción

viscosa y termina su recorrido en la línea C-D donde la carga de presión es h_2 . La segunda representa los puntos de igual carga total en cada línea individual. Es decir, el agua asciende en un piezómetro a un mismo nivel en todos los puntos de una misma línea equipotencial. Esto ocurre ya que a lo largo de la trayectoria del agua existen puntos donde se ha disipado una porción de su energía potencial. Esta es representada en la imagen como las líneas discontinuas a lo largo del suelo. Este esquema permite corroborar el comportamiento del agua a desplazarse de los puntos de mayor a los de menor energía.

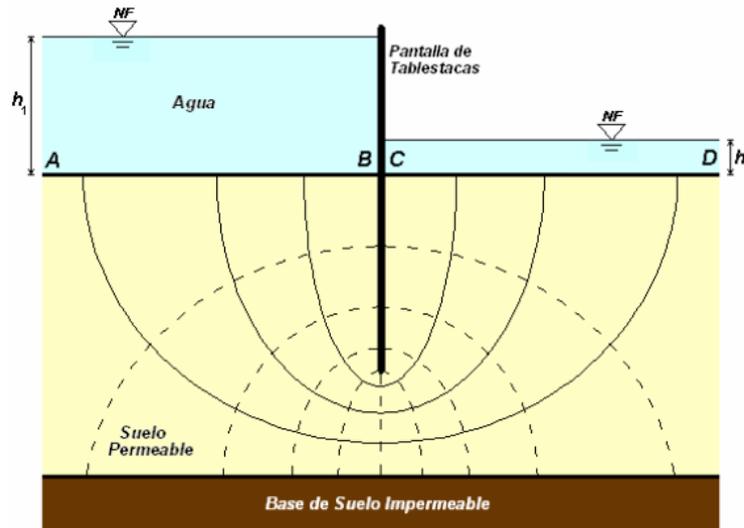


Figura 2-22 Esquema de Red de flujo (Geología y geotecnia, 2010)

2.6.2 Ecuaciones hidrodinámicas que rigen el flujo de agua a través de los suelos

Los casos donde el agua solo fluye en un plano es denominado flujo bidimensional. Esto es aplicado en varios casos de ingeniería como en el análisis de una presa de tierra de gran longitud. Las hipótesis que permiten resolver el análisis de este tipo de flujos son:

- 1) Suelo y agua son incompresibles en sí mismos (Volumen de vacíos es constante).
- 2) El flujo no modifica la estructura del suelo de ninguna forma (Solo durante la etapa transiente)
- 3) Régimen permanente y flujo estacionario (Independiente del tiempo)

Este concepto implica que la cantidad de agua que entra en un espacio acotado sea igual a la cantidad que sale sin variaciones en el agua almacenada ni en los niveles piezométricos. El nivel es independiente del tiempo.

En la figura a continuación se muestra un cubo de material poroso ideal, siendo el representativo de las propiedades del medio por donde circulara el agua. Para cada una de las caras entraran caudales (Q) cuyos valores iniciales serán iguales cuando estos salgan por la cara opuesta. La velocidad “v” del agua que pasa por el cubo posee 3 componentes v_x , v_y y v_z y están solamente en función de x, y, z ya que, al ser un régimen estacionario, el tiempo no se considera. Estas componentes son funciones continuas que permiten cualquier orden de derivación.

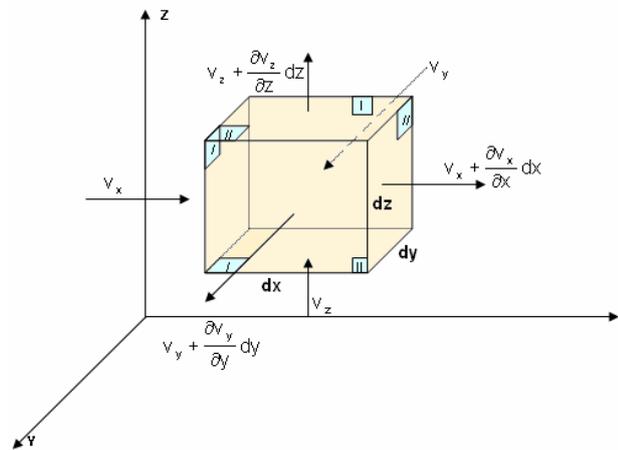


Figura 2-23 Flujo estacionario representación (Geología y geotecnia, 2010)

Teniendo en cuenta que la cantidad de agua que entra es igual a la que sale podemos decir que el caudal que pasa por una sección puede interpretarse como el producto del área de la sección transversal por la velocidad de flujo:

$$\begin{aligned}
 & V_x * d_y * d_z + V_y * d_x * d_z + V_z * d_x * d_y = \\
 & = (V_x + \frac{\partial V_x}{\partial x} * d_x) * d_y * d_z + (V_y + \frac{\partial V_y}{\partial y} * d_y) * d_z * d_x + (V_z + \frac{\partial V_z}{\partial z} * d_z) * d_y * d_x
 \end{aligned}$$

El primer miembro representa el caudal que entra al elemento y el segundo el que sale. Reduciendo la ecuación anterior a términos semejantes y reordenando se obtiene:

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} * d_x * d_y * d_z + \frac{\partial V_y}{\partial y} * d_y * d_z * d_x + \frac{\partial V_z}{\partial z} * d_z * d_y * d_x = 0$$

Donde:

$$\frac{\partial V_x}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_z}{\partial z} = 0$$

Dando como resultado la **Ecuación de Continuidad**, la cual es sumamente importante en la teoría de flujo de agua.

- 4) El suelo está saturado (Presencia de agua)
- 5) Flujo laminar con bajas velocidad de filtración
- 6) Es válida la Ley de Darcy.

$$\text{Ley de Darcy: } v = k * i$$

v: Velocidad de escurrimiento del agua en el suelo

k: Coeficiente de permeabilidad del suelo

$$\text{También puede ser escrita como: } q = k * i * A$$

i: Gradiente hidráulico definido como H/L

q: Caudal del escurrimiento

A: Área

- 7) El suelo es homogéneo e **isotrópico** haciendo al coeficiente de permeabilidad constante en todos los puntos (k_v es igual a k_h , lo cual indica la no existencia de anisotropía).

Ecuación diferencial del flujo (Suelo isotrópico $k_x = k_y$)

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

Esta ecuación surge teniendo en cuenta esta hipótesis y aplicando la Ley de Darcy a un elemento de suelo donde se iguala la cantidad de agua que entra con la que sale de un elemento. Esta es llamada la **Ecuación de Laplace**, la cual se reacciona al movimiento de

los líquidos en medio porosos cuya solución grafica es una red de flujo. Otros conceptos a considerar son en canal de flujo (región entre dos líneas de flujo) y pérdida de carga (perdida de carga entre dos líneas equipotenciales en cierta cantidad representada por “ Δh ”)

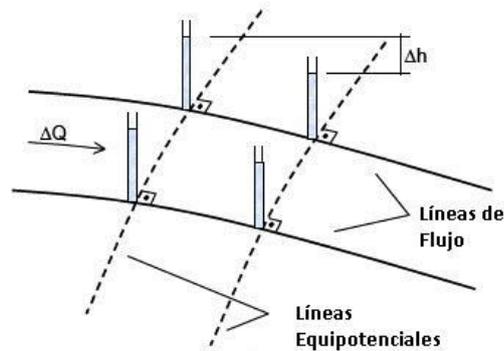


Figura 2-24 Red de flujo (La Guía, 2012)

Existen varias formas de resolución de la Ecuación de Laplace. Entre estas podemos encontrar: **Métodos Analíticos** (Integración de la ecuación diferencial del flujo), **Solución Numérica** (Solución de la ecuación de Laplace a través de métodos numéricos usando programas de ordenador), **Modelos Reducidos** (Construir un modelo reducido del medio que va a sufrir la infiltración) y **Solución Grafica** (El más común de los métodos para redes de flujo)

Para cualquier método adoptado es necesario definir las condiciones límites del contorno de infiltración que generalmente son:

- Superficie de entrada y salida
- Líneas equipotenciales (1-2 y 6-7)
- Línea de flujo superior (2-3-4-5-6)
- Línea de flujo inferior (8-9)

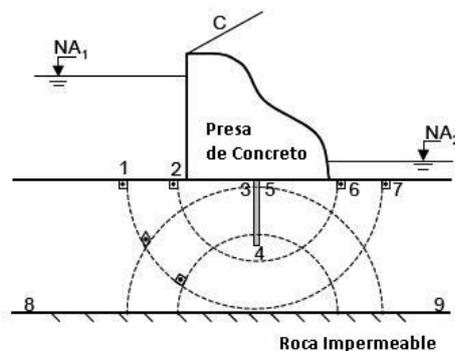


Figura 2-25 Definición de las condiciones límites Laplace (La Guía, 2012)

El Método Grafico consiste en el trazado a mano alzada de las posibles líneas de flujo y equipotenciales. Estas últimas cortan las líneas de flujo en ángulos rectos haciendo que los elementos generados sean aproximadamente cuadrados. La red de flujo se define por el Número de canales de flujo (N_f) y Numero de franjas de perdida de potencial (N_d). El método se analiza en base a las siguientes ecuaciones:

$$\Delta h = \frac{h}{N_d}, \Delta Q = \frac{Q}{N_f}$$

$$i = \frac{\Delta h}{L} = \frac{h}{N_d * L}$$

$$\Delta Q = k * I * A$$

$$\Delta Q = k * \frac{h}{N_d * L} * a * 1$$

$$Q = k * \frac{h}{N_d * L} * \frac{h}{N_d * L} * N_f; \quad a = L$$

$$Q = k * h * \frac{N_f}{N_d}$$

Ó

$$Q = k * h * \frac{N_f}{N_d} * C$$

Ecuación diferencial del flujo (Suelo Anisotrópico $k_x \neq k_y$)

$$k_x * \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + k_y * \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} = 0$$

En el caso que los coeficientes de permeabilidad no sean iguales en las dos direcciones ($k_x \neq k_y$) se requiere la transformación del problema para que este cumpla las características de un suelo isotrópico. Debido a que la permeabilidad en la dirección horizontal tiende a ser mayor a la vertical, se realiza una alteración de la escala en la dirección x.

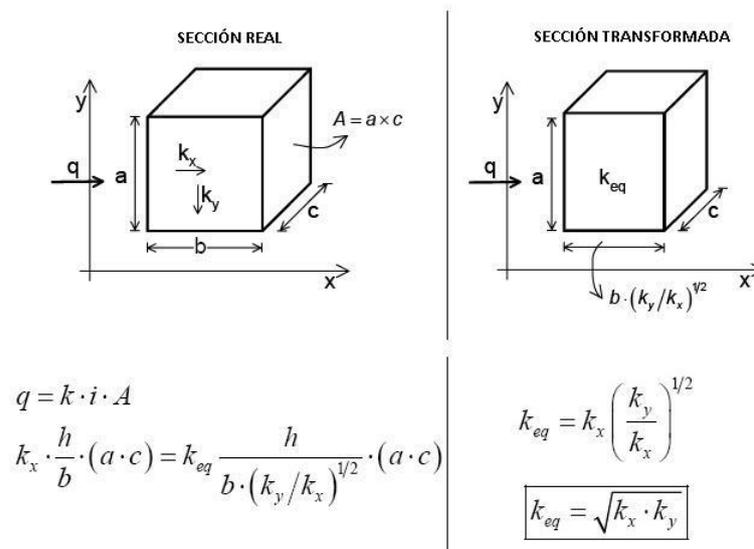


Figura 2-26 Transformación de suelo anisotrópico a isotrópico (La Guía, 2012)

2.7 PROGRAMA SLIDE

Para la aplicación de programas, existen una gran variedad de estos los cuales pueden servir de mucha utilidad para realizar los análisis requeridos. Entre ellos se encuentran softwares como el Slide, GEO5, Phase2, SLOPE/W, Cingcivil, entre otros.

El Slide es un programa referente en el mundo de la Ingeniería Civil por su interfaz de forma sencilla y fácil entendimiento, diseñado por Rocscience, empresa enfocada en la modelación de problemas geotécnicos. Este software tiene como principal componente, realizar el análisis de estabilidad de taludes aplicando métodos de equilibrio límite únicamente en un formato en 2D, para la realización de los cálculos y resultados que puedan ser generados por esta misma. Además, tiene como disponibilidad el segundo componente que se basa en la capacidad de realizar un análisis de infiltración del agua subterránea mediante el método de elementos finitos (MEF) integrando capacidades de interpretación de sensibilidad, probabilístico, reducción rápida y diseño de soportes

Estos componentes pueden ser utilizados para los diferentes tipos de terrenos como suelo y roca, para analizar problemas geotécnicos tales como terraplenes, presas de tierra, muros impermeables, muros de contención, entre otros. Asimismo, mediante datos o información existente en otros programas como el software de diseño asistido por computador (AutoCAD) permiten que los modelos realizados en esta plataforma sean exportados directamente hacia el Slide en caso sea necesario

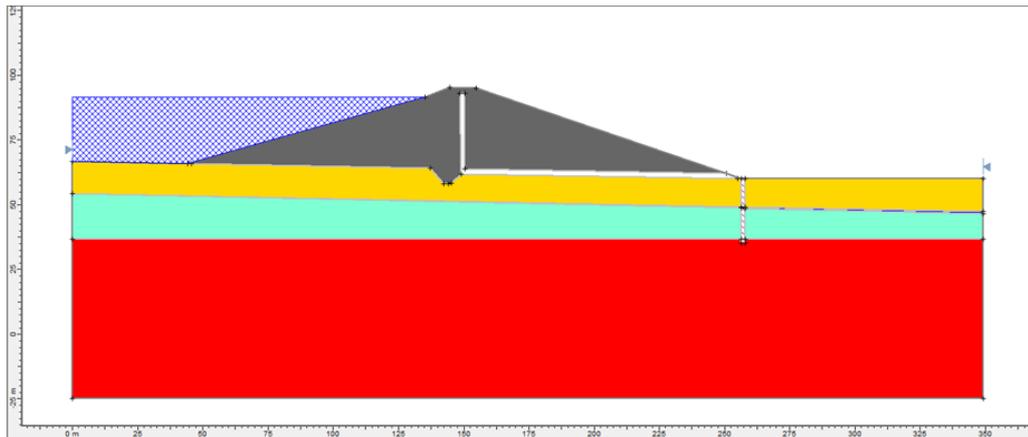


Figura 2-27 Elaboración de una Presa en el programa SLIDE (Elaboración Propia, 2020)

2.8 METODOS DE ELEMENTOS FINITOS (MEF)

Este método fue desarrollado por Richard Courant en el año 1943 con un objetivo teniendo ciertas diferencias en referencia a un sistema de vibración. En la actualidad, el método de elementos finitos ha estado siendo utilizado en la carrera de ingeniería civil. El método de elementos finitos (MEF) fue elaborado mediante un método numérico de resolución de ecuaciones diferenciales para la aplicación de diferentes problemas de ingeniería, siendo utilizado para resolver problemas que tiene un grado de dificultad, mediante la geometría se subdivide en partes pequeñas el cual serán conocidas como “elementos” lo que permite a la computadora realizar estas tareas designadas simplificándolas.

Características del MEF

El MEF tiene como propuesta la sustitución de números infinitos (variables desconocidas) por números limitados de elementos que se encuentran bien definidos. Existen divisiones de figuras geométricas tales como cuadrangular, triangular, entre otros. Se le llama al “elementos finitos” a los numero de elementos limitados. Además, cada uno de estos elementos finitos están unidos mediante nodos o puntos nodales, el cual se le conoce a la unión de esta como una configuración de malla. Es así que es importante señalar que la precisión de el método de elementos finitos dependerá de la cantidad de los puntos nodales que exista, materiales, sistema de unidades, parámetros, entre otros. Asimismo, mientras más pequeñas se vean los nodos en la configuración de una malla representara un mayor precisión y resultado en los análisis que se realicen.

Pasos en el cálculo del Método de los Elementos Finitos

Todos los programas que utilicen este método de simulación computacional deben realizar ciertos pasos previos para poder conseguir la modelación por elementos finitos. En lo siguiente, se presentará los tres pasos más importantes que se siguió en un Presa de Tierra.

- **Pre-Procesador:**

Es la parte en donde se realiza el dibujo del modelo o la importación de la geometría deseada mediante programas de dibujo como el AutoCAD. Luego, se selecciona los materiales a utilizar y sus respectivas propiedades como no lineales o materiales anisotropicos. Una vez culminado ese paso, se aplica la configuración de la malla mediante la unión de los puntos nodales, la precisión de los resultados estará a disposición del usuario al seleccionar los tamaños de estos. Finalmente se inserta las condiciones de contorno que presenta el modelo.

- **Calculador:**

Es la parte en el que el programa realizara todo el proceso de cálculo utilizando el método de elementos finitos generando respuestas inmediatas. Para este paso, se deberá seleccionar el tipo de cálculo, el número de iteraciones que requiere por el usuario. Por último, el programa realizara el cálculo, una vez designado todas las configuraciones necesarias.

- **Post- Procesador:**

En este último paso, se podrá generar representaciones graficas de los resultados, así como otras derivaciones el cual también genera este método al realizar esta modelación.

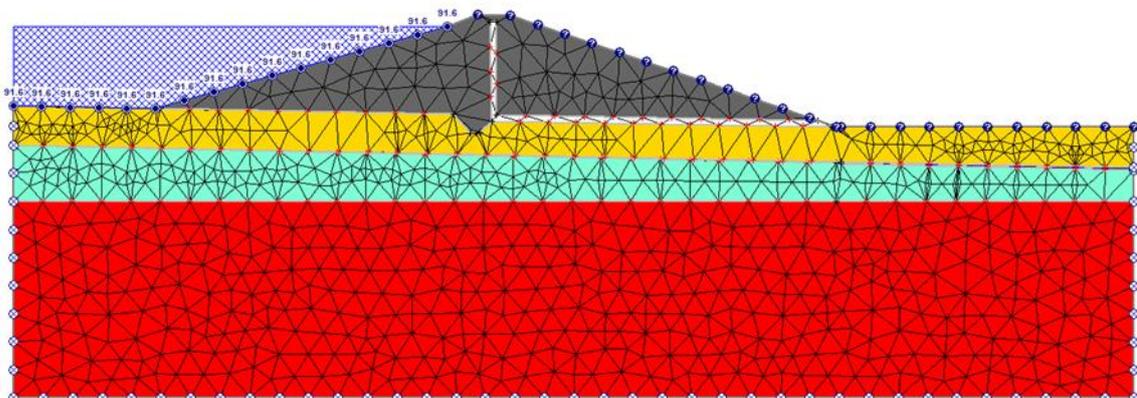


Figura 2-28 Método de Elementos Finitos en una Presa (Elaboración Propia, 2020)

3 CAPITULO 2: METODOLOGIA

3.1 Nivel de Investigación:

El nivel de investigación para este estudio será de carácter descriptiva y explicativa. Esto es debido a que se cuenta con información directa del proyecto de la presa Coltani llamada “Construcción de un sistema de almacenamiento y regulación en el sector de la quebrada Coltani para el mejoramiento de áreas agrícolas”, la cual contiene toda información, estudios y ensayos pertinentes (geotecnia, geología, hidráulica, etc.) para el conocimiento general del caso de estudio. Por ello, a través de la evaluación y descripción de un estudio preliminar, se propondrá la técnica de mejoramiento de fundación mediante un muro impermeabilizante conformado por pilotes secantes. Esto permitirá responder a nuestra interrogante sobre la formulación del problema, desarrollando todos los componentes específicos de la técnica sustentado la viabilidad en su aplicación.

3.2 DISEÑO DE INVESTIGACIÓN:

Luego de la explicación del nivel de investigación podemos identificar que el diseño de esta será de carácter Documental.

3.3 PROCEDIMIENTO:

La investigación inicia con la recopilación de información pertinente a nuestro tema, tanto de la presa y proyecto mismo (expediente técnico) como de las diferentes técnicas de mejoramiento de fundación existentes en la actualidad (artículos científicos, libros, etc.). Luego, se definirán los estudios preliminares al diseño de una presa para poder hacer la revisión de los mismos (geotécnicos, diseño, hidráulica, cimentación, etc.), así como los diferentes ensayos en la zona. Con ello, se discutirán los estudios preliminares para poder brindar diferentes técnicas de mejoramiento de fundación de presas de tierra. Esto con el objetivo de desarrollar una nueva propuesta, la cual será la ideal para la solución a nuestro caso. Se procederá a la elaboración del análisis de infiltración mediante el uso del programa Slide, el cual nos mostrará las líneas de flujo para visualizar el sentido del movimiento del agua y obtener los caudales respuesta de infiltración de la presa Coltani en su condición inicial. Esto permitirá calcular el Caudal Máximo de Infiltración Permisible brindando el punto de partida para el posterior diseño del muro pantalla. Se realizarán alternativas con diferentes diámetros variando en sus ubicaciones respecto a la presa y sus profundidades. El nuevo análisis, teniendo en cuenta el muro pantalla se realizará en el programa Slide, obteniendo los caudales respuesta de infiltración de la presa en su condición estabilizada

permitiendo determinar su viabilidad respecto a Q_{fmp} . Esto se realizará con el objetivo de tener diversas alternativas a utilizar y analizar tanto en términos de viabilidad, constructabilidad y costos. Finalmente se desarrollará el diseño global de planos a detalle y esquemas de las diversas alternativas de muro pantalla por medio de pilotes secantes a considerar.

4 CAPITULO 3: ESTUDIO PRESA COLTANI

4.1 GENERALIDADES

El proyecto “Sistema de Almacenamiento y Regulación en el sector de la Quebrada Coltani para Mejoramiento de Áreas Agrícolas” (presa Coltani) se ubica políticamente en el distrito de Camilaca, provincia de Candarave, departamento de Tacna, a una altitud del orden de 3950 a 4350 msnm aproximadamente. Este consiste en un sistema de captaciones y canales de derivación hacia una quebrada cuyas aguas discurren hacia un embalse, el cual almacenara el recurso hídrico durante épocas de avenidas para luego derivarlas mediante una tubería hacia las pampas de Borogueña y Carumbraya.

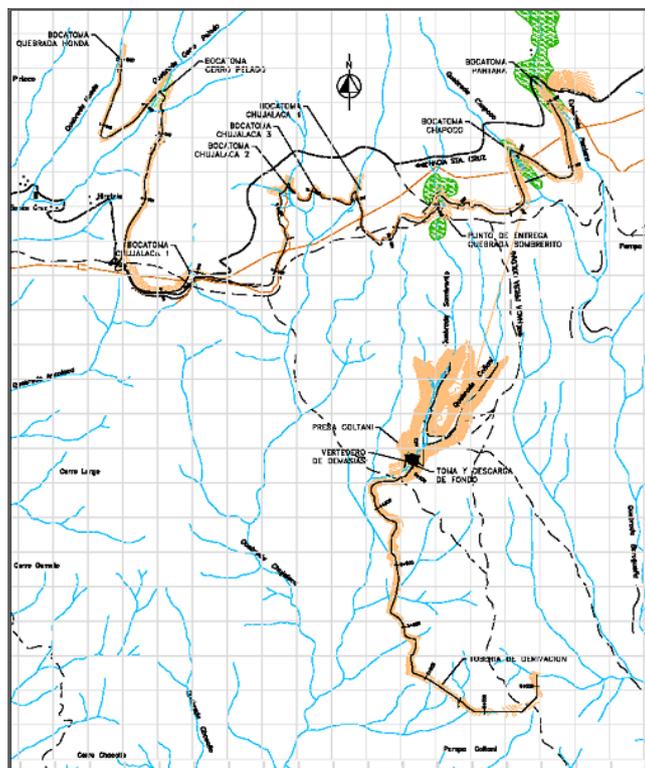


Figura 4-1 Mapa de ubicación de la presa Coltani (Expediente Técnico Presa Coltani, 2013)

La presa Coltani es una estructura de tierra de sección homogénea de taludes: aguas arriba 3.0H: 1.0V y aguas abajo 2.5H: 1.0V, el cual se proyecta en construir en la quebrada Coltani. Este ha sido diseñado para un volumen de almacenamiento de 4.50 millones de m³ incluyendo sus obras conexas (estructura de alivio y descarga). La presa tendrá una altura de 40m, el cual contará con un nivel máximo de operación embalse de 4121 msnm, nivel extraordinario del embalse de 4121.54 msnm y nivel de corona de la presa de 4124 msnm. Este será diseñado con un caudal de diseño de la tubería de conducción de 0.20 m³/s.

4.2 INVESTIGACIONES GEOTÉCNICAS

Teniendo en cuenta la problemática ocurrida en el pasado con la presa Coltani, la cual provocó su actual pausa indefinida, se procedió a revisar el estudio de suelos del proyecto con el fin de entender a una mayor profundidad las características de la zona donde el proyecto se llevaba a cabo. El estudio geotécnico a revisar tuvo como objetivo investigar el terreno donde se construirán las diferentes obras del proyecto.

Las investigaciones geotecnicas se realizaron por métodos directos e indirectos para evaluar la calidad de los suelos subyacentes con fines de cimentación y conformación de terraplenes de las diferentes estructuras del proyecto. Este consistió de las siguientes actividades:

- Excavación a cielo abierto de calicatas en las siguientes zonas del proyecto como son: eje y vaso de la presa Coltani, canal de captación quebrada Pantara – quebrada Sombrerito, canal de captación quebrada Honda – quebrada Sombrerito, canal de derivación presa Coltani y área de cantera de materiales de construcción (material de morrena) y cantera de roca.
- Ensayos de penetración dinámica ligera DPL y muestreo con posteadora en las zonas de captación (bocatomas) y entrega de los canales.
- Ensayos de densidad in situ en zona de canales de captación, eje y vaso de presa, bocatomas y accesos.
- Ensayos de permeabilidad en zona de eje y vaso de presa.
- Ensayo geofísico mediante método geoelectrico (sondaje eléctrico vertical (SEV) y tomografía eléctrica) y sísmico (refracción sísmica y MASW (1D)).
- Registro del perfil estratigráfico del subsuelo y adquisición de muestras alteradas.
- Ejecución de ensayos estándar y especiales
- Perfil estratigráfico
- Conclusiones y recomendaciones

Cuyos sectores de investigación de campo son:

- Eje y vaso de la presa Coltani
- Canal de captación quebrada Pantara – quebrada Sombrerito
- Canal de captación quebrada Honda – quebrada Sombrerito
- Tubería de derivación presa Coltani
- Accesos

- Campamento
- Cantera de material morrenico (A y B)
- Canteras de roca (R1, R2, R3 y R4)
- Cantera Sajrapa y Rio Santa Cruz

Para nuestro tema de investigación, se estudiará específicamente los estudios geotécnicos del “Eje y Vaso de la Presa Coltani” a fin de obtener la mayor información posible de la misma zona donde se construirá la presa.

Eje y Vaso de la Presa Coltani

Los diferentes estudios realizados a esta zona del proyecto fueron: calicatas, ensayos de penetración estándar (SPT), perforaciones diamantinas, ensayos de permeabilidad en pozo Lefranc y Lugeon, ensayos de permeabilidad en calicatas y ensayos en laboratorio. Cada uno de estos parámetros se explicará a detalle a continuación.

Calicatas

Las calicatas son una de las técnicas de prospección empleadas para facilitar el reconocimiento geotécnico de un terreno. Estas permiten la inspección directa del suelo que se desea estudiar siendo el método de exploración que normalmente entrega información confiable y completa. Además de una inspección visual del terreno in situ, también permite la toma de muestras y la realización de algún ensayo de campo.

En este estudio se realizó 22 calicatas las cuales 12 excavaciones se realizaron en el eje de presa (C-01 A C-12) y 10 en el sector del vaso (C-V-01 A C-V-10) realizándose en cada una de ellos ensayos de densidad y permeabilidad in situ. A continuación, se presentan las tablas y resultados de la actividad.

Tabla 4-1 Resumen de calicatas y ensayos en el Eje de la Presa (Expediente Técnico Presa Coltani, 2013)

Calicata	Muestra	Profundidad (m)	SUCS	Peso Unitario	Permeabilidad	Densidad	Nivel Freático (m)	Descripción
C-C-1	M-1	0.0-1.2	x	x	x		0.8	material orgánico
C-C-2	M-1	0.0-1.9	x		x	x	1.6	material orgánico
C-C-3	M-1	0.0-0.9	x	x	x		0.3	material orgánico
C-C-4	M-1	0.0-0.2	x		x		1.2	arena limosa
	M-2	0.2-1.4	x		x	x		grava limosa
C-C-5	M-1	0.0-0.6	x		x	x	0.2	material orgánico
C-C-6	M-1	0.0-1.5	x	x	x		1.1	material orgánico
C-C-7	M-1	0.0-2.3	x		x	x	2.0	material orgánico
C-C-8	M-1	0.0-0.85	x	x	x		0.2	material orgánico
C-C-9	M-1	0.0-2.0	x		x	x	1.8	material orgánico
C-C-10	M-1	0.0-3.0	x		x	x	1.8	material orgánico
C-C-11	M-1	0.0-0.8	x		x	x	0.4	material orgánico
C-C-12	M-1	0.0-0.9	x	x	x		0.2	material orgánico

Tabla 4-2 Resumen de calicatas y ensayos en el Vaso de la Presa (Expediente Técnico Presa Coltani, 2013)

Calicata	Muestra	Profundidad	SUCS	Permeabilidad	Densidad	Nivel Freático (m)	Descripción
C-V-1	M-1	0.0-0.6	x	x	x	0.4	limo de baja plasticidad
	M-2	0.6-1.5	x				material orgánico
C-V-2	M-1	0.0-1.6	x	x	x	0.4	material orgánico
C-V-3	M-1	0.0-1.5	x	x	x	0.4	material orgánico
C-V-4	M-1	0.0-0.3	x	x		0.05	material orgánico
	M-2	0.3-1.1	x				limo de baja plasticidad
C-V-5	M-1	0.2-1.4	x	x	x	0.3	arena limosa
C-V-6	M-1	0.1-1.3	x	x	x	0.2	material orgánico
C-V-7	M-1	0.0-0.6	x	x	x	1.0	arena limosa
	M-2	0.6-1.4	x				arena limosa
C-V-8	M-1	0.0-0.6	x	x	x	0.2	material orgánico
	M-2	0.6-1.2					arena limosa
C-V-9	M-1	0.0-0.25	x	x		1.0	material orgánico

M-2	0.25-1.4	x	x	arena mal gradada con limo
-----	----------	---	---	----------------------------

Dados los resultados, se observa lo siguiente. Respecto al nivel freático, podemos observar que este se encuentra a un nivel superficial y tiene una variación entre 0.2 – 2m de profundidad. Por otro lado, respecto al material existente en la zona, podemos apreciar diversos tipos como arena limosa, grava limosa, limo de baja plasticidad, arena mal gradada con limo y material orgánico, siendo este último el más recurrente. Debido a que se presentó en general material orgánico y un nivel freático a poca profundidad, hubo dificultades respecto a la profundización de las calicatas.

Ensayos de Penetración Estándar (SPT)

El ensayo de Penetración Estándar (SPT) es uno de los ensayos más utilizados en la geotecnia por su sencillez, rapidez y economía. Este consiste en clavar 45 centímetros en el terreno una cuchara partida normalizada, contando el número de golpes necesarios para penetrar tramos de 15cm. Se realiza mediante una maza de 63.5 kg que cae desde una altura de 76 cm. Los valores de golpeo de los dos últimos tramos de 15 cm sumados nos dan el parámetro NSPT. Cuando el terreno es muy resistente para la prueba es cuando se aplican 50 golpes para un tramo de 15 cm (Rechazo, R) anotando la penetración realizada.

El parámetro NSPT nos permite calcular la resistencia a la penetración dinámica por punta e inferir parámetros geotécnicos. Las principales aplicaciones de este método son la determinación del perfil de resistencia del terreno, la capacidad portante de cimentaciones superficiales y profundas, densidad relativa y ángulo de rozamiento interno en suelos granulares, control de calidad de tratamientos del terreno y el cálculo de asentamientos por métodos empíricos.

En el área del eje de la presa Coltani se realizaron 26 sondeos mediante el método de SPT denominados desde SPT-C-01 A SPT-C-26. En cada uno de ellos se realizó pruebas de SPT un por cada metro de profundidad. A continuación, se presentarán los cuadros y datos de dicho estudio.

Tabla 4-3 Resumen de ensayos de Penetración Estándar (SPT) Parte 1 (Expediente Técnico Presa Coltani, 2013)

Profundidad	NSPT												
	SPT-C-01	SPT-C-02	SPT-C-03	SPT-C-04	SPT-C-05	SPT-C-06	SPT-C-07	SPT-C-08	SPT-C-09	SPT-C-10	SPT-C-11	SPT-C-12	SPT-C-13
1.0	6	2	2	2	2	2	4	1	1	1	4	1	3
2.0	5	2	2	5	2	2	8	1	1	1	2	1	3
3.0	54	2	2	R	2	2	R	1	1	2	R	2	2
4.0	R	2	2		2	12		2	1	2		2	3
5.0		2	3		2	28		2	1	2		2	R
6.0		4	4		4	R		16	9	16		2	
7.0		13	14		8			18	17	2		2	
8.0		43	21		8			4	18	R		26	
9.0		R	55		40			41	R			R	
10.0			R		R			R					

Tabla 4-4 Resumen de ensayos de Penetración Estándar (SPT) Parte 2 (Expediente Técnico Presa Coltani, 2013)

Profundidad	NSPT												
	SPT-C-14	SPT-C-15	SPT-C-16	SPT-C-17	SPT-C-18	SPT-C-19	SPT-C-20	SPT-C-21	SPT-C-22	SPT-C-23	SPT-C-24	SPT-C-25	SPT-C-26
1.0	2	2	2	10	2	2	2	2	2	2	10	2	2
2.0	2	2	2	11	2	2	2	2	2	2	19	2	2
3.0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	19	2	1
4.0	2	2	2	4	2	2	2	2	2	3	2	2	R
5.0	2	2	R	2	2	2	2	3	2	2	17	3	
6.0	14	3		3	2	2	2	6	2	3	9	3	
7.0	2	3		3	3	3	20	33	3	4	30	12	
8.0	2	5		29	3	4	4	R	4	6	R	7	
9.0	50	31		R	R	42	R		R	10		13	
10.0	R	R				R				R		R	

Leyenda:

- Material orgánico en descomposición, limo, blando, negruzco.
- Arena limosa, gravillas, roca volcánica triturada, compacta, plomizo y negruzco
- R -Rechazo (Nspt >50)

Con los resultados del ensayo SPT en la zona de la presa Coltani se determina lo siguiente. Cada ensayo se realizó hasta llegar hasta su factor de rechazo “R” el cual variaba en profundidad entre 3–10 m. Sin embargo, este factor predomina entre los 8-10m de profundidad. Además, se nota que, generalmente, a mayor profundidad, el valor SPT aumenta respecto a sus demás valores en cada sondeo individual. El material orgánico en descomposición, limo, blando, negruzco predomina en la zona y el material de arena limosa, gravillas, roca volcánica triturada, compacta plomizo y negruzco se encuentra usualmente a mayores profundidades o predomina en ciertos puntos de sondeo.

Perforaciones Diamantinas

La perforación de diamantina es aquella perforación que se hace utilizando una broca diamantada para perforar la roca obteniendo un testigo de la misma, el cual es extraído, registrado y colocado en cajas porta-testigos para su debida protección y almacenamiento. Para la perforación se usan brocas diamantinas ya que el diamante es el material existente con mayor dureza y conductividad térmica del planeta lo que le permite actuar como herramienta de corta con gran efectividad para cortar la roca que se requiere y extraer las muestras del yacimiento.

En el estudio de la presa Coltani se han realizado 8 perforaciones rotativas denominadas DCD-C-01 a DCD-C-08. Respecto a estas, 2 ensayos fueron orientados a 45° y el restante a 90°. Se recuperaron muestras de manera continua y en cada poso se realizaron ensayos de permeabilidad. A continuación, se presentarán las tablas de resultados y datos del ensayo.

Tabla 4-5 Resumen de perforaciones (Expediente Técnico Presa Coltani, 2013)

Código	Norte	Este	Inclinación	Profundidad (m)	Nivel Freático (m)	N° de Ensayo Lefranc	N° de Ensayo Lugeon	N° de Cajas Testigos
DCD-C-01	8 096 859	343 637	– 45°	50.40	1.0	0	0	13
DCD-C-02	8 096 821	343 700	– 45°	40.95	1.0	0	0	10
DCD-C-03	8 096 881	343 658	– 90°	50.00	1.0	0	0	11
DCD-C-04	8 096 841	343 673	– 90°	60.20	1.2	0	0	16
DCD-C-05	8 096 902	343 715	– 90°	60.00	2.4	10	2	15
DCD-C-06	8 096 823	343 653	– 90°	50.00	2.5	4	5	13
DCD-C-07	8 096 803	343 678	– 90°	41.00	1.0	0	0	11
DCD-C-08	8 096 771	343 622	– 90°	50.80	1.0	0	0	11

Tabla 4-6 Perforación dcd-c-01 (Expediente Técnico Presa Coltani, 2013)

CORRIDA		CLASIFICACION VISUAL	LITOLOGIA
(m)		(SUCS)	
0.00	5.70	Pt	Turba, suelo altamente orgánico, identificable por su color oscuro, olor, sensación esponjosa y textura fibrosa.
5.70	25.3	Roca Volcánica Dacita	Roca de color rosáceo, por presencia de ortosa y cristales de por presencia de ortosa y cristales de cuarzo, fractura moderada por tramos, óxidos en las caras de las fracturas, alteración de sus minerales accesorios en arcillas.
25.3	46.0	Roca Dacita fragmentada	Roca completamente alterada muy fracturada y fragmentada, con un grado de dureza suave o blanda.
46.0	47.3	Roca Dacita fracturada	Roca dura, fracturada con presencia de óxidos de hierro.
47.3	50.4	Suelo Residual (SM)	Suelo residual de roca dacita, originadas por la desintegración de esta roca, de color rojizo.

Tabla 4-7 Perforación dcd-c-02 (Expediente Técnico Presa Coltani, 2013)

CORRIDA (m)		CLASIFICACION VISUAL (SUCS)	LITOLOGIA
DE	A		
0.00	12.25	Roca Volcánica Dacita	Roca ígnea volcánica de color gris, con minerales accesorios tabulares y cristales de cuarzo; mínima presencia de ortosa; la roca se encuentra alterada y en tramos el material está triturado.
12.25	21.50	Roca Volcánica Dacita	Roca ígnea volcánica, color gris rosáceo, minerales accesorios y cristales de cuarzo, con presencia de ortosa y fragmentos líticos, equigranular, con óxidos en las caras de las fracturas.
21.50	25.65	Roca Volcánica Dacita	Roca ígnea volcánica, color gris verdusco, bastante fracturada, minerales accesorios, cristales de cuarzo, textura tuffítica, equigranular, con influencia de ignimbrita.
25.65	37.63	Roca Volcánica Dacita	Roca completamente alterada, triturada, material arcilloso con arena.
37.63	40.95	Roca Volcánica Dacita	Roca muy fracturada y fragmentada, con clastos que presentan minerales de ortosa y micas.

Tabla 4-8 Perforación dcd-c-03 (Expediente Técnico Presa Coltani, 2013)

CORRIDA (m)		CLASIFICACION VISUAL (SUCS)	LITOLOGIA
DE	A		
0.00	4.40	Pt	Turba, suelo altamente orgánico, identificable por su color oscuro, olor, sensación esponjosa y textura fibrosa.
6.80	10.55	Roca Volcánica Dacita	Roca ígnea volcánica de color gris, con presencia de cristales de cuarzo, muy fracturada, de dureza media.
10.55	23.50	Roca Volcánica Dacita	Roca ígnea dacita, de color gris rosácea, mínima presencia de ortosa, con minerales de cuarzo, roca compacta.
23.50	36.60	Roca Volcánica Dacita	Roca ígnea volcánica, de color gris verdusco, textura tuffítica equigranular, presencia de minerales accesorios y plagioclasas cálcica y en mayor proporción cristales de cuarzo.
36.60	44.10	Roca Volcánica Dacita	Roca ígnea volcánica, triturada.
44.10	50.00	Sin recuperación.	Se pierde el retorno de agua y no se recupera muestra.

Tabla 4-9 Perforación dcd-c-04 (Expediente Técnico Presa Coltani, 2013)

CORRIDA (m)		CLASIFICACION VISUAL (SUCS)	LITOLOGIA
DE	A		
0.00	8.70	Pt	Turba, suelo altamente orgánico, identificable por su color oscuro, sensación esponjosa y textura fibrosa.
8.70	13.55	Roca Volcánica Dacita	Roca ígnea volcánica, de color gris verdoso, muy fracturada y en algunos tramos triturada, textura tufítica.
13.55	29.00	Roca Volcánica Dacita	Roca ígnea volcánica de color gris, textura tufítica equigranular, con influencia de ignimbrítica, con cristales de cuarzo y alteración de minerales formando arcilla.
29.00	38.00	Roca Volcánica Dacita	Roca ígnea volcánica de color gris verdoso, moderadamente fracturada, roca de alteración leve a moderada, textura tufítica equigranular, con presencia de cristales de cuarzo.
38.00	44.80	Roca Volcánica Dacita	Roca ígnea volcánica de color gris verdoso, textura tufítica equigranular, con presencia de cristales de cuarzo y en tramos roca triturada.
44.80	47.50	Roca Volcánica Dacita	Roca dura, fracturada con presencia de óxidos de hierro.
47.50	60.20	Suelo Residual (SM)	Suelo residual de roca dacita, originadas por la desintegración de esta roca, de color rojizo.

Tabla 4-10 Perforación dcd-c-05 (Expediente Técnico Presa Coltani, 2013)

CORRIDA (m)		CLASIFICACION VISUAL (SUCS)	LITOLOGIA
DE	A		
0	12.6	Pt	Material de cobertura, Turba, suelo altamente orgánico, identificable por su color oscuro, olor, sensación esponjosa y textura fibrosa.
12.6	34.00	Roca Volcánica Dacita	Roca Volcánica en horizontes compactos y fracturados.
34.00	49.15	Roca ígnea Granito	Granito, roca intrusiva alterada y oxidada, horizontes compactos y fracturados.
49.15	60.00	Andesita	Roca volcánica en horizontes fracturados y triturados.

Tabla 4-11 Perforación dcd-c-06 (Expediente Técnico Presa Coltani, 2013)

CORRIDA (m)		CLASIFICACION VISUAL (SUCS)	LITOLOGIA
DE	A		
0	9.15	Pt	Material de cobertura, Turba, suelo altamente orgánico, identificable por su color oscuro, olor, sensación esponjosa y textura fibrosa.
9.15	27.15	Roca Volcánica Dacita	Roca Volcánica en horizontes compactos y fracturados.
27.15	40.20	Roca ígnea Granito	Granito, roca intrusiva alterada y oxidada, horizontes compactos y fracturados.
40.2	50.00	Roca Volcánica Andesita	Roca volcánica en horizontes fracturados y triturados.

Tabla 4-12 Perforación dcd-c-07 (Expediente Técnico Presa Coltani, 2013)

CORRIDA (m)		CLASIFICACION VISUAL (SUCS)	LITOLOGIA
DE	A		
0.00	0.85	SM	Material de cobertura, mezcal de arenas y limos, mal graduada.
0.85	6.50	Pt	Turba, suelo altamente orgánico, identificable por su color oscuro, sensación esponjosa y textura fibrosa.
6.50	26.45	Roca Volcánica Dacita	Roca ígnea volcánica, de color gris rosáceo con presencia de ortosa, cuarzo, biotitas y feldespatos; textura tufítica, óxidos en las caras de las fracturas.
26.45	41.00	Roca Volcánica Dacita	Roca ígnea volcánica, de color gris, con biotita, fragmentos líticos y cristales de cuarzo, roca bastante fracturada, en algunos tramos triturada, presencia de minerales alterados a arcillas.

Tabla 4-13 Perforación dcd-c-08 (Expediente Técnico Presa Coltani, 2013)

CORRID		CLASIFICACION	LITOLOGIA
A (m)		VISUAL (SUCS)	
DE	A		
0	8.50	Pt	Turba, suelo altamente orgánico, identificable por su color oscuro, sensación esponjosa y textura fibrosa.
8.5	25.4	Roca Volcánica	Roca ígnea volcánica de color gris, textura tufítica equigranular, fracturada, minerales accesorios y óxidos en las caras de las fracturas.
	5	Dacita	
25.	29.4	Panizo	Pequeño tramo recuperado, de material alterado (panizo), fracturamiento y/o falla del estrato.
45	5		
29.	35.8	Roca Volcánica	Roca ígnea volcánica de color gris, textura tufítica equigranular, con influencia de ignimbrítica, presencia de cuarzo y minerales accesorios, moderadamente fracturada.
45	5	Dacita	
35.	37.4	SC	Arena arcillosa, mezcla mal graduada de arena y arcilla, producto de la desintegración de la dacita.
85	5		
37.	42.4	Roca Volcánica	Roca ígnea volcánica, de color gris rojizo, textura tufítica equigranular, fuertemente fracturada y oxidada.
45	0	Andesita	
42.	50.8	Roca Volcánica	Roca ígnea volcánica, de color gris, completamente alterada y fragmentada.
40	0	Andesita	

Dados los resultados del estudio de Perforaciones Diamantinas se puede llegar a las siguientes observaciones. Estas se realizaron a una profundidad alrededor de 40-60 m e igualmente presentan un nivel freático superficial que es alrededor de una profundidad de 1 - 2.5 m. La litología encontrada en los diversos puntos a diferentes distancias es principalmente suelo orgánico, roca volcánica dacita, roca volcánica dacita fragmentada, roca volcánica dacita fracturada y suelo residual. También, se encuentra roca ígnea granito, andesita y litología sin recuperación, pero con menos recurrencia. Con estas características se nota, en un primer vistazo, que el suelo en donde se realizara la presa Coltani no es uno que contemple características óptimas para la realización de este tipo de proyecto.

Ensayos de Laboratorio

Con las muestras alteradas e inalteradas obtenidas durante la exploración de campo se ejecutaron los siguientes ensayos de laboratorio:

Contenido de humedad natural (ASTM-D-2216)

- Análisis granulométrico por tamizado (ASTM –D-422)
- Límites de consistencia Atterberg (ASTM-D-4318)
- Clasificación de Suelos (ASTM – D- 2487)
- Proctor Estándar (ASTM-D-698)
- Proctor Modificado (ASTM-D-D1557)
- C.B.R. (ASTM-D-4429)
- Densidad Relativa (ASTM-D-2049)
- Permeabilidad Pared Flexible (ASTM-D-5084)
- Compresión Triaxial Estático UU (ASTM-D-2850)
- Compresión Triaxial Estático CU (ASTM-D-4767)
- Consolidación (ASTM-D-2435)
- Corte Directo (ASTM-D-3080)
- Propiedades Físicas de la Roca (Peso Específico, Absorción, Gravedad Especifica) (ASTM-C-9783)
- Carga Puntual (ASTM-D-5731)
- Compresión Simple (ASTM-D-2938)
- Peso Unitario (ASTM-D-2937)
- Abrasión los Ángeles (ASTM-C-535)
- Durabilidad Sulfato de Mg. (ASTM-C-88)

Los resultados de los ensayos estándar correspondientes al eje y vaso de la presa Coltani se muestran a continuación:

Tabla 4-14 Resumen de resultados de ensayos Estándar Eje de la Presa (Expediente Técnico Presa Coltani, 2013)

Calicata	Muestra	Profundidad	SUCS	AASHTO	% Grava	% Arena	% Finos	LL	IP	C. Humedad (%)
C-1	M - 1	0.0-1.2	PT	-	-	-	-	-	-	-
C-2	M - 1	0.0-1.9	PT	-	-	-	-	-	-	-
C-3	M - 1	0.0-0.9	PT	-	-	-	-	-	-	-
C-4	M - 1	0.0-0.2	SM	A-2-4	22.7	43.3	34.0	NP	NP	30.7
C-5	M-2	0.2-1.4	GM	A-1b	46.2	40.3	13.5	NP	NP	15.0
C-6	M - 1	0.0-0.6	PT	-	-	-	-	-	-	-
C-7	M - 1	0.0-1.5	PT	-	-	-	-	-	-	-
C-8	M - 1	0.0-2.3	PT	-	-	-	-	-	-	-
C-9	M - 1	0.0-0.8	PT	-	-	-	-	-	-	-
C-10	M - 1	0.0-2.0	PT	-	-	-	-	-	-	-
C-11	M - 1	0.0-3.0	PT	-	-	-	-	-	-	-
C-12	M - 1	0.0-0.8	PT	-	-	-	-	-	-	-
C-13	M - 1	0.0-0.9	PT	-	-	-	-	-	-	-

Tabla 4-15 Resumen de resultados de ensayos Estándar Vaso de la Presa (Expediente Técnico Presa Coltani, 2013)

Calicata	Muestra	Profundidad	SUCS	AASHTO	% Grava	% Arena	% Finos	LL	IP	C. Humedad (%)
C-V-1	M-1	0.00-0.60	ML	A-4	3.3	39.2	57.4	N	N	56.7
								P	P	
	M - 2	0.60-1.50	PT	-	-	-	-	N	N	-
								P	P	
C-V-2	M - 1	0.00-1.60	PT	-	-	-	-	N	N	-
								P	P	
C-V-3	M - 1	0.00-1.50	PT	-	-	-	-	N	N	-
								P	P	
C-V-4	M - 1	0.00-0.30	PT	-	-	-	-	N	N	-
								P	P	
	M-2	0.30-1.10	ML	A-4	1.4	45.2	53.3	N	N	31.2
								P	P	
C-V-5	M-1	0.20-1.40	SM	A-4	12.0	50.8	37.1	N	N	53.3
								P	P	

C-V-6	M - 1	0.10-1.30	PT	-	-	-	-	N	N	-
								P	P	
	M-1	0.10-1.30	SM	A-2-4	30.1	44.9	25.0	N	N	23.5
								P	P	
C-V-7	M - 1	0.00-0.60	SM	A-4	8.1	55.9	36.0	N	N	39.7
								P	P	
	M - 2	0.60-1.40	PT	-	-	-	-	N	N	0.0
								P	P	
C-V-8	M - 1	0.00-0.60	SM	A-4	8.1	55.9	36.0	N	N	39.7
								P	P	
	M - 2	0.60-1.20	PT	-	-	-	-	N	N	-
								P	P	
C-V-9	M-1	0.00-0.25	SP- SM	A-1b	14.6	76.0	9.5	N	N	19.6
								P	P	
	M - 2	0.25-1.40	PT	-	-	-	-	N	N	-
								P	P	
C-V-10	M - 1	0.00-1.50	PT	-	-	-	-	N	N	-
								P	P	

Tabla 4-16 Resumen de ensayos de densidad in-situ (Expediente Técnico Presa Coltani, 2013)

Zona	Calicata / Muestra	Profundidad (m)	Humedad (%)	Densidad Humedad (gr/cm³)	Densidad Seca (gr/cm³)
CALICATAS EJE DE PRESA	C - 2 / M-1	0.00-1.90	27.39	1.54	1.21
CALICATAS EJE DE PRESA	C - 4 / M-2	0.20-1.40	27.48	1.67	1.31
CALICATAS EJE DE PRESA	C - 5 / M-1	0.00-0.60	22.89	1.48	1.21
CALICATAS EJE DE PRESA	C - 7 / M-1	0.00-2.30	37.13	1.65	1.21
CALICATAS EJE DE PRESA	C - 9 / M-1	0.00-2.00	28.19	1.69	1.32
CALICATAS EJE DE PRESA	C - 10 / M-1	0.00-3.00	24.37	1.56	1.25
CALICATAS EJE DE PRESA	C - 11 / M-1	0.00-0.80	30.65	1.65	1.26

VASO PRESA	C-V-1 / M1	0.00-0.60 m	16.58	1.85	1.58
VASO PRESA	C-V-2 / M1	0.00-1.60 m	21.68	1.32	1.09
VASO PRESA	C-V-3 / M1	0.00-1.50	14.63	1.53	1.33
VASO PRESA	C-V-6 / M-1	0.10-1.30	28.42	2.04	1.59
VASO PRESA	C-V-7 / M1	0.00-0.60 m	22.30	2.01	1.65
VASO PRESA	C-V-8 / M1	0.00-0.60	16.00	1.42	1.22
VASO PRESA	C-V-9 / M-2	0.25-1.40	25.73	1.53	1.22

Tabla 4-17 Resumen de resultados de ensayos de peso unitario en suelos cohesivos - eje presa (Expediente Técnico Presa Coltani, 2013)

ZONA	Sondaje	Muestra	Profundidad (m)	Peso Unitario (gr/cm³)	Humedad (%)
VASO PRESA	C-V -01	M - 1	0.00-1.20	0.69	118.42
	C-V -03	M - 1	0.00-0.90	0.75	106.08
	C-V -06	M - 1	0.00-1.50	0.66	125.98
	C-V -08	M - 1	0.00-0.85	0.74	99.04
	C-V -12	M - 1	0.00-0.90	0.58	146.36

Tabla 4-18 Resumen de resultados de ensayos de compresión simple en roca - eje presa (Expediente Técnico Presa Coltani, 2013)

Cantera	Muestra	Profundidad (m)	Resistencia a la Compresión Simple (Mpa)
Perforación Eje Presa	DCD-C-02 M-1	20.10-20.49	29.34
Perforación Eje Presa	DCD-C-01 M-2	20.40-20.84	20.06

Para una mejor visión de las propiedades del suelo y su ubicación a lo largo de la zona de la futura presa Coltani, se tienen los siguientes planos de la sección de la presa en el eje de la misma. Estas están divididas en 2 cortes los cuales son: 1-1 y 2-2 brindando una visión más amplia de las características de la zona.



Figura 4-2 Ubicación (Expediente técnico presa Coltani, 2013)

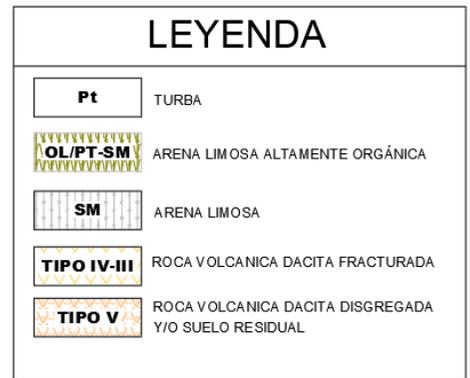
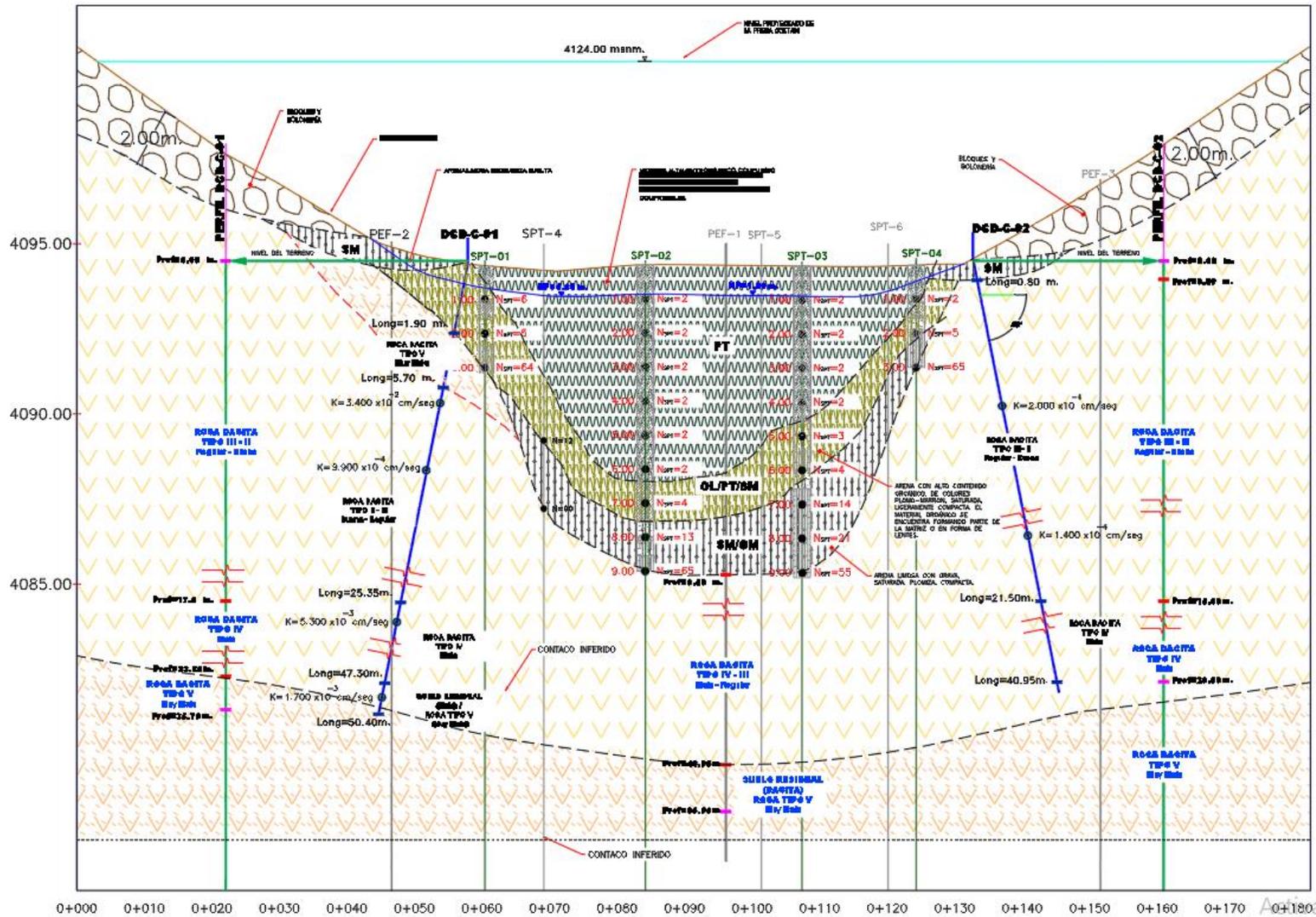
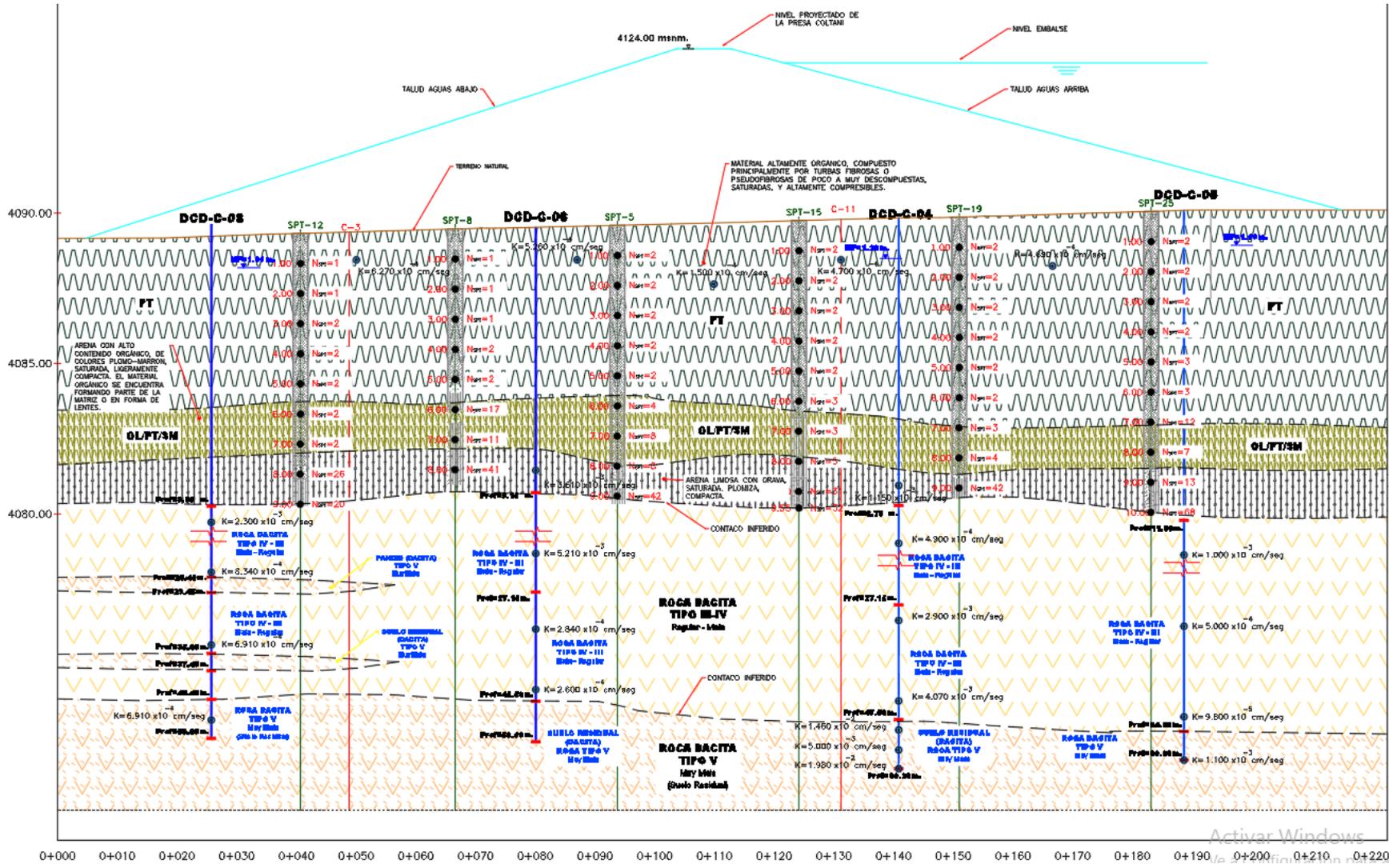


Figura 4-3 Sección Geotecnia 1-1 Eje de Presa (Expediente Técnico Presa Coltani, 2013)



LEYENDA

Pt	TURBA
OL/PT-SM	ARENA LIMOSA ALTAMENTE ORGANICA
SM	ARENA LIMOSA
TIPO IV-III	ROCA VOLCANICA DACITA FRACTURADA
TIPO V	ROCA VOLCANICA DACITA DISGREGADA Y/O SUELO RESIDUAL

LEYENDA

P	PERFORACION
SW	SPT WASH BORING
⊙	ENSAYO DE PERMEABILIDAD
---	CONTACTO
N.F.	NIVEL FREATICO

Escala Gráfica

0.0	15.0	30.0	45.0	60.0	75.0
Escala 1:750					

Escala Gráfica

0.0	3.0	6.0	9.0	12.0	15.0
Escala 1:150					

Figura 4-4 Sección Geotecnia 2-2 Eje de Presa (Expediente Técnico Presa Coltani, 2013)

En el análisis de estas secciones geotécnicas, podemos observar la composición de suelos a lo largo de la presa y en profundidad. Esta básicamente se encuentra conformada por turba, arena limosa altamente orgánica, arena limosa, roca volcánica dacita fracturada y roca volcánica dacita disgregada y/o suelo residual, estando mencionados conforme la profundidad aumenta. Con esto podemos darnos una idea mejor y corroborar las investigaciones geotécnicas de la presa Coltani.

4.3 ANÁLISIS DE INFILTRACIÓN

4.3.1 Definición de Parámetros Hidráulicos - Condiciones del terreno

Aparte de estudiar los parámetros geotécnicos de la zona de la Presa Coltani, también se realizaron estudios hidráulicos con el objetivo de verificar que las condiciones del suelo son óptimas para poder realizar esta clase de proyecto. Específicamente se determinó, y se hizo énfasis, a la conductividad hidráulica en la zona (K), la cual representa la mayor o menor facilidad con la que un medio permite pasar el agua a través del mismo por una unidad de área transversal a la dirección del flujo. Se hizo dos tipos de ensayos de permeabilidad en la zona los cuales fueron: Permeabilidad en Pozo Lefranc y Lugeon y Permeabilidad en Calicatas.

Antes de entrar en detalle de los sondeos realizados en la localización de Presa Coltani, hay que tener en cuenta los criterios de consideración de permeabilidad baja, media y alta. Esto con el objetivo de tener un mayor entendimiento de los datos a analizar y una mejor visión del tema a tratar. A continuación, se presenta el siguiente cuadro:

Tabla 4-19 Clases de permeabilidad de los suelos para obras de ingeniería civil (FAO, 2020)

Clases de permeabilidad de los suelos	Coeficiente de permeabilidad (K en m/s)		Coeficiente de permeabilidad (K en cm/s)	
	Límite Inferior	Limite Superior	Límite Inferior	Limite Superior
Permeable	2.00E-07	2.00E-01	2.00E-05	2.00E+01
Semipermeable	1E-11	1.00E-05	1.00E-09	1.00E-03
Impermeable	1E-11	5.00E-07	1.00E-09	5.00E-05

Analizando este cuadro concluimos que mientras a un menor valor en la conductividad hidráulica (k) el suelo tiene mayor impermeabilidad. Usualmente una baja impermeabilidad la encontramos en valores cuyos k son entre 10^{-1} y 10^{-5} mientras que una mayor

impermeabilidad en el suelo lo vemos en valores entre 10^{-5} y 10^{-9} . Teniendo estos criterios entendidos, procedemos al análisis de los datos hidráulicos del suelo de la presa Coltani.

Ensayos de Permeabilidad en Pozo Lefranc y Lugeon

Los ensayos de permeabilidad de estos tipos permiten determinar el nivel de permeabilidad en suelos o rocas altamente fracturadas (Lefranc) y en roca (Lugeon). El ensayo de Lefranc se utiliza en suelos permeables o semipermeables de tipo granular, situados por debajo del nivel freático y en rocas muy fracturadas. Este consiste en saturar el suelo hasta que el aire de los vacíos sea expulsado permitiendo una infiltración más uniforme en el suelo. Esto conllevará a poder introducir un caudal conocido de manera que se mantenga un nivel constante dentro de la perforación. Finalmente, al alcanzar la estabilidad del proceso, con la medida conocida del caudal, la longitud y el diámetro de perforación, es posible calcular la permeabilidad del suelo. Por otro lado, el ensayo Lugeon se realiza mediante sondeos, únicamente en rocas consolidadas para medir la permeabilidad. Este consiste en medir el volumen de agua que se inyecta durante un tiempo, obteniendo el caudal en un tramo de sondeo con una longitud y presión específica.

Este ensayo realizado en la zona de la presa Coltani tuvo como objetivo conocer la propiedad que tiene los materiales de fundación de transmitir agua. En gran mayoría los ensayos fueron del tipo Lefranc, el cual cumple dadas las características del terreno, y en tramos específicos se usó el ensayo Lugeon. A continuación, se presentan los datos y resultados de dicho estudio.

Tabla 4-20 Resultados de Permeabilidad - Sondaje dcd-c-01 (Expediente Técnico Presa Coltani, 2013)

N° ENSAYO	TRAMO (m)		K (cm/seg)	ROCA
	DE	A		
LCC*-1	4.5	7.5	3.37E-02	Roca Dacita muy fracturada con coeficiente de permeabilidad media
LCC-2	7.5	10	9.94 E-04	Roca Dacita muy fracturada con coeficiente de permeabilidad baja
LCC-3	10	13	6.01E-04	Roca Dacita muy fracturada con coeficiente de permeabilidad baja
LCC-4	24	27	5.29E-03	Roca Dacita muy fracturada con coeficiente de permeabilidad media
LCC-5	27	30	1.23E-03	Roca Dacita muy fracturada con coeficiente de permeabilidad media

LCC-6	30	33	5.36E-04	Roca Dacita muy fracturada con coeficiente de permeabilidad baja
LCC-7	33	36	1.56E-03	Roca Dacita muy fracturada con coeficiente de permeabilidad media
LCC-8	36	39	3.52E-03	Roca Dacita muy fracturada con coeficiente de permeabilidad media
LCC-9	39	42	3.56E-03	Roca Dacita muy fracturada con coeficiente de permeabilidad media
LCC-10	42	45	5.51E-03	Roca Dacita muy fracturada con coeficiente de permeabilidad media
LCC-11	45	50	1.68E-03	Suelo residual de Dacita con coeficiente de permeabilidad media

Tabla 4-21 Resultados de Permeabilidad - Sondaje dcd-c-02 (Expediente Técnico Presa Coltani, 2013)

N° ENSAYO	TRAMO (m)		K (cm/seg)	ROCA
	DE	A		
LCC-1	0	3	3.39E-04	Roca dacita muy fracturada con coeficiente de permeabilidad baja
LCC-2	3	6	2.90E-04	Roca dacita muy fracturada con coeficiente de permeabilidad baja
LCC-3	6	9	1.74E-04	Roca dacita muy fracturada con coeficiente de permeabilidad baja
LCC-4	9	12	2.27E-04	Roca dacita muy fracturada con coeficiente de permeabilidad baja

Tabla 4-22 Resultados de Permeabilidad – Sondaje dcd-c-03 (Expediente Técnico Presa Coltani, 2013)

N° ENSAYO	TRAMO		UNIDAD LUGERON	K (cm/seg)	ROCA
	DE	A			
LUG-01	12	17	4.52	5.87E-05	Roca Dacita medianamente fracturada, de permeabilidad baja.
LUG-02	17	22	4.68	6.08E-05	Roca Dacita medianamente fracturada, de permeabilidad baja.

LUG-03	22	25	1.87	2.43E-05	Roca Dacita medianamente fracturada, de permeabilidad baja.
LUG-04	25	30	1.91	2.49E-05	Roca Dacita medianamente fracturada, de permeabilidad baja.
LUG-05	30	35	1.17	1.52E-05	Roca Dacita medianamente fracturada, de permeabilidad baja.

Tabla 4-23 Resultados de Permeabilidad - Sondaje dcd-c-04 (Expediente Técnico Presa Coltani, 2013)

N° ENSAYO	TRAMO (m)		K (cm/seg)	ROCA
	DE	A		
LCC-01	8	11	1.15E-03	Roca Dacita muy fracturada con coeficiente de permeabilidad media
LCC-02	14	17	4.90E-04	Roca Dacita muy fracturada con coeficiente de permeabilidad baja
LCC-03	23	26	5.76E-03	Roca Dacita muy fracturada con coeficiente de permeabilidad media
LCC-04	26	29	2.90E-03	Roca Dacita muy fracturada con coeficiente de permeabilidad media
LCC-05	29	33	1.65E-03	Roca Dacita muy fracturada con coeficiente de permeabilidad media
LCC-06	33	36	3.13E-04	Roca Dacita muy fracturada con coeficiente de permeabilidad baja
LCC-07	26	39	3.95E-03	Roca Dacita muy fracturada con coeficiente de permeabilidad media
LCC-08	39	42.3	4.07E-03	Roca dacita muy fracturada con coeficiente de permeabilidad media
LCC-09	42.3	48	5.69E-04	Roca Dacita muy fracturada con coeficiente de permeabilidad baja
LCC-10	48	51	1.46E-02	Suelo residual de Dacita con coeficiente de permeabilidad media
LCC-11	51	54.4	6.13E-03	Suelo residual de Dacita con coeficiente de permeabilidad media
LCC-12	54	57	4.66E-03	Suelo residual de Dacita con coeficiente de permeabilidad media
LCC-13	57	60.2	1.98E-02	Suelo residual de Dacita con coeficiente de permeabilidad media

Tabla 4-24 Resultados de Permeabilidad - Sondaje dcd-c-05 (Expediente Técnico Presa Coltani, 2013)

N° ENSAYO	TRAMO		UNIDAD LUGEON	K (cm/seg)	ROCA
	DE	A			
LCC-01	11.15	13.7	–	8.80E-04	Roca Dacita muy fracturada de baja permeabilidad
LCC-02	15.6	18.6	–	1.44E-03	Roca Dacita muy fracturada de baja permeabilidad media
LCC-03	18.6	21.6	–	1.13E-03	Roca Dacita muy fracturada de baja permeabilidad media
LCC-04	21.6	24.6	–	6.67E-04	Roca Dacita muy fracturada de baja permeabilidad
LCC-05	24.6	27.6	–	8.33E-04	Roca Dacita muy fracturada de baja permeabilidad
LCC-06	27.6	30.6	–	7.16E-04	Roca Dacita muy fracturada de baja permeabilidad
LUG-01	31.2	37	15.79	2.05E-04	Brecha volcánica de permeabilidad baja
LCC-07	37	39.8	–	5.81E-04	Roca Granito muy fracturada de baja permeabilidad
LCC-08	39.6	42.6	–	3.94E-04	Roca Granito alterado de permeabilidad baja
LUG-02	43	50	7.54	9.80E-05	Roca Granito alterado de permeabilidad baja
LCC-09	50.6	53.6	–	2.27E-03	Roca residual
LCC-10	53.6	60	–	1.10E-03	Roca residual

Tabla 4-25 Resultados de Permeabilidad - Sondaje dcd-c-07 (Expediente Técnico Presa Coltani, 2013)

N° ENSAYO	TRAMO (m)		K (cm/seg)	ROCA
	DE	A		
LCC-01	6	8.7	3.61E-03	Roca Dacita muy fracturada con coeficiente de permeabilidad media
LCC-02	16	19	9.25E-04	Roca Dacita muy fracturada con coeficiente de permeabilidad baja
LCC-03	19	25	5.21E-03	Roca Dacita muy fracturada con coeficiente de permeabilidad media
LCC-04	25	30	1.15E-04	Roca Dacita muy fracturada con coeficiente de permeabilidad baja
LCC-05	30	33	2.84E-04	Roca Dacita muy fracturada con coeficiente de permeabilidad baja
LCC-06	33	36	1.59E-04	Roca Dacita muy fracturada con coeficiente de permeabilidad baja

LCC-07	39	41	2.60E-04	Roca Dacita muy fracturada con coeficiente de permeabilidad baja
---------------	----	----	----------	--

Tabla 4-26 Resultados de Permeabilidad - Sondaje dcd-c-08 (Expediente Técnico Presa Coltani, 2013)

N° ENSAYO	TRAMO (m)		K (cm/seg)	ROCA
	DE	A		
LCC-01	14	17	2.30E-03	Roca Dacita muy fracturada con coeficiente de permeabilidad media

Respecto a los resultados obtenidos de los ensayos de permeabilidad en pozo Lefranc y Lugeon se levantan las siguientes observaciones. El terreno, en general, tiene características de permeabilidad baja y media, siendo esta ultima la más recurrente. Esto indica que el terreno no cumple con una permeabilidad ideal para este tipo de proyectos y se debería tener en cuenta métodos de mejoramiento de terreno para evitar problemas en el futuro. Esto se justifica, además, numéricamente ya que el K (cm/seg), cantidad de agua que pasa a través del suelo está alrededor de datos números alrededor de 10^{-2} y 10^{-5} lo cual no son valores muy favorables al buscar un terreno impermeable.

Ensayos de Permeabilidad en Calicatas

La metodología que fue usada para la determinación de los parámetros de conductividad hidráulica fue la del pozo abierto (Auger Hole), la cual es comúnmente usada cuando el nivel freático se encuentra relativamente superficial. El principio del método es el de excavar un pozo hasta la profundidad de ensayo deseada, extraer el agua hasta que este 40 cm por debajo del nivel freático, y medir el tiempo de recuperación en los 10cm siguientes. El cálculo de la permeabilidad se realizará usando las relaciones propuestas por Hooghoudt y Ernst.

Este ensayo se realizó con el objetivo de conocer las propiedades que tienen los materiales de las capas superficiales de transmitir el agua. Se realizaron ensayos de permeabilidad en las excavaciones del eje y vaso de presa. A continuación, se presentan los datos y resultados del estudio.

Tabla 4-27 Resultados de permeabilidad en calicatas del Eje y Vaso (Expediente Técnico Presa Coltani, 2013)

Calicata	Profundidad	Conductividad Hidráulica (cm/s)	Observaciones (Acorde a Casagrande & Fadum, 1940)
C-C-1	0.1-1.2	5.32E-04	Baja permeabilidad y regular capacidad drenante.
C-C-2	0.0-1.9	3.45E-04	Baja permeabilidad y regular capacidad drenante.
C-C-3	0.0-0.9	6.27E-04	Baja permeabilidad y regular capacidad drenante.
C-C-4	0.0-1.4	7.01E-04	Baja permeabilidad y regular capacidad drenante.
C-C-5	0.0-0.6	2.04E-03	Mediana permeabilidad y buena capacidad drenante.
C-C-6	0.0-1.5	2.53E-04	Baja permeabilidad y regular capacidad drenante.
C-C-7	0.0-2.3	4.20E-04	Baja permeabilidad y regular capacidad drenante.
C-C-8	0.0-.85	5.26E-04	Baja permeabilidad y regular capacidad drenante.
C-C-9	0.0-2.0	3.90E-04	Baja permeabilidad y regular capacidad drenante.
C-C-10	0.0-3.0	1.67E-04	Baja permeabilidad y regular capacidad drenante.
C-C-11	0.0-0.8	4.69E-04	Baja permeabilidad y regular capacidad drenante.
C-C-12	0.0-0.9	4.69E-04	Baja permeabilidad y regular capacidad drenante.
C-CV-1	0.0-0.7	8.99E-04	Baja permeabilidad y regular capacidad drenante.
C-CV-2	0.0-.82	1.11E-03	Mediana permeabilidad y buena capacidad drenante.
C-V-3	0.0-0.9	9.51E-04	Baja permeabilidad y regular capacidad drenante.
C-V-4	0.0-.64	1.19E-03	Mediana permeabilidad y buena capacidad drenante.
C-V-5	0.0-.10	2.49E-04	Baja permeabilidad y regular capacidad drenante.
C-V-6	0.0-1.2	6.77E-04	Baja permeabilidad y regular capacidad drenante.

C-V-7	0.0-1.2	3.51E-04	Baja permeabilidad y regular capacidad drenante.
C-V-8	0.0-0.6	6.41E-04	Baja permeabilidad y regular capacidad drenante.
C-V-9	0.0-1.2	2.20E-04	Baja permeabilidad y regular capacidad drenante.
C-V-10	0.0-1.3	7.93E-04	Baja permeabilidad y regular capacidad drenante.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos de los ensayos de permeabilidad en calicatas se obtienen las siguientes observaciones. Las características de permeabilidad se mantienen constantes con la del ensayo anterior en las cuales principalmente se obtiene una permeabilidad baja y media, siendo esta ultima la predominante. Además, respecto a la capacidad de drenaje, la zona del proyecto cuenta con una buena y regular capacidad de drenaje, siendo esta ultima la predominante teniendo en cuenta los distintos puntos.

Los datos obtenidos servirán para realizar los análisis de infiltración tanto en una condición inicial (sin pantalla impermeable) y en condición estabilizada (con pantalla impermeable). Este análisis infiltración se efectuará para las condiciones más riesgosas y optimas teniendo en cuenta los datos de la conductividad hidráulica.

Se utilizarán los datos obtenidos de los ensayos de Lefranc y Lugeon debido a que este si alcanza las profundidades que requerimos para realizar nuestro análisis. Debido a que se hicieron diversos sondeos para la conductividad hidráulica del terreno, se recurrió a sacar un promedio para así tener una visión más amplia y datos más cercanos a la realidad de la obra. Para los dos primeros análisis de infiltración se determinó el Promedio General K con el cual se trabajará en los diferentes estratos definidos. Por otro lado, para el análisis en condiciones riesgosas se optó por utilizar el mayor promedio de los diferentes sondeos (K Permeables) mientras que para las condiciones óptimas se usó el menor (K Impermeables)

Tabla 4-28 Tabla de datos de Conductividad Hidráulica (K) a utilizar en los análisis (Elaboración propia, 2020)

	Profundidad (m)	Promedio General K	K Permeables	K Impermeables
Estrato 1	0 – 10	5.59E-03	1.73E-02	2.68E-04
Estrato 2	10 – 24	1.49E-03	3.13E-03	4.79E-05
Estrato 3	24 - 60	1.94E-03	5.85E-03	2.01E-05

4.3.2 Cálculo del Análisis de Infiltración - Condición Inicial

4.3.2.1 Cálculo de Análisis de Infiltración – Condición Inicial (Parámetros Hidráulicos Promediados)

Para este análisis de Infiltración utilizando el programa SLIDE, se usaron parámetros geotécnicos del suelo como la cohesión, phi y el peso unitario de cada uno de los estratos comprendidos de la presa de tierra. Además, con respecto a los parámetros hidráulicos se utilizó la conductividad hidráulica de cada uno de ellos.

Parámetros geotécnicos:

Peso específico: Relación entre el peso del suelo y su volumen. Es decir, el peso de una sustancia por unidad de volumen.

Cohesión: Capacidad de las partículas de un terreno en mantenerse unidas por medio de sus fuerzas internas.

Angulo de fricción interna (phi): Resistencia al deslizamiento causado por la fricción que hay entre las superficies de contacto de las partículas y de su densidad.

Material Name	Color	Unit Weight (kN/m ³)	Strength Type	Cohesion (kN/m ²)	Phi	Water Surface	Ru
Roca Volcánica Dacita		26.5	Mohr-Coulomb	171	22.06	None	0
GP-GM		21	Mohr-Coulomb	10	33	None	0
OH - Estado Natural		15	Mohr-Coulomb	40	8	None	0
Filtros		17	Mohr-Coulomb	0	33	None	0
ML / SM con gravas		17.4	Mohr-Coulomb	15	25	None	0
OH - Consolidado		15	Mohr-Coulomb	75	15	None	0

Figura 4-5 Parámetros Geotécnicos (Expediente Técnico Presa Coltani, 2013)

Para realizar el análisis de infiltración, con la primera configuración utilizando las diferentes conductividades hidráulicas (Ks) extraído de los cuadros generados por el proyecto, se aplicó el promedio de los valores para distintas profundidades del terreno los cuales fueron insertados en el programa SLIDE procesando la información para el análisis.

Tabla 4-29 Tabla con Valores de Ks Promediados (Elaboración propia, 2020)

Conductividad Hidráulica (Ks)		
ESTRATOS	PROFUNDIDADES	PROMEDIO GENERAL
Estrato N° 1	0 – 10 m	5.59E-03
Estrato N° 2	10 – 24 m	1.49E-03
Estrato N° 3	24 - 60 m	1.94E-03

Según la Tabla 4-29, se puede visualizar que los Ks no son valores muy altos, es decir, su permeabilidad es media o baja por lo que el agua puede filtrar de manera relativamente fácil. Luego de procesar la información insertada se pudo visualizar, mediante los vectores generados por el programa, la dirección por la cual está circulando el agua. La imagen indica presencia de agua circulando debajo de la presa. En relación a esto se debería realizar una colocación de soportes debajo de la presa, como es la utilización de la técnica de Pilotes Secantes, para así reducir o impedir el paso del agua.

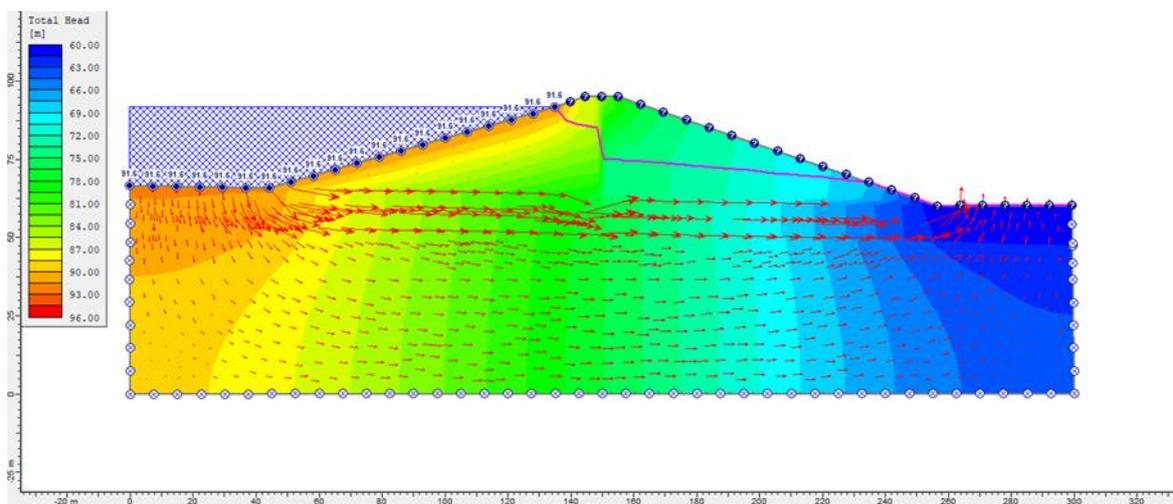


Figura 4-6 Vectores de Circulación del Agua (Parámetros Hidráulicos Promediados) (Elaboración propia, 2020)

4.3.2.1 Cálculo de Análisis de Infiltración – Condición Inicial (Parámetros Hidráulicos Menores)

Para realizar el análisis de infiltración con la segunda configuración, utilizando las diferentes conductividades hidráulicas (Ks) extraído de los cuadros generados por el proyecto, se utilizó los menores valores para distintas profundidades del terreno. Estos fueron insertados en el programa SLIDE, procesando la información para el análisis.

Tabla 4-30 Tabla con Valores de Ks (Menores) (Elaboración propia, 2020)

Conductividad Hidráulica (Ks)		
ESTRATOS	PROFUNDIDADES	PROMEDIO GENERAL
Estrato N° 1	0 – 10 m	2.68E-04
Estrato N° 2	10 – 24 m	4.79E-05
Estrato N° 3	24 - 60 m	2.01E-05

Según la tabla, se puede visualizar que los Ks son valores relativamente pequeños, es decir, su permeabilidad es media o baja por lo que difícilmente el agua puede filtrar. Luego de procesar la información insertada se pudo visualizar mediante los vectores generados por el programa, los cuales indican la dirección y circulación del agua, la disminución de las líneas a medida que la profundidad aumenta. Además, surgió presencia de filtración en el cuerpo de la presa. En relación a esto se debería realizar una colocación de un Dren con la finalidad de crear una presión “cero” ocasionando que el agua se dirija al vacío.

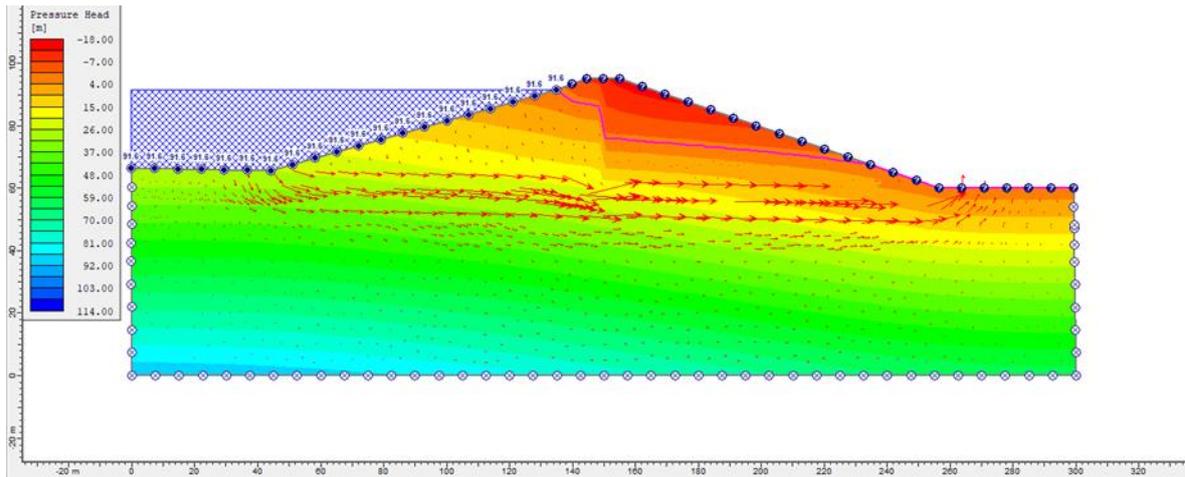


Figura 4-7 Vectores de Circulación del Agua (Parámetros Hidráulicos Mayores) (Elaboración propia, 2020)

4.3.2.2 Cálculo de Análisis de Infiltración – Condición Inicial (Parámetros Hidráulicos Mayores)

Para realizar el análisis de infiltración con la tercera configuración, utilizando las diferentes conductividades hidráulicas (Ks) extraído de los cuadros generados por el proyecto, se utilizó los mayores valores para distintas profundidades del terreno. Estos fueron insertados en el programa SLIDE, procesando la información para el análisis.

Tabla 4-31 Tabla con Valores de Ks (Mayores) (Elaboración propia, 2020)

Conductividad Hidráulica (Ks)		
ESTRATOS	PROFUNDIDADES	PROMEDIO GENERAL
Estrato N° 1	0 – 10 m	1.73E-02
Estrato N° 2	10 – 24 m	3.13E-03
Estrato N° 3	24 - 60 m	5.85E-03

Según la tabla, se puede visualizar que los Ks son valores muy altos, es decir, su permeabilidad es alta por lo que fácilmente el agua puede filtrar. Luego de procesar la información insertada se pudo visualizar mediante los vectores generados por el programa, los cuales indican la dirección y circulación del agua, el crecimiento de las líneas a medida que la profundidad aumenta. Además, surgió presencia de filtración por debajo de la presa. En relación a esto se debería realizar una colocación de un Dren con la finalidad de crear una presión “cero” ocasionando que el agua se dirija al vacío. De igual manera, la técnica de

pantalla impermeable de Pilotes Secantes aportará a la reducción de infiltración del agua permitiendo que la velocidad de esta en “aguas abajo” sea cero o aproximadamente a cero.

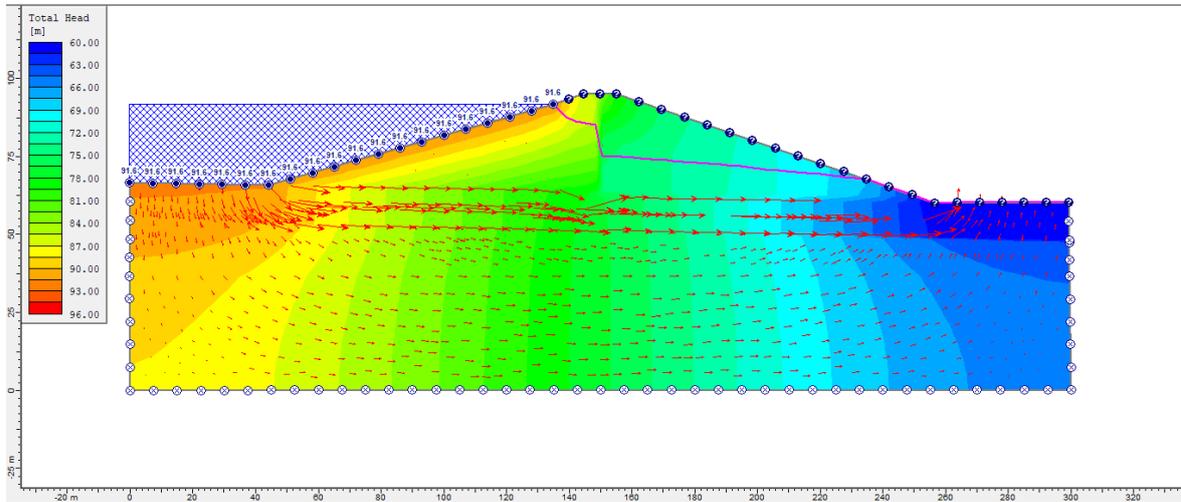


Figura 4-8 Vectores de Circulación del Agua (Parámetros Hidráulicos Menores) (Elaboración propia, 2020)

4.3.3 Cálculo de Análisis de infiltración - Condición Muro Impermeable

Se procederá a realizar el análisis de infiltración de la Presa Coltani en condición estabilizada. Esto se refiere a que se observará y analizará los cambios en los vectores de velocidad del agua por medio de la implementación del muro pantalla de Pilotes Secantes. Para tener una mayor visión del impacto de la técnica, se realizarán diferentes variaciones respecto a la ubicación y profundidad del muro pantalla. La ubicación del muro variará entre la sección inicial, central y final de la presa mientras que la profundidad estará entre 10, 20 y 30 metros.

Los muros de pilotes pueden ser realizados con concreto en masa (enteramente hormigón), concreto armado (hormigón con refuerzo denominado armadura) o de manera mixta alternando entre masa y armado en su colocación. Para el análisis se decidió utilizar un muro de Pilotes Secantes, los cuales tendrán un diámetro de 1.5m y realizados con concreto HM-25 (hormigón en masa) de resistencia característica a la compresión a 28 días de 25N/mm² con las siguientes características.

Tabla 4-32 Mohr-Coulomb parameters for modelling of concrete structures According to P. Jiménez Montoya (Plaxis,2016)

Concrete designation	Cohesion: c (kN/m ²)	Friction angle Φ	Tensile strength (kN/m ²)
HM-15	712	54.9°	450
HM-25	1186	54.9°	750

Estos datos son requeridos por el programa Slide ya que para implementar un muro pantalla en este, se debe realizar un nuevo “suelo” o “estrato”. Esto con el objetivo que el programa pueda computar y analizar de manera correcta el comportamiento del agua bajo la presa. Es por ello que, para nuestro nuevo suelo, llamado Pantalla Pilotes, cuenta con las características con las que contara de manera real tanto en propiedades, material y diámetro.

4.3.3.1 Análisis de Infiltración – Condición Muro Impermeable (1er Análisis)

Infiltración al inicio de la presa

Pilote Secante al Inicio de la presa con profundidad de 10 metros

La colocación del Pilote Secante, en la sección de inicio de la presa, con un diámetro de 1.5 metros a una profundidad de 10 metros debajo de esta. Se procederá a visualizar si existe algún cambio al momento del aumento de profundidad del Pilote Secante con respecto a la velocidad del agua.

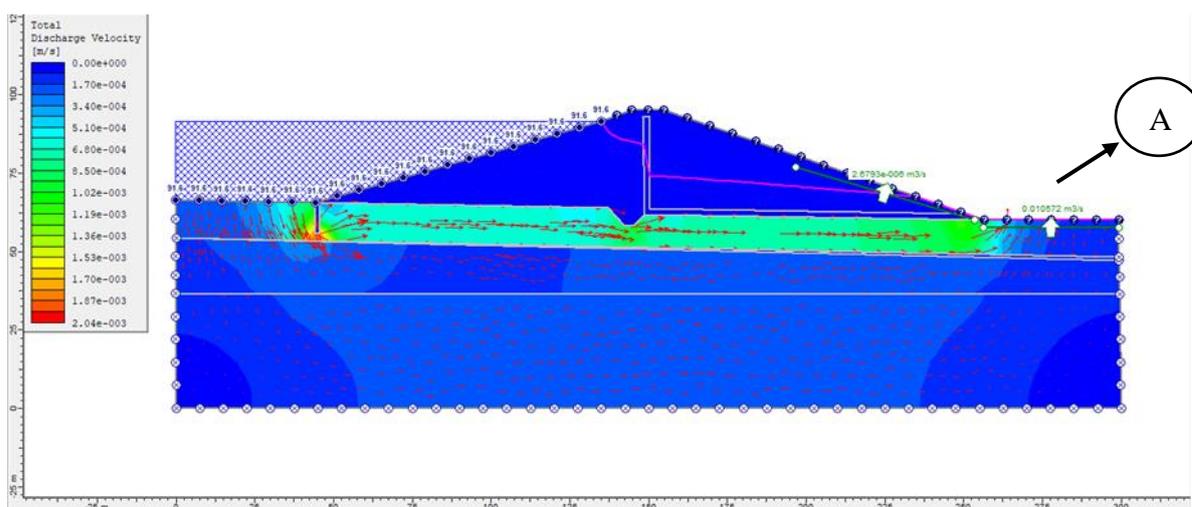


Figura 4-9 Análisis de Infiltración Muro al Inicio de la presa con $h = 10$ m y 1.5m de diámetro (1er Análisis) (Elaboración propia, 2020)

Según el cuadro de velocidad de descarga total brindado por el programa Slide los valores oscilan entre $5.10E-4$ y $8.50E-4$. Además, se puede observar que los vectores de agua tienen cierto tamaño lo cual indica el paso del agua, generando en la parte derecha de la presa un caudal de respuesta de $0.01057 \text{ m}^3/\text{s}$. Esto genera una cantidad de agua de $38.05 \text{ m}^3/\text{h}$.

Tabla 4-33 Caudal Respuesta Muro Inicio de la presa con $h= 10 \text{ m}$ y 1.5m de diámetro (1er Análisis) (Elaboración propia, 2020)

Descripción	Profundidad (m)	Caudal Respuesta (m^3/s)
A	10 m	$0.01057 \text{ m}^3/\text{s}$

Pilote Secante al Inicio de la presa con profundidad de 20 metros

La colocación del Pilote Secante, en la sección de inicio de la presa, con un diámetro de 1.5 metros a una profundidad de 20 metros debajo de esta. Se procederá a visualizar si existe algún cambio al momento del aumento de profundidad del Pilote Secante con respecto a la velocidad del agua.

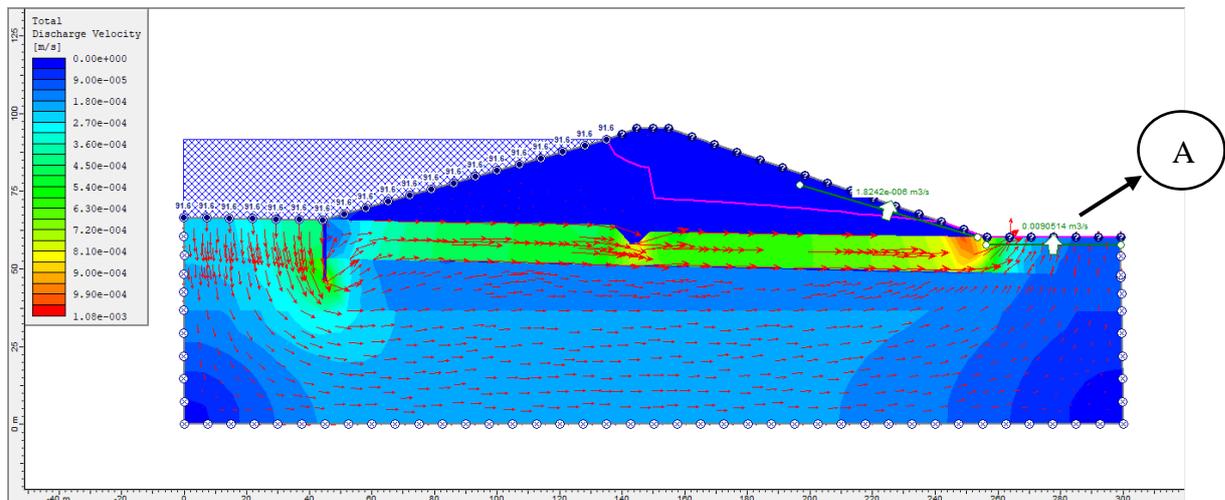


Figura 4-10 Análisis de Infiltración Muro al Inicio de la presa con $h = 20 \text{ m}$ y 1.5m de diámetro (1er Análisis) (Elaboración propia, 2020)

Según el cuadro de velocidad de descarga total brindado por el programa Slide los valores oscilan entre $4.50E-4$ y $8.10E-4$. Además, se puede observar que los vectores de agua tienen cierto tamaño lo cual indica el paso del agua, generando en la parte derecha de la presa un caudal de respuesta de $0.00905 \text{ m}^3/\text{s}$. Entre la profundidad de 10 metros a 20 metros sufrió una ligera disminución del caudal. Esto genera una cantidad de agua de $32.58 \text{ m}^3/\text{h}$.

Tabla 4-34 Caudal Respuesta Muro Inicio de la presa con $h= 20$ m y 1.5m de diámetro (1er Análisis) (Elaboración propia, 2020)

Descripción	Profundidad (m)	Caudal Respuesta (m ³ /s)
A	20 m	0.00905 m ³ /s

Pilote Secante al Inicio de la presa con profundidad de 30 metros

La colocación del Pilote Secante, en la sección de inicio de la presa, con un diámetro de 1.5 metros a una profundidad de 30 metros debajo de esta. Se procederá a visualizar si existe algún cambio al momento del aumento de profundidad del Pilote Secante con respecto a la velocidad del agua.

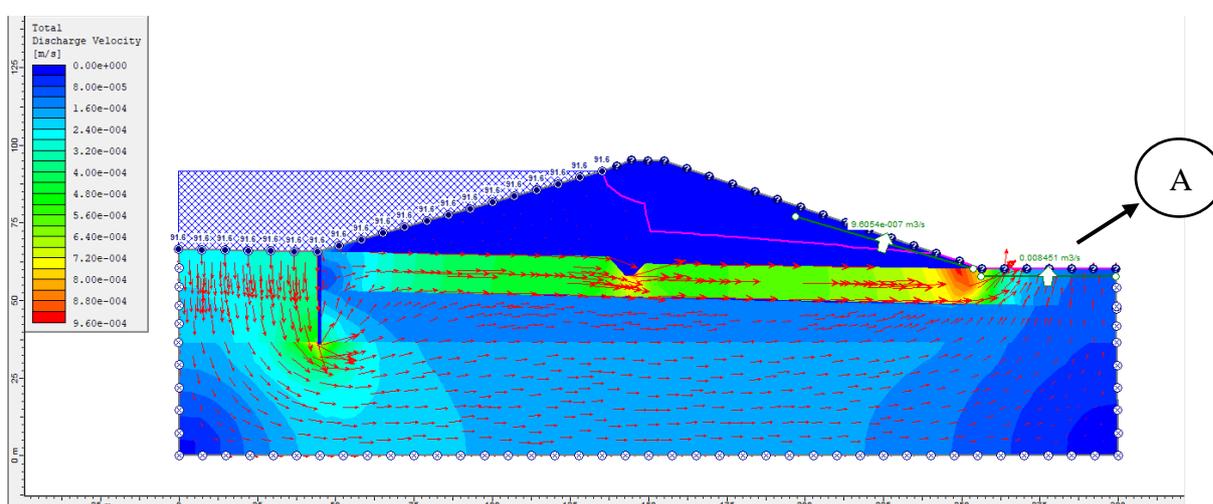


Figura 4-11 Análisis de Infiltración Muro al Inicio de la presa con $h = 30$ m y 1.5m de diámetro (1er Análisis) (Elaboración propia, 2020)

Según el cuadro de velocidad de descarga total brindado por el programa Slide los valores oscilan entre 1.60E-4 y 7.20E-4. Además, se puede observar que los tamaños de los vectores de agua no varían, generando en la parte derecha de la presa un caudal de respuesta de 0.00845 m³/s. Entre la profundidad de 20 metros a 30 metros sufrió una ligera disminución del caudal. Esto genera una cantidad de agua de 30.42 m³/h.

Tabla 4-35 Caudal Respuesta Muro Inicio de la presa con $h= 30$ m y 1.5m de diámetro (1er Análisis) (Elaboración propia, 2020)

Descripción	Profundidad (m)	Caudal Respuesta (m ³ /s)
A	30 m	0.00845 m ³ /s

Infiltración al centro de la presa

Pilote Secante al Centro con profundidad de 10 metros

La colocación del Pilote Secante, en la sección media de la presa, con un diámetro de 1.5 metros a una profundidad de 10 metros debajo de esta. Se procederá a visualizar si existe algún cambio al momento del aumento de profundidad del pilote secante con respecto a la velocidad del agua.

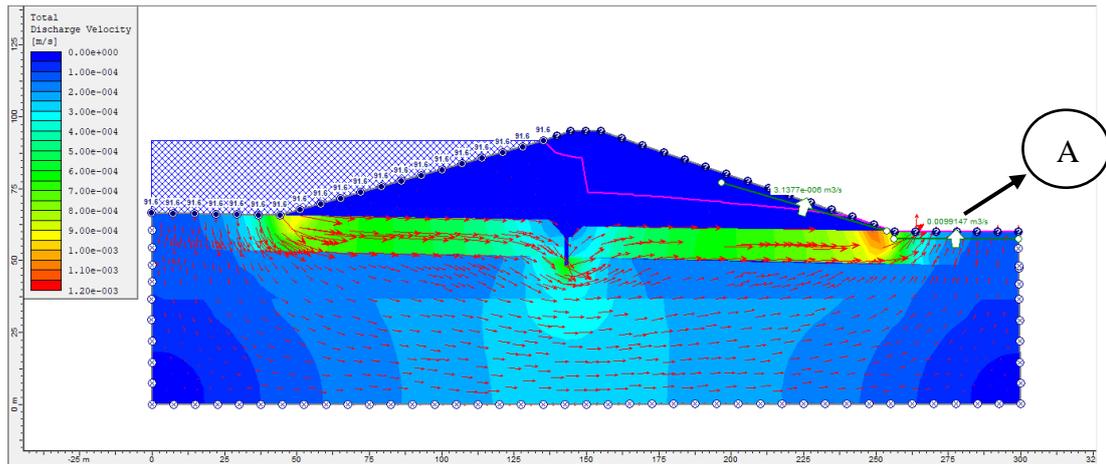


Figura 4-12 Análisis de Infiltración Muro al Centro de la presa con $h = 10$ m y 1.5m de diámetro (1er Análisis) (Elaboración propia, 2020)

Se puede observar que, si bien impide el paso de agua, aun los vectores de agua tienen cierto tamaño lo cual indica el paso de esta bordeando el pilote, provocando en la parte derecha de la presa un caudal de respuesta de $0.00991 \text{ m}^3/\text{s}$. Esto genera una cantidad de agua de $35.68 \text{ m}^3/\text{h}$.

Tabla 4-36 Caudal Respuesta Muro Centro de la presa con $h = 10$ m y 1.5m de diámetro (1er Análisis) (Elaboración propia, 2020)

Descripción	Profundidad (m)	Caudal Respuesta (m^3/s)
A	10 m	$0.00991 \text{ m}^3/\text{s}$

Pilote Secante al Centro con profundidad de 20 metros

La colocación del Pilote Secante, en la sección media de la presa, con un diámetro de 1.5 metros a una profundidad de 20 metros debajo de esta. Se procederá a visualizar si existe algún cambio al momento del aumento de profundidad del Pilote Secante con respecto a la velocidad del agua.

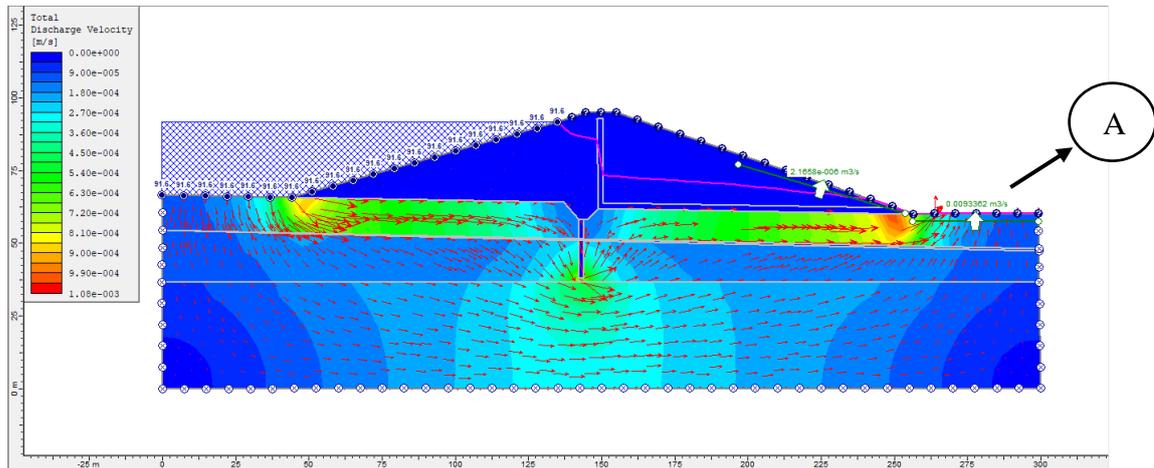


Figura 4-13 Análisis de Infiltración Muro al Centro de la presa con $h = 20\text{ m}$ y 1.5 m de diámetro (1er Análisis) (Elaboración propia, 2020)

Se puede observar que, si bien impide el paso de agua, no existe mayor cambio en la dirección de los vectores que indican el paso del agua, provocando en la parte derecha de la presa un caudal de respuesta de $0.00934\text{ m}^3/\text{s}$. Esto genera una cantidad de agua de $33.62\text{ m}^3/\text{h}$.

Tabla 4-37 Caudal Respuesta Muro Centro de la presa con $h = 20\text{ m}$ y 1.5 m de diámetro (1er Análisis) (Elaboración propia, 2020)

Descripción	Profundidad (m)	Caudal Respuesta (m ³ /s)
A	20 m	$0.00934\text{ m}^3/\text{s}$

Pilote Secante al Centro con profundidad de 30 metros

La colocación del Pilote Secante, en la sección media de la presa, con un diámetro de 1.5 metros a una profundidad de 30 metros debajo de esta. Se procederá a visualizar si existe algún cambio al momento del aumento de profundidad del Pilote Secante con respecto a la velocidad del agua.

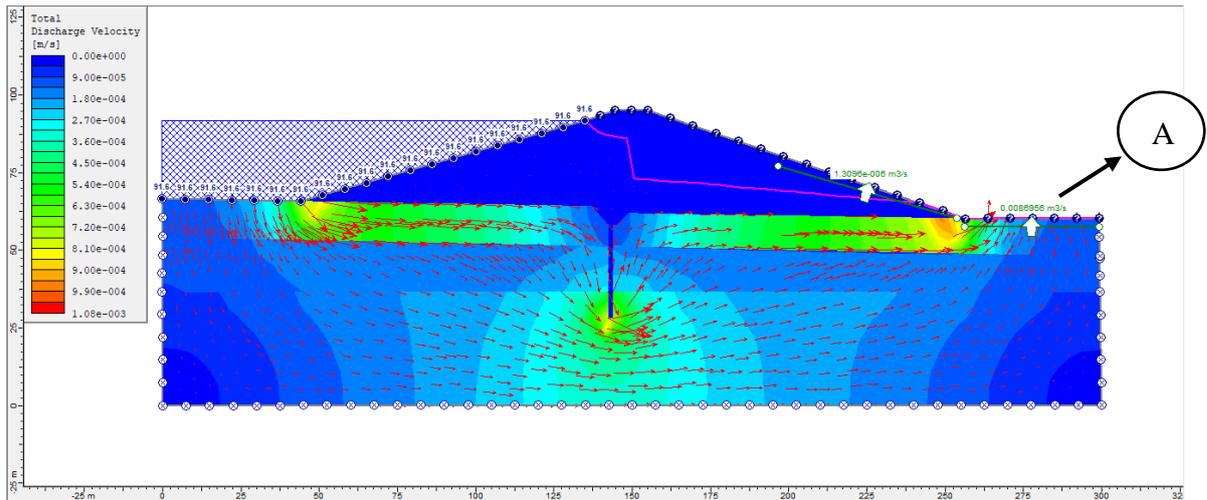


Figura 4-14 Análisis de Infiltración Muro al Centro de la presa con $h = 30\text{ m}$ y 1.5 m de diámetro (1er Análisis) (Elaboración propia, 2020)

Se puede observar que existe una disminución de vectores de agua, en la dirección de los vectores que indican el paso del agua el cual existe cierto cambio al aumento de profundidad del pilote a 30 metros, generando en la parte derecha de la presa un caudal de respuesta de $0.00870\text{ m}^3/\text{s}$. Esto genera una cantidad de agua de $31.32\text{ m}^3/\text{h}$.

Tabla 4-38 Caudal Respuesta Muro Centro de la presa con $h= 30\text{ m}$ y 1.5 m de diámetro (1er Análisis) (Elaboración propia, 2020)

Descripción	Profundidad (m)	Caudal Respuesta (m ³ /s)
A	30 m	$0.00870\text{ m}^3/\text{s}$

Infiltración al Final de la presa

Pilote Secante al Final de la presa con profundidad de 10 metros

La colocación del Pilote Secante, en la sección final de la presa, con un diámetro de 1.5 metros a una profundidad de 10 metros debajo de esta. Se procederá a visualizar si existe algún cambio al momento del aumento de profundidad del Pilote Secante con respecto a la velocidad del agua.

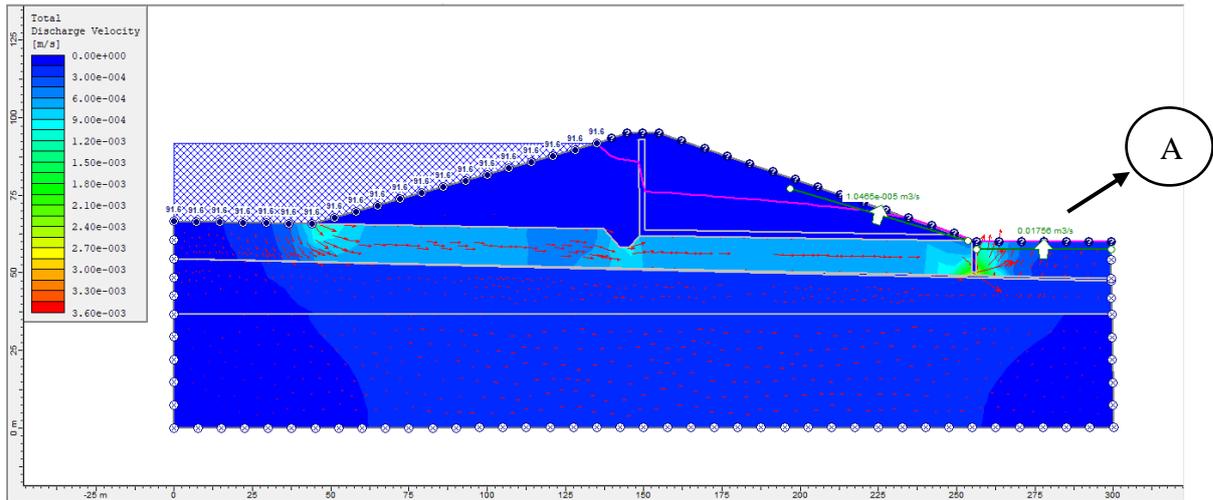


Figura 4-15 Análisis de Infiltración Muro al Final de la presa con $h = 10$ m y 1.5m de diámetro (1er Análisis) (Elaboración propia, 2020)

Según el cuadro de velocidad de descarga total brindado por el programa Slide los valores oscilan entre $3.00E-4$ y $9.00E-4$. Además, se puede observar que los tamaños de los vectores de agua si varían lo cual indicaría cierta permeabilidad en esa zona, generando en la parte derecha de la presa un caudal de respuesta de $0.01756 \text{ m}^3/\text{s}$. Esto genera una cantidad de agua de $63.22 \text{ m}^3/\text{h}$.

Tabla 4-39 Caudal Respuesta Muro Final de la presa con $h= 10$ m y 1.5m de diámetro (1er Análisis) (Elaboración propia, 2020)

Descripción	Profundidad (m)	Caudal Respuesta (m³/s)
A	10 m	$0.01756 \text{ m}^3/\text{s}$

Pilote Secante al Final de la presa con profundidad de 20 metros

La colocación del Pilote Secante, en la sección final de la presa, con un diámetro de 1.5 metros a una profundidad de 20 metros debajo de esta. Se procederá a visualizar si existe algún cambio al momento del aumento de profundidad del Pilote Secante con respecto a la velocidad del agua.

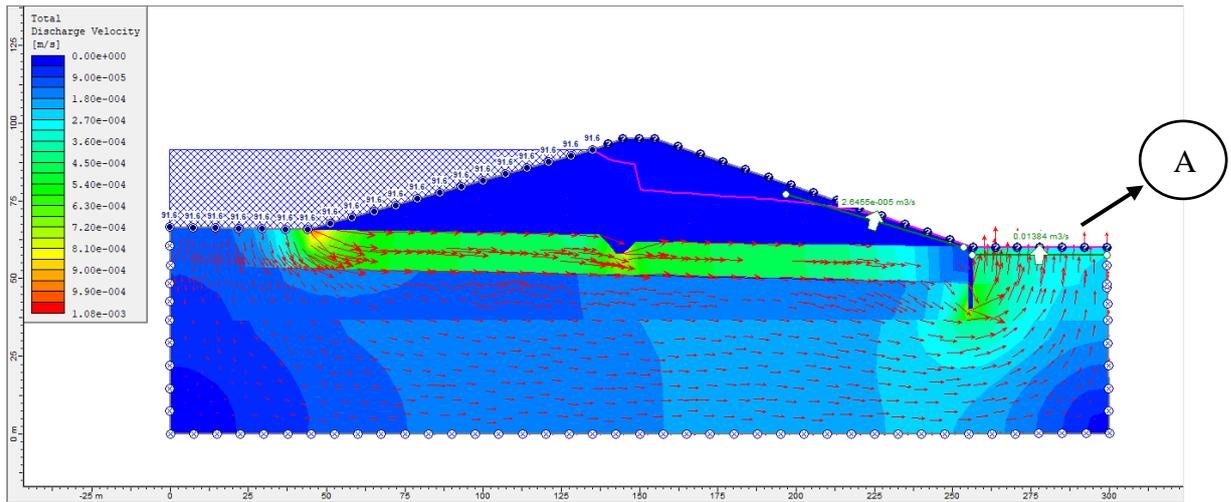


Figura 4-16 Análisis de Infiltración Muro al Final de la presa con $h = 20$ m y 1.5m de diámetro (1er Análisis) (Elaboración propia, 2020)

Según el cuadro de velocidad de descarga total brindado por el programa Slide los valores oscilan entre $2.70E-4$ y $6.30E-4$. Además, se puede observar que los tamaños de los vectores de agua si varían aumentaron en relación con el anterior análisis colocado en 10 metros, generando en la parte derecha de la presa un caudal de respuesta de $0.01384 \text{ m}^3/\text{s}$. Esto genera una cantidad de agua de $49.82 \text{ m}^3/\text{h}$.

Tabla 4-40 Caudal Respuesta Muro Final de la presa con $h = 20$ m y 1.5m de diámetro (1er Análisis) (Elaboración propia, 2020)

Descripción	Profundidad (m)	Caudal Respuesta (m ³ /s)
A	20 m	$0.01384 \text{ m}^3/\text{s}$

Pilote Secante al Final de la presa con profundidad de 30 metros

La colocación del Pilote Secante, en la sección de inicio de la presa, con un diámetro de 1.5 metros a una profundidad de 30 metros debajo de la presa. Se procederá a visualizar si existe algún cambio al momento del aumento de profundidad del pilote secante con respecto a la velocidad del agua.

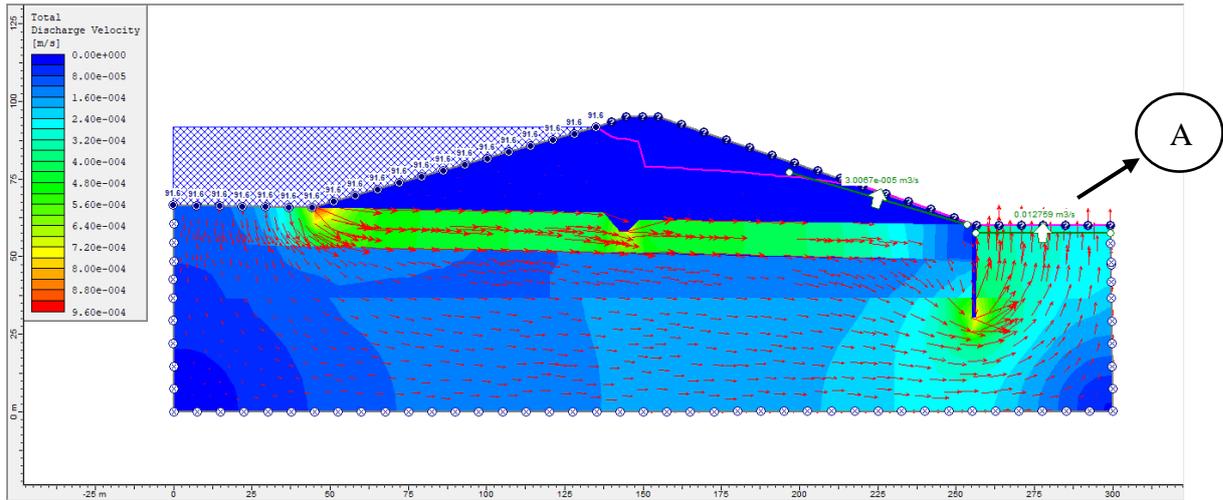


Figura 4-17 Análisis de Infiltración Muro al Final de la presa con $h = 30\text{ m}$ y 1.5 m de diámetro (1er Análisis) (Elaboración propia, 2020)

Según el cuadro de velocidad de descarga total brindado por el programa Slide los valores oscilan entre $2.40\text{E-}4$ y $6.40\text{E-}4$. Además, se puede observar que los tamaños de los vectores de agua se mantuvieron en relación con el anterior análisis colocado en 20 metros, generando en la parte derecha de la presa un caudal de respuesta de $0.01276\text{ m}^3/\text{s}$. Esto genera una cantidad de agua de $45.94\text{ m}^3/\text{h}$.

Tabla 4-41 Caudal Respuesta Muro Final de la presa con $h = 30\text{ m}$ y 1.5 m de diámetro (1er Análisis) (Elaboración propia, 2020)

Descripción	Profundidad (m)	Caudal Respuesta (m ³ /s)
A	30 m	$0.01276\text{ m}^3/\text{s}$

Al comparar los distintos análisis de infiltración en estabilizada podemos ordenar los siguientes caudales de respuesta de menor a mayor y así poder distinguir la posible ubicación y profundidad del muro pantalla

Tabla 4-42 Resumen Comparación de caudal respuesta a diferentes posiciones y profundidad (1er Análisis)
(Elaboración propia, 2020)

Posición	Profundidad (m)	Caudal Respuesta (m ³ /s)
Izquierda	30	0.00845
Medio	30	0.00870
Izquierda	20	0.00905
Medio	20	0.00934
Medio	10	0.00992
Izquierda	10	0.01057
Derecha	30	0.01276
Derecha	20	0.01384
Derecha	10	0.01756

Con estos resultados podemos decir que la posible posición y ubicación óptima del muro pantalla sería al inicio de la presa a una profundidad de 30m. Esto es debido a que el caudal de respuesta es el más cercano al valor cero.

4.3.4 Diseño de pantalla de pilotes - Diámetro, Longitud y Cantidad

Diámetro y longitud definitiva de pilotes para el muro pantalla

Se realizó el estudio del análisis de infiltración en condición estabilizada pero no se tomó en cuenta un punto importante respecto a la infiltración de agua en las presas de tierra. Existe un caudal de infiltración máximo permisible por norma/teoría, la cual debemos respetar para proponer el correcto diseño del muro pantalla. Esto se sustenta ya que, con nuestro caudal mínimo de respuesta, se observó que la presa tiene como salida de agua 30.42 litros por hora, lo cual es una cantidad exageradamente grande y no es viable.

El criterio de diseño de presas de tierras, respecto al análisis de infiltraciones, estas deben cumplir con la siguiente condición: el caudal de infiltraciones no debe ser mayor que el 2% del caudal de diseño. Para poder determinar este caudal permisible se requieren los datos del volumen de embalse, extraído del expediente técnico de la obra, (4.97 Hm³) junto con las fórmulas de cálculo mostradas a continuación:

Cálculo de Caudal de Infiltración Máxima

Caudal medio (Q_m)

$$Q_m = \frac{V}{365 * 86400} = \frac{4970000}{365 * 86400} = 0.1576 \text{ m}^3/\text{s}$$

Caudal de Infiltración Máximo Permisible (Q_{fmp})

$$Q_{fmp} = 0.02 * Q_m = 0.02 * 0.1575976662 = 0.00315 \text{ m}^3/\text{s}$$

Volumen de filtración Máximo Anual (V_{fma})

$$V_{fma} = Q_{fma} * 86400 * 365 = 0.00315195 * 86400 * 365 = 99400 \text{ m}^3$$

Dado los resultados anteriores, podemos determinar que el caudal máximo permisible que puede filtrar en nuestra presa de estudio es de $0.00315 \text{ m}^3/\text{s}$. Es por ello que se realizó nuevamente los sondeos correspondientes, de tal manera que se llegue al valor del caudal máximo permisible o inferior. El sondeo contará con las mismas características del concreto, mostradas anteriormente, con diámetros de 1.3 y 1.5m a profundidades entre 19 – 59 m y en la posición inicial, centro y final de la presa. A continuación, se presentan los sondeos finales (profundidad mayor) de cada diámetro de pilote respectivamente.

4.3.4.1 Análisis de Infiltración – Condición Muro Impermeable (2do Análisis)

Diámetro Pilote 1.3m a 59m de profundidad en posición Inicial, Central y Final

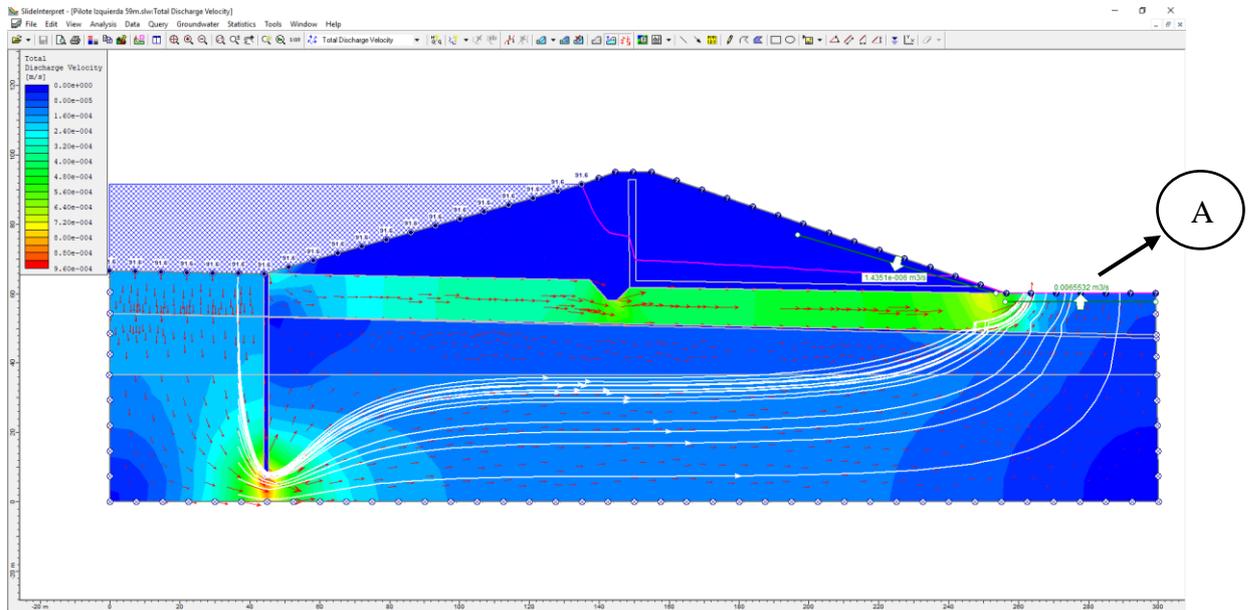


Figura 4-18 Análisis de Infiltración Muro al Inicio de la presa con $h = 59\text{m}$ y 1.3m de diámetro (2do Análisis) (Elaboración propia, 2020)

Según el cuadro de velocidad de descarga total brindado por el programa Slide los valores oscilan entre $2.40\text{E}-4$ y $7.20\text{E}-4$. Además, se pudo observar que los vectores de agua varían en su tamaño en base a los sondeos realizados en el punto anterior, generando en la parte derecha de la presa un caudal de respuesta de $0.00655\text{ m}^3/\text{s}$. Este no cumple con el Q_{fmp} . La cantidad de agua que sale por filtración de la presa es de $23.58\text{ m}^3/\text{h}$.

Tabla 4-43 Caudal Respuesta Muro Inicio de la presa con $h = 59\text{m}$ y 1.3m de diámetro (2do Análisis) (Elaboración propia, 2020)

Descripción	Profundidad (m)	Caudal Respuesta (m^3/s)
A	59 m	$0.00655\text{ m}^3/\text{s}$

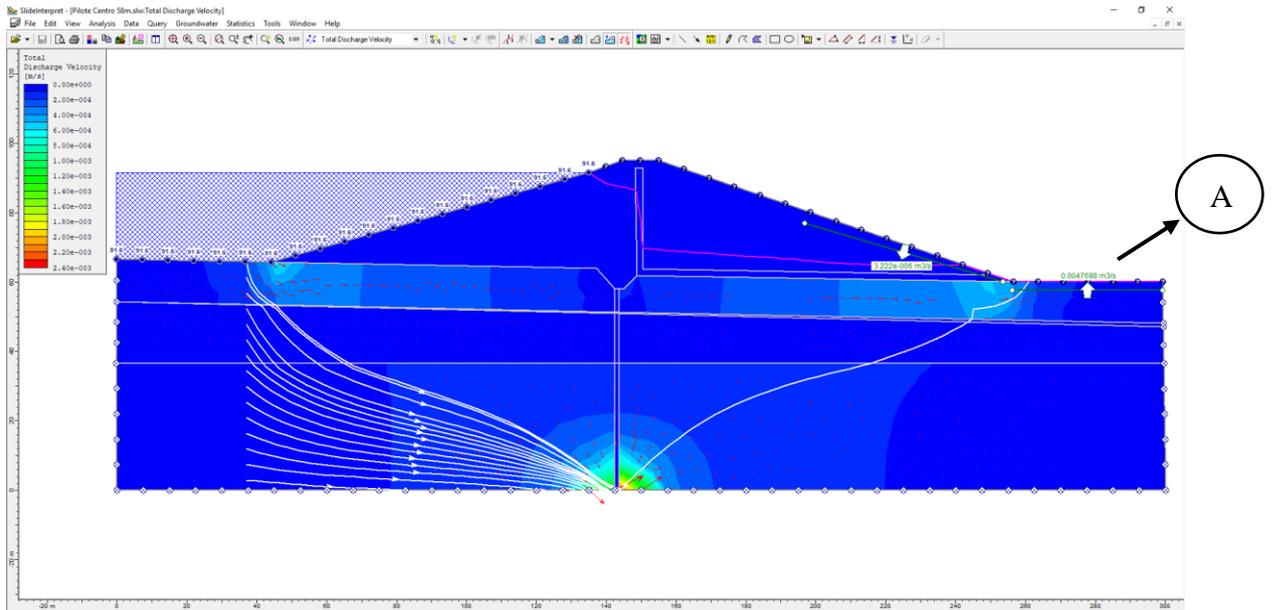


Figura 4-19 Análisis de Infiltración Muro al Centro de la presa con $h = 59\text{m}$ y 1.3m de diámetro (2do Análisis) (Elaboración propia, 2020)

Según el cuadro de velocidad de descarga total, brindado por el programa Slide, los valores oscilan entre 0.00 y $1.80\text{E-}3$. Además, se pudo observar que los tamaños de los vectores de agua son más pequeños a los del sondeo del muro pantalla al inicio de la presa, generando, en la parte derecha de esta, un caudal de respuesta de $0.00477\text{ m}^3/\text{s}$. Este caudal no cumple con el Q_{fmp} . La cantidad de agua que sale por infiltración de la presa es de $17.17\text{ m}^3/\text{h}$.

Tabla 4-44 Caudal Respuesta Muro Centro de la presa con $h= 59\text{m}$ y 1.3m de diámetro (2do Análisis) (Elaboración propia, 2020)

Descripción	Profundidad (m)	Caudal Respuesta (m^3/s)
A	59 m	$0.00477\text{ m}^3/\text{s}$

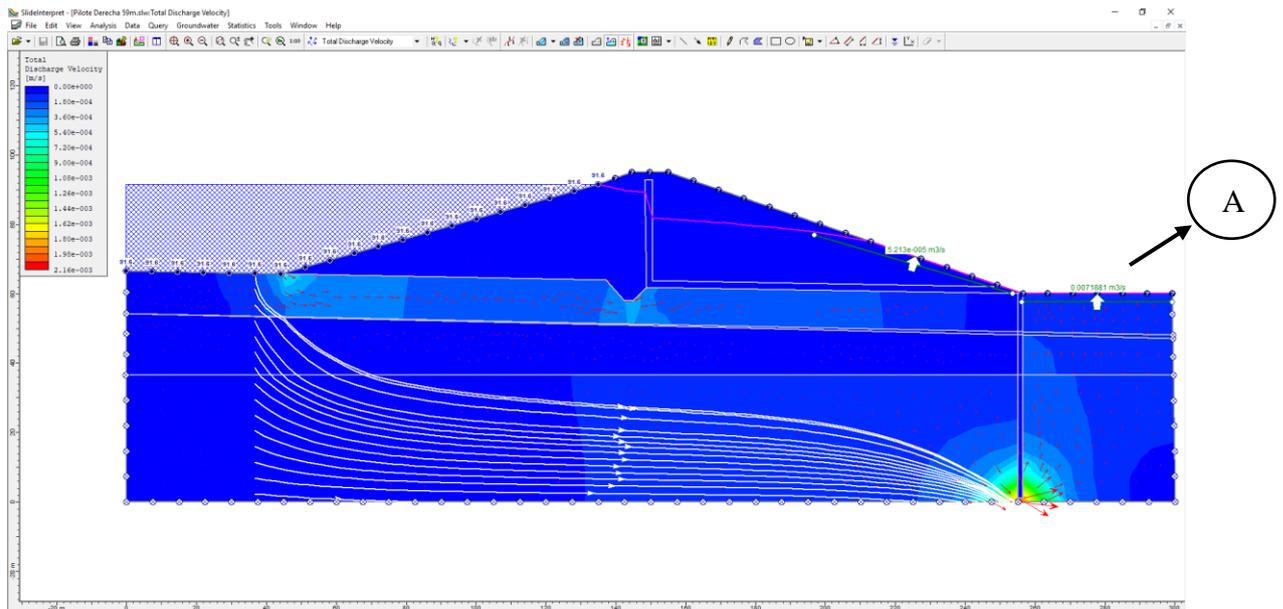


Figura 4-20 Análisis de Infiltración Muro al Final de la presa con $h = 59\text{m}$ y 1.3m de diámetro (2do Análisis) (Elaboración propia, 2020)

Según el cuadro de velocidad de descarga total, brindado por el programa Slide, los valores oscilan entre $2.40\text{E-}4$ y $7.20\text{E-}4$. Además, se pudo observar que los tamaños de los vectores de agua son un poco más grandes a los del sondeo del muro pantalla al centro de la presa, generando en la parte derecha de esta un caudal de respuesta de $0.00719\text{ m}^3/\text{s}$. Este caudal no cumple con el Q_{fmp} . La cantidad de agua que sale por infiltración es de $25.88\text{ m}^3/\text{h}$.

Tabla 4-45 Caudal Respuesta Muro Final de la presa con $h = 59\text{m}$ y 1.3m de diámetro (2do Análisis) (Elaboración propia, 2020)

Descripción	Profundidad (m)	Caudal Respuesta (m^3/s)
A	59 m	$0.00719\text{ m}^3/\text{s}$

Diámetro Pilote 1.5m a 59m de profundidad en posición Inicial, Central y Final

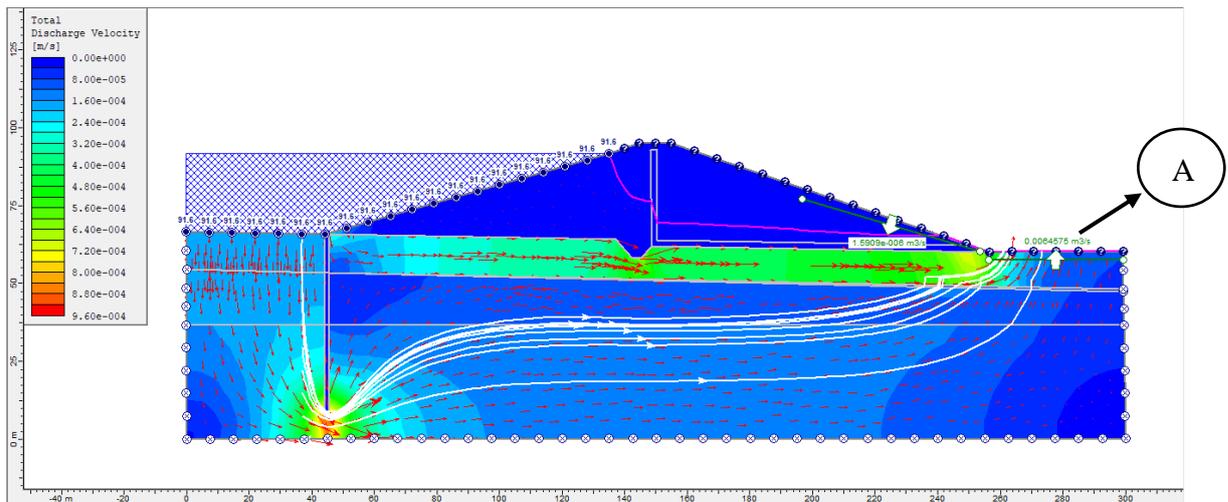


Figura 4-21 Análisis de Infiltración Muro al Inicio de la presa con $h = 59\text{m}$ y 1.5m de diámetro (2do Análisis) (Elaboración propia, 2020)

Según el cuadro de velocidad de descarga total, generado por el programa Slide, los valores oscilan entre $4.00\text{E}-4$ y $8.00\text{E}-5$. Además, se pudo observar que los vectores de agua tienen un tamaño pequeño, lo cual indica el paso del agua por debajo de la presa de tierra, es por eso que en la parte derecha de la misma tiene un caudal de respuesta de $0.00647\text{ m}^3/\text{s}$. Este no cumple con el Q_{fmp} . La cantidad de agua que sale por infiltración es de $23.29\text{ m}^3/\text{h}$.

Tabla 4-46 Caudal Respuesta Muro Inicio de la presa con $h= 59\text{m}$ y 1.5m de diámetro (2do Análisis) (Elaboración propia, 2020)

Descripción	Profundidad (m)	Caudal Respuesta (m^3/s)
A	59 m	$0.00647\text{ m}^3/\text{s}$

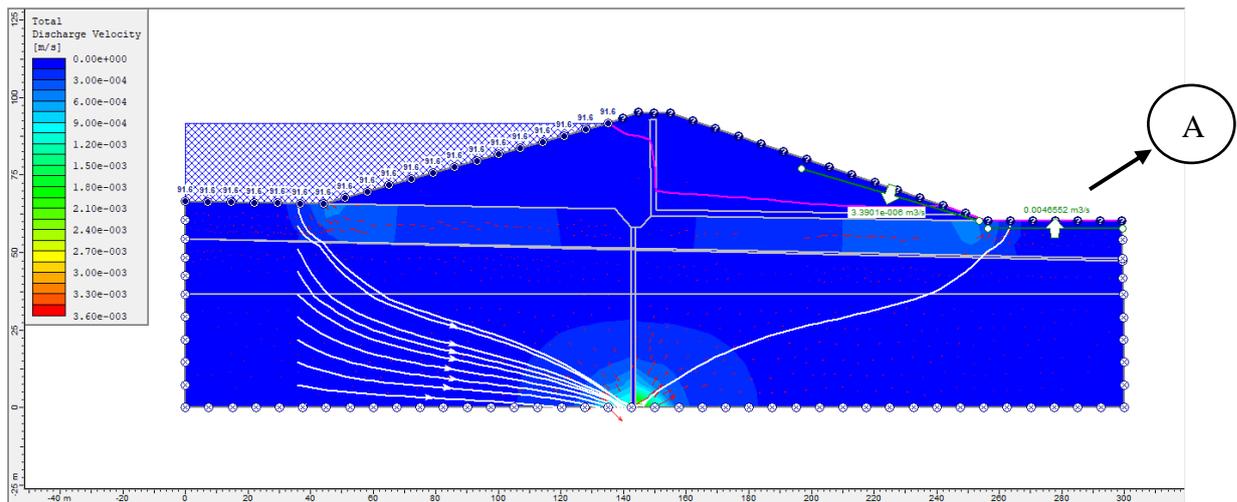


Figura 4-22 Análisis de Infiltración Muro al Centro de la presa con $h = 59\text{m}$ y 1.5m de diámetro (2do Análisis) (Elaboración propia, 2020)

Según el cuadro de velocidad de descarga total generado por el programa Slide los valores oscilan entre $6.00\text{E}-4$ y $3.00\text{E}-4$. Además, se puede observar que los vectores de agua han disminuido su tamaño en referencia a los sondeos del pilote secante al inicio de la presa, aun así, existe cierto paso del agua por debajo de la presa de tierra, es por eso que en la parte derecha de la presa tiene un caudal de respuesta de $0.00466\text{ m}^3/\text{s}$. Este caudal no cumple con el Q_{fmp} . La cantidad de agua que sale por infiltración es de $16.76\text{ m}^3/\text{h}$.

Tabla 4-47 Caudal Respuesta Muro Centro de la presa con $h = 59\text{m}$ y 1.5m de diámetro (2do Análisis) (Elaboración propia, 2020)

Descripción	Profundidad (m)	Caudal Respuesta (m^3/s)
A	59 m	$0.00466\text{ m}^3/\text{s}$

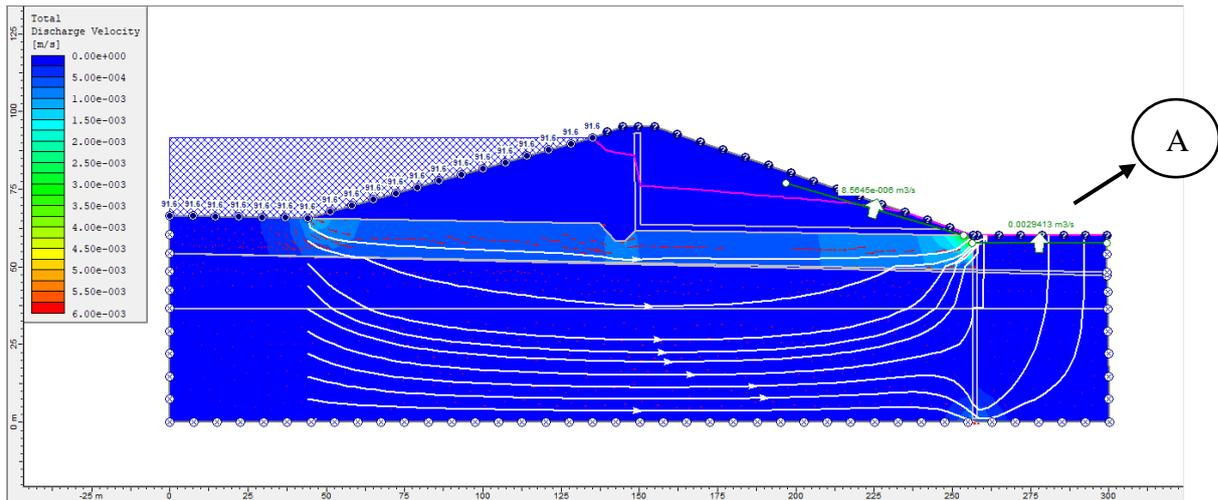


Figura 4-23 Análisis de Infiltración Muro al Final de la presa con $h = 59\text{m}$ y 1.5m de diámetro (2do Análisis)
(Elaboración propia, 2020)

Según el cuadro de velocidad de descarga total, generado por el programa Slide, los valores oscilan entre 0.00E y $5.00\text{E}-4$. Además, se pudo observar que los vectores de agua han disminuido su tamaño, en referencia a los sondeos del pilote secante tanto al inicio como al centro de la presa, aun así, existe cierto paso del agua por debajo de la presa de tierra, es por eso que en la parte derecha de la presa tiene un caudal de respuesta de $0.00294\text{ m}^3/\text{s}$. Este caudal si cumple con el Q_{fmp} . La cantidad de agua que sale por infiltración es de $10.58\text{ m}^3/\text{h}$.

Tabla 4-48 Caudal Respuesta Muro Final de la presa con $h= 59\text{m}$ y 1.5m de diámetro (2do Análisis) (Elaboración propia, 2020)

Descripción	Profundidad (m)	Caudal Respuesta (m^3/s)
A	59 m	$0.00294\text{ m}^3/\text{s}$

Tabla 4-49 Resumen Comparación de caudal respuesta a diferentes posiciones y profundidad a 59m (2do Análisis)
(Elaboración propia, 2020)

Posición	Diámetro		Caudal Respuesta
	(m)	Profundidad (m)	(m ³ /s)
Final	1.5	59	0.00294
Centro	1.5	59	0.00466
Centro	1.3	59	0.00477
Final	1.3	59	0.00719
Inicio	1.5	59	0.00655
Inicio	1.3	59	0.00647

Dado los resultados de todos los análisis realizados, se podría decir que la posición del muro pantalla impermeable al final de la presa (lado derecho) a 59m de profundidad y con un diámetro de 1.5m es el único que cumple con el Q_{fmp} para este análisis. Esto debido a que su caudal respuesta tiene un valor menor al permisible.

$$0.00294 \text{ m}^3/\text{s} < 0.00315 \text{ m}^3/\text{s} (Q_{fmp})$$

4.3.4.2 Discusión y corrección el análisis en el programa Slide (3er Análisis)

Al haber concluido los sondeos para determinar la profundidad optima de los pilotes, para así cumplir con el caudal máximo de infiltración, se creyó haber llegado a la longitud correcta. Sin embargo, se hizo unas correcciones en el programa Slide para un mejor análisis. Este, el cual sería el definitivo, se expandieron las longitudes de estrato, 25 m en la parte inferior y 50 m en la parte derecha, para así dar una simulación de infiltración del agua más cercana a la realidad. También, se hizo una corrección al coeficiente de permeabilidad en el estado más profundo a un valor de 5×10^{-4} cm/s ya que es un valor medio entre los valores típicos de esa zona, los cuales alternaban entre 10^{-3} y 10^{-4} .

Estas modificaciones brindaron un gran cambio en los valores de respuesta en los diversos sondeos, teniendo como principal afectado la profundidad necesaria para cumplir con el caudal de infiltración máximo permisible. Debido a esto, se procedió a hacer los sondeos

correspondientes, como se realizado anteriormente, pero ahora alternando entre 25, 30 y 35m de profundidad. Además, el caudal respuesta se analizará tanto en el estrato inicial y medio.

Muro Pantalla con Diámetro de Pilote Secantes de 1.3m

Pilote Secante al Inicio de la presa con profundidad de 25 metros

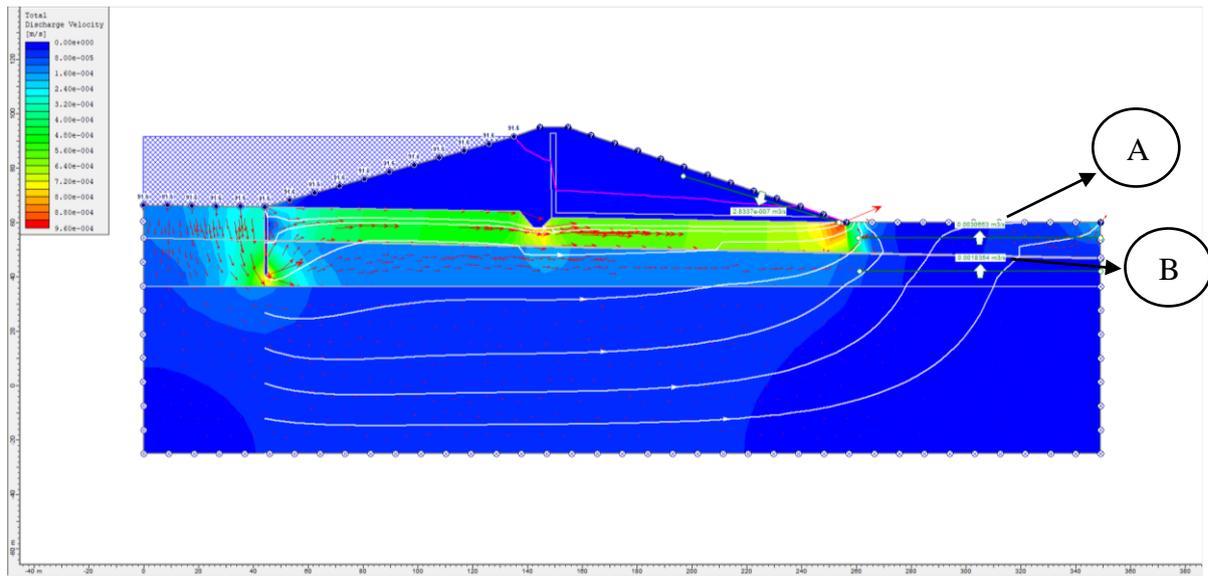


Figura 4-24 Análisis de Infiltración Muro al Inicio de la presa con $h = 25m$ y $1.3m$ de diámetro (3er Análisis) (Elaboración propia, 2020)

Se realizó una verificación para los diferentes profundidades previamente mencionadas colocando los Pilotes Secantes al inicio de la presa de tierra. En la siguiente imagen, se puede visualizar los valores de caudal respuesta para una profundidad de 25 metros, el cual cumple con el Q_{imp} en el estrato inicial y en el estrato medio. La cantidad de agua que sale por infiltración de la presa es de $11.04 \text{ m}^3/\text{h}$.

Tabla 4-50 Caudal Respuesta Muro Inicio de la presa con $h= 25m$ y $1.3m$ de diámetro (3er Análisis) (Elaboración propia, 2020)

Profundidad (m)	Caudal Respuesta Estrato	
	Inicial (m^3/s)	Estrato Medio (m^3/s)
	A	B
25 m	$0.00307 \text{ m}^3/\text{s}$	$0.00184 \text{ m}^3/\text{s}$

Pilote Secante al Inicio de la presa con profundidad de 30 metros

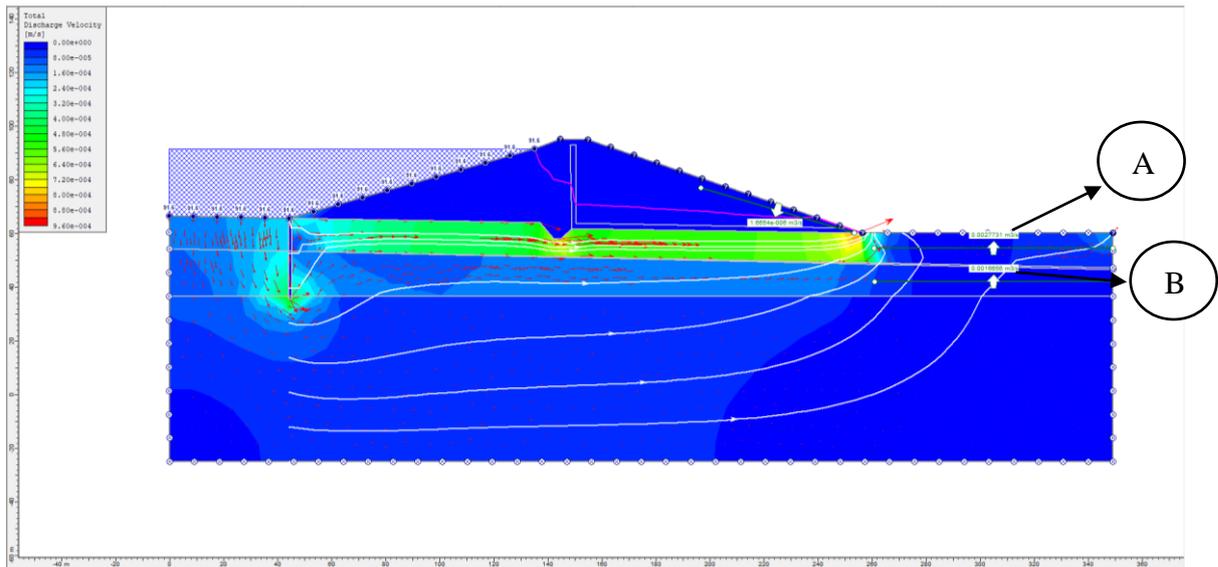


Figura 4-25 Análisis de Infiltración Muro al Inicio de la presa con $h = 30\text{m}$ y 1.3m de diámetro (3er Análisis) (Elaboración propia, 2020)

En la siguiente imagen, se puede visualizar los valores de caudal respuesta para una profundidad de 30 de un muro pantalla conformado por Pilotes Secantes al inicio de la presa, el cual cumple con el Q_{fmp} en el estrato inicial y el medio. La cantidad de agua que sale por infiltración de la presa es de $9.98\text{ m}^3/\text{h}$.

Tabla 4-51 Caudal Respuesta Muro Inicio de la presa con $h= 30\text{m}$ y 1.3m de diámetro (3er Análisis) (Elaboración propia, 2020)

Profundidad (m)	Caudal Respuesta Estrato	
	Inicial (m^3/s)	Estrato Medio (m^3/s)
	A	B
30 m	$0.00277\text{ m}^3/\text{s}$	$0.00167\text{ m}^3/\text{s}$

Pilote Secante al Inicio de la presa con profundidad de 35 metros

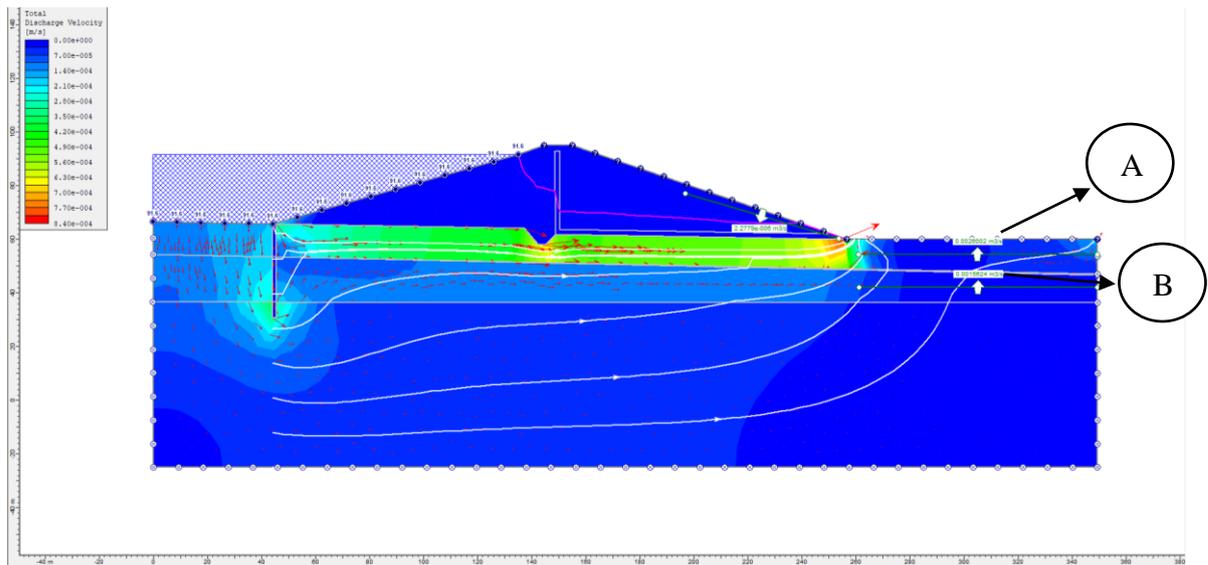


Figura 4-26 Análisis de Infiltración Muro al Inicio de la presa con $h = 35\text{m}$ y 1.3m de diámetro (3er Análisis) (Elaboración propia, 2020)

En la siguiente imagen, se puede visualizar los valores de caudal respuesta para una profundidad de 35 metros de un muro pantalla conformado por Pilotes Secantes, el cual cumple con el Q_{fmp} en el estrato inicial y el medio. La cantidad de agua que sale por infiltración de la presa es de $9.36\text{ m}^3/\text{h}$.

Tabla 4-52 Caudal Respuesta Muro Inicio de la presa con $h= 35\text{m}$ y 1.3m de diámetro (3er Análisis) (Elaboración propia, 2020)

Profundidad (m)	Caudal Respuesta Estrato	
	Inicial (m^3/s)	Estrato Medio (m^3/s)
	A	B
35 m	0.00260 m^3/s	0.00156 m^3/s

Pilote Secante al Centro de la presa con profundidad de 25 metros

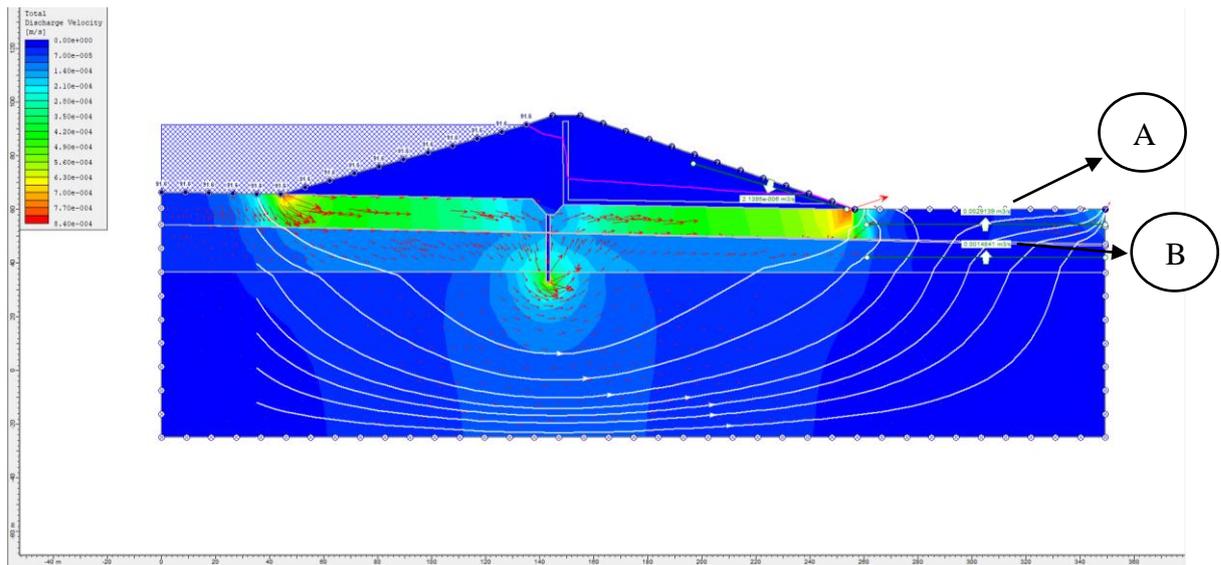


Figura 4-27 Análisis de Infiltración Muro al Centro de la presa con $h = 25\text{m}$ y 1.3m de diámetro (3er Análisis) (Elaboración propia, 2020)

En la siguiente imagen, se puede visualizar los valores de caudal respuesta para una profundidad de 25 metros de un muro pantalla conformado por Pilotes Secantes, el cual cumple con el Q_{fmp} en el estrato inicial y el medio. La cantidad de agua que sale por infiltración de la presa es de $10.49 \text{ m}^3/\text{h}$.

Tabla 4-53 Caudal Respuesta Muro Centro de la presa con $h= 25\text{m}$ y 1.3m de diámetro (3er Análisis) (Elaboración propia, 2020)

Profundidad (m)	Caudal Respuesta Estrato	
	Inicial (m^3/s)	Estrato Medio (m^3/s)
	A	B
25 m	$0.00291 \text{ m}^3/\text{s}$	$0.00148 \text{ m}^3/\text{s}$

Pilote Secante al Centro de la presa con profundidad de 30 metros

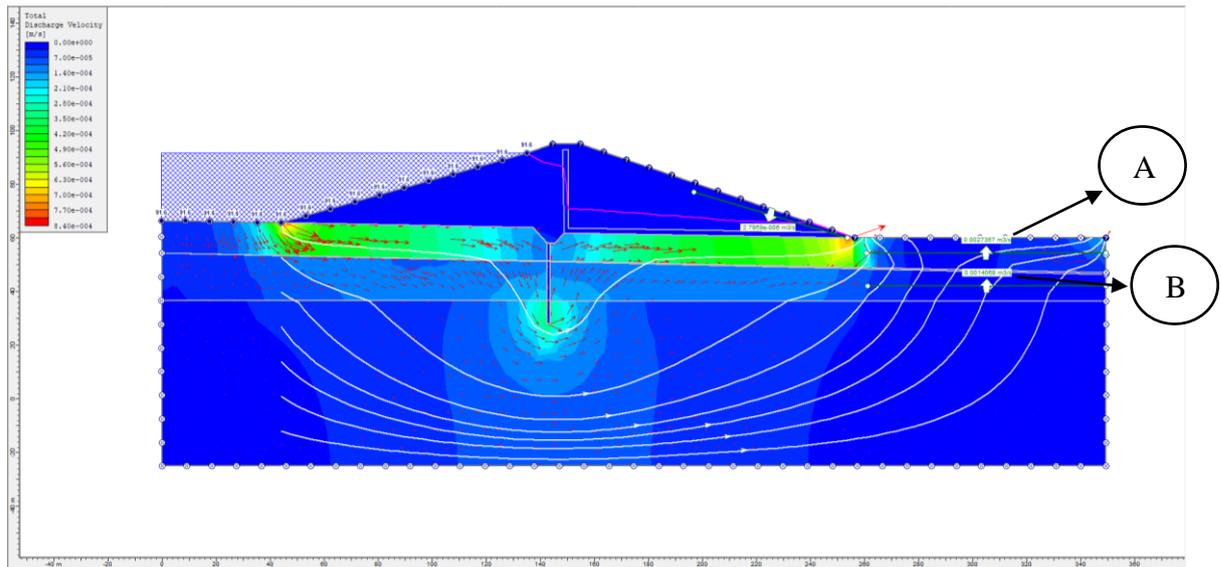


Figura 4-28 Análisis de Infiltración Muro al Centro de la presa con $h = 30\text{m}$ y 1.3m de diámetro (3er Análisis) (Elaboración propia, 2020)

En la siguiente imagen, se puede visualizar los valores de caudal respuesta para una profundidad de 30 metros de un muro pantalla conformado por Pilotes Secantes, el cual cumple con el Q_{fmp} en el estrato inicial y el medio. La cantidad de agua que sale por infiltración de la presa es de $9.85 \text{ m}^3/\text{h}$.

Tabla 4-54 Caudal Respuesta Muro Centro de la presa con $h= 30\text{m}$ y 1.3m de diámetro (3er Análisis) (Elaboración propia, 2020)

Profundidad (m)	Caudal Respuesta Estrato	
	Inicial (m^3/s)	Estrato Medio (m^3/s)
	A	B
30 m	$0.00274 \text{ m}^3/\text{s}$	$0.00141 \text{ m}^3/\text{s}$

Pilote Secante al Centro de la presa con profundidad de 35 metros

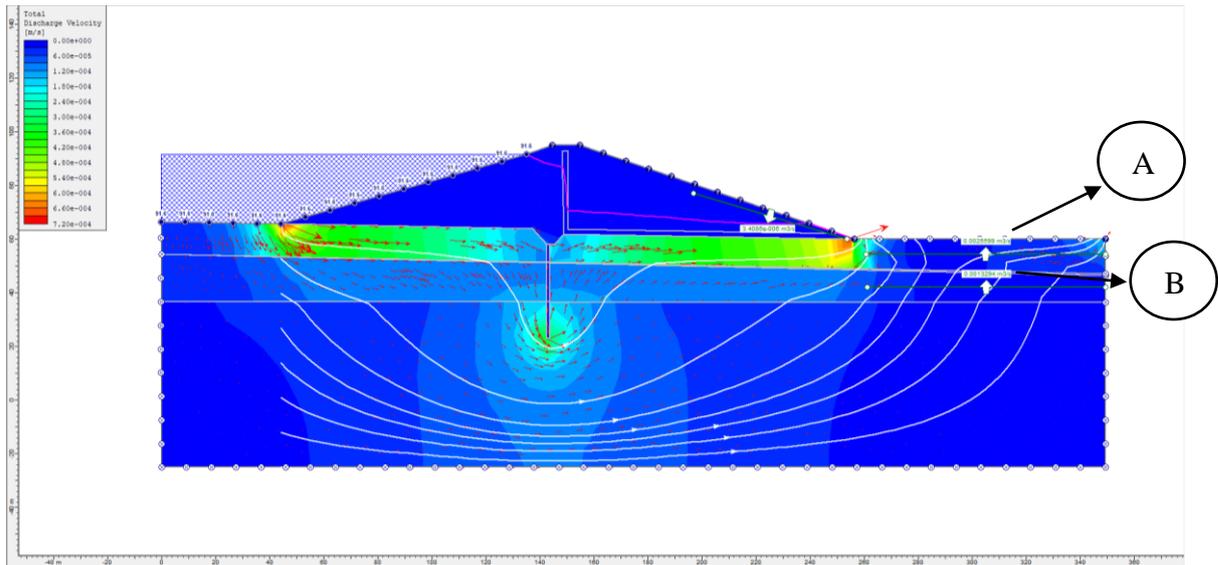


Figura 4-29 Análisis de Infiltración Muro al Centro de la presa con $h = 35\text{m}$ y 1.3m de diámetro (3er Análisis) (Elaboración propia, 2020)

En la siguiente imagen, se puede visualizar los valores de caudal respuesta para una profundidad de 35 metros de un muro pantalla conformado por Pilotes Secantes, el cual cumple con el Q_{imp} en el estrato inicial y el medio. La cantidad de agua que sale por infiltración de la presa es de $9.22\text{ m}^3/\text{h}$.

Tabla 4-55 Caudal Respuesta Muro Centro de la presa con $h= 35\text{m}$ y 1.3m de diámetro (3er Análisis) (Elaboración propia, 2020)

Profundidad (m)	Caudal Respuesta Estrato	
	Inicial (m^3/s)	
	A	B
35 m	0.00256 m^3/s	0.00133 m^3/s

Pilote Secante al Final de la presa con profundidad de 25 metros

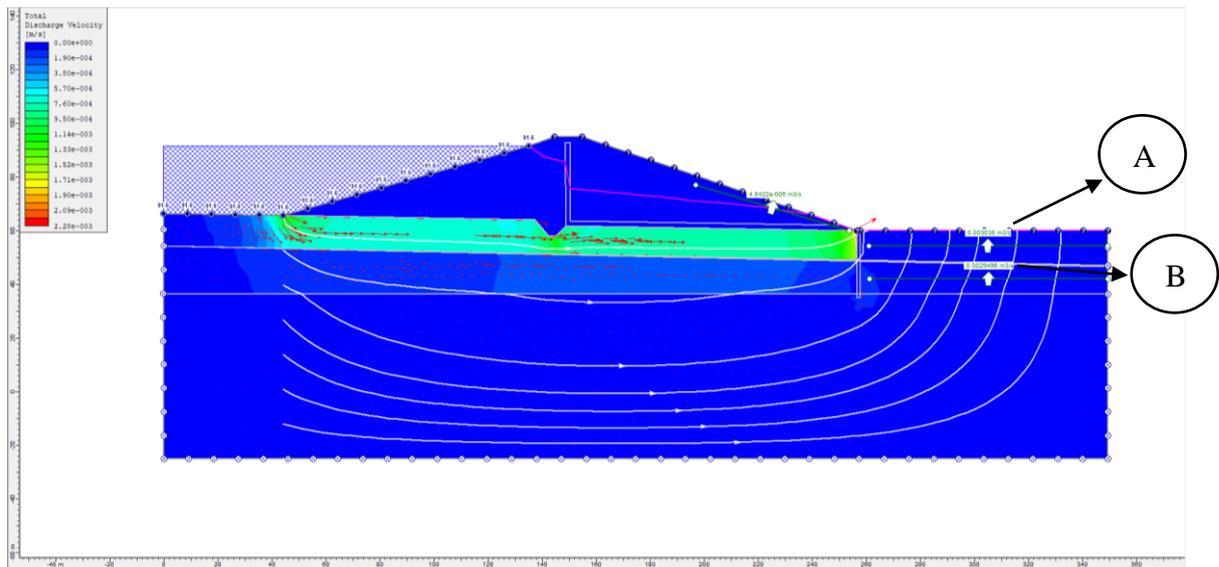


Figura 4-30 Análisis de Infiltración Muro al Final de la presa con $h = 25\text{m}$ y 1.3m de diámetro (3er Análisis) (Elaboración propia, 2020)

En la siguiente imagen, se puede visualizar los valores de caudal respuesta para una profundidad de 25 metros de un muro pantalla conformado por Pilotes Secantes, el cual cumple con el Q_{fmp} en el estrato inicial y el medio. La cantidad de agua que sale por infiltración de la presa es de $10.94\text{ m}^3/\text{h}$.

Tabla 4-56 Caudal Respuesta Muro Final de la presa con $h = 25\text{m}$ y 1.3m de diámetro (3er Análisis) (Elaboración propia, 2020)

Profundidad (m)	Caudal Respuesta Estrato	
	Inicial (m^3/s)	Estrato Medio (m^3/s)
	A	B
25 m	$0.00304\text{ m}^3/\text{s}$	$0.00295\text{ m}^3/\text{s}$

Pilote Secante al Final de la presa con profundidad de 30 metros

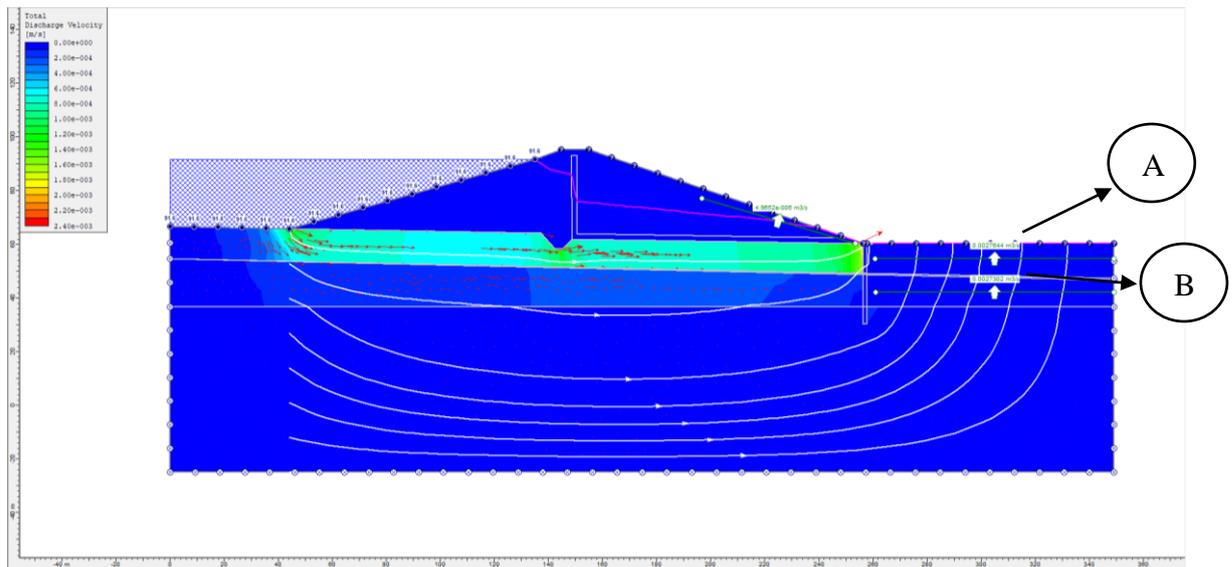


Figura 4-31 Análisis de Infiltración Muro al Final de la presa con $h = 30\text{m}$ y 1.3m de diámetro (3er Análisis) (Elaboración propia, 2020)

En la siguiente imagen, se puede visualizar los valores de caudal respuesta para una profundidad de 30 metros de un muro pantalla conformado por Pilotes Secantes, el cual cumple con el Q_{fmp} en el estrato inicial y el medio. La cantidad de agua que sale por infiltración de la presa es de $9.95\text{ m}^3/\text{h}$.

Tabla 4-57 Caudal Respuesta Muro Final de la presa con $h= 30\text{m}$ y 1.3m de diámetro (3er Análisis) (Elaboración propia, 2020)

Profundidad (m)	Caudal Respuesta Estrato	
	Inicial (m^3/s)	Estrato Medio (m^3/s)
	A	B
30 m	$0.00276\text{ m}^3/\text{s}$	$0.00273\text{ m}^3/\text{s}$

Pilote Secante al Final de la presa con profundidad de 35 metros

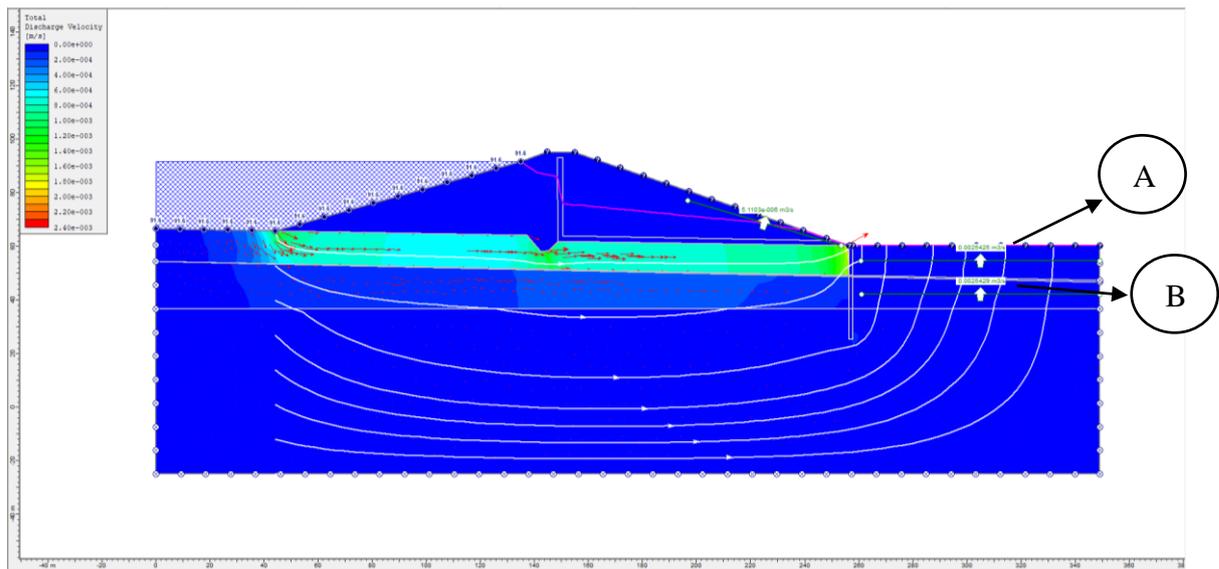


Figura 4-32 Análisis de Infiltración Muro al Final de la presa con $h = 35\text{m}$ y 1.3m de diámetro (3er Análisis) (Elaboración propia, 2020)

En la siguiente imagen, se puede visualizar los valores de caudal respuesta para una profundidad de 35 metros de un muro pantalla conformado por Pilotes Secantes, el cual cumple con el Q_{fmp} en el estrato inicial y el medio. La cantidad de agua que sale por infiltración de la presa es de $10.05 \text{ m}^3/\text{h}$.

Tabla 4-58 Caudal Respuesta Muro Final de la presa con $h= 35\text{m}$ y 1.3m de diámetro (3er Análisis) (Elaboración propia, 2020)

Profundidad (m)	Caudal Respuesta Estrato	
	Inicial (m^3/s)	Estrato Medio (m^3/s)
	A	B
35 m	$0.00254 \text{ m}^3/\text{s}$	$0.00254 \text{ m}^3/\text{s}$

Muro Pantalla con Diámetro de Pilote Secantes de 1.5m

Pilote Secante al Inicio de la presa con profundidad de 25 metros

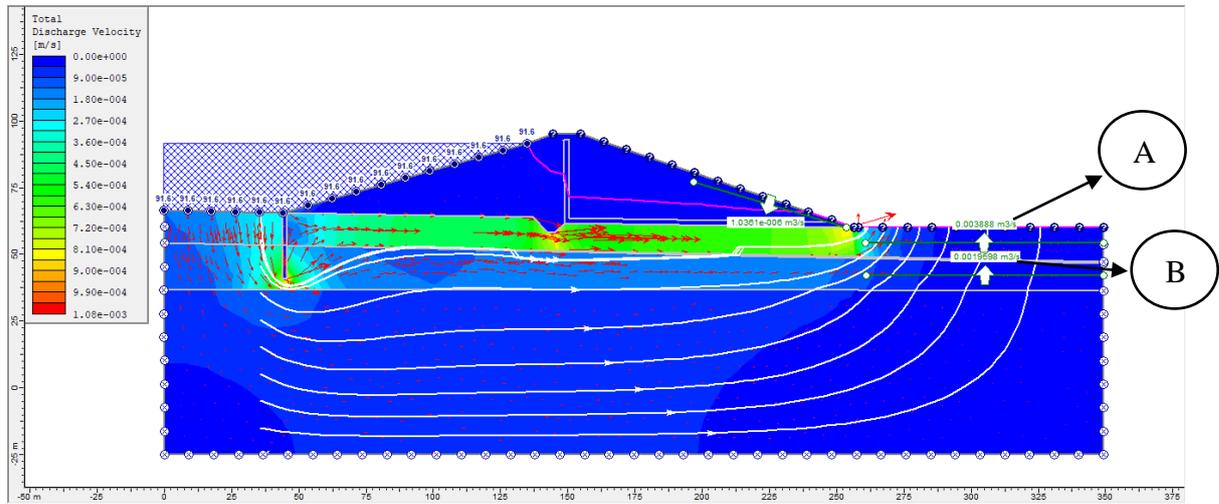


Figura 4-33 Análisis de Infiltración Muro al Inicio de la presa con $h = 25\text{m}$ y 1.5m de diámetro (3er Análisis)
(Elaboración propia, 2020)

Se realizó una verificación para los diferentes profundidades previamente mencionadas colocando los Pilotes Secantes al inicio de la presa de tierra. En la siguiente imagen, se puede visualizar los valores de caudal respuesta para una profundidad de 25 metros, el cual no cumple con el Q_{fmp} . La cantidad de agua que sale por infiltración de la presa es de $13.97\text{ m}^3/\text{h}$.

Tabla 4-59 Caudal Respuesta Muro Inicio de la presa con $h= 25\text{m}$ y 1.5m de diámetro (3er Análisis) (Elaboración propia, 2020)

Profundidad (m)	Caudal Respuesta Estrato	Caudal Respuesta
	Inicial (m ³ /s)	Estrato Medio (m ³ /s)
	A	B
25 m	0.00388 m ³ /s	0.00195 m ³ /s

Pilote Secante al Inicio de la presa con profundidad de 30 metros

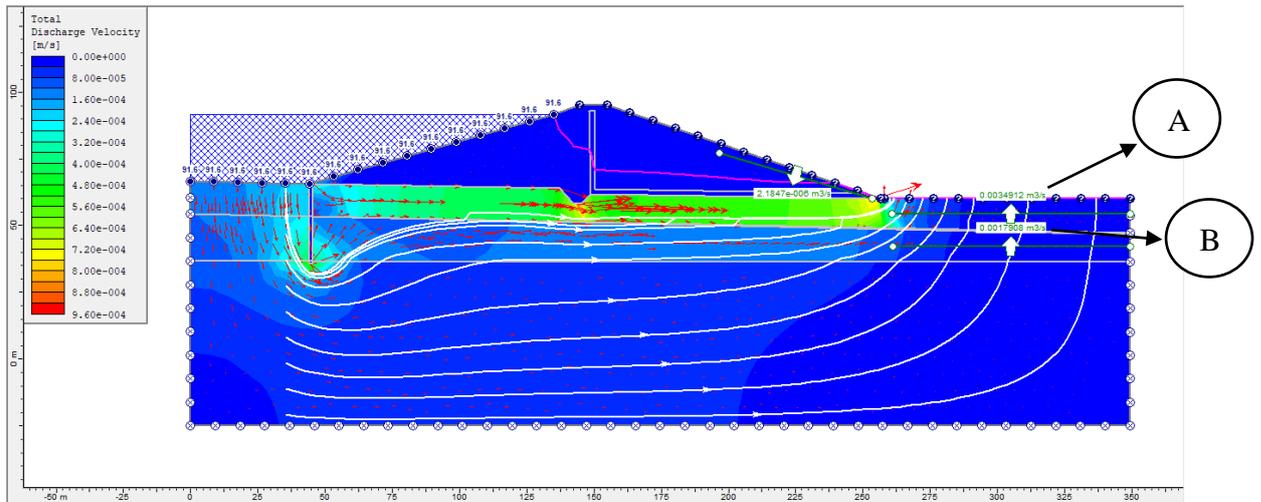


Figura 4-34 Análisis de Infiltración Muro al Inicio de la presa con $h = 30\text{m}$ y 1.5m de diámetro (3er Análisis) (Elaboración propia, 2020)

En la siguiente imagen, se puede visualizar los valores de caudal respuesta para una profundidad de 30 metros de un muro pantalla conformado por Pilotes Secantes, el cual no cumple con el Q_{fmp} . La cantidad de agua que sale por infiltración de la presa es de $12.56\text{ m}^3/\text{h}$.

Tabla 4-60 Caudal Respuesta Muro Inicio de la presa con $h= 30\text{m}$ y 1.5m de diámetro (3er Análisis) (Elaboración propia, 2020)

Profundidad (m)	Caudal Respuesta Estrato	
	Inicial (m ³ /s)	Caudal Respuesta Estrato Medio (m ³ /s)
	A	B
30 m	0.00349 m ³ /s	0.00179 m ³ /s

Pilote Secante al Inicio de la presa con profundidad de 35 metros

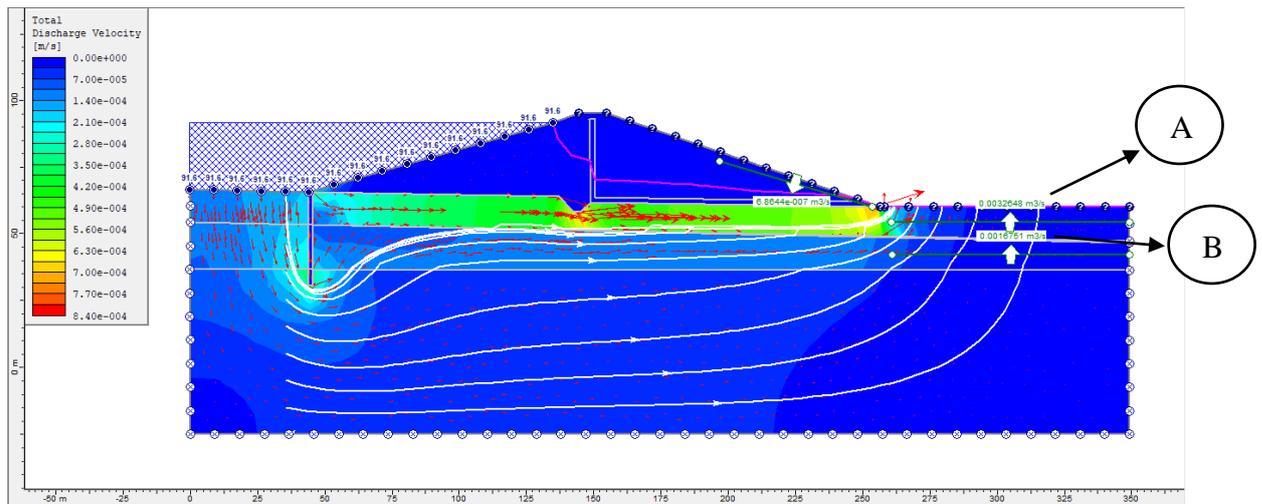


Figura 4-35 Análisis de Infiltración Muro al Inicio de la presa con $h = 35\text{m}$ y 1.5m de diámetro (3er Análisis) (Elaboración propia, 2020)

En la siguiente imagen, se puede visualizar los valores de caudal respuesta para una profundidad de 35 metros de un muro pantalla conformado por Pilotes Secantes, el cual no cumple con el Q_{fmp} . La cantidad de agua que sale por infiltración de la presa es de $11.74\text{ m}^3/\text{h}$.

Tabla 4-61 Caudal Respuesta Muro Inicio de la presa con $h = 35\text{m}$ y 1.5m de diámetro (3er Análisis) (Elaboración propia, 2020)

Profundidad (m)	Caudal Respuesta Estrato	
	Inicial (m^3/s)	
	A	B
35 m	$0.00326\text{ m}^3/\text{s}$	$0.00167\text{ m}^3/\text{s}$

Pilote Secante al Centro de la presa con profundidad de 25 metros

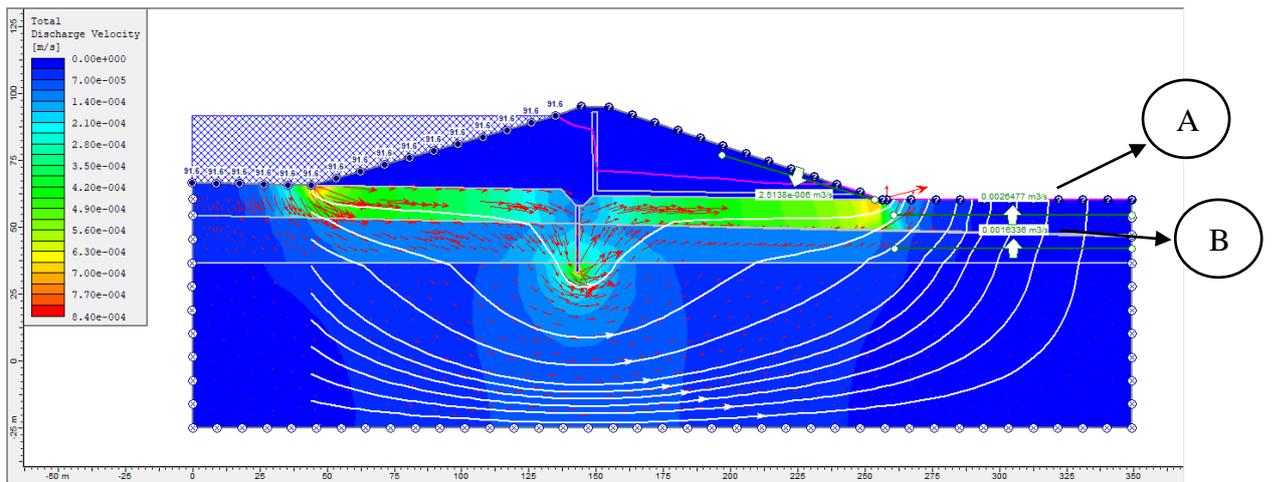


Figura 4-36 Análisis de Infiltración Muro al Centro de la presa con $h=25\text{m}$ y 1.5m de diámetro (3er Análisis) (Elaboración propia, 2020)

Se realizó una verificación para los diferentes profundidades previamente mencionadas colocando los Pilotes Secantes al centro de la presa de tierra. En la siguiente imagen, se puede visualizar los valores de caudal respuesta para una profundidad de 25 metros, el cual si cumple con el Q_{fmp} . La cantidad de agua que sale por infiltración de la presa es de $9.50\text{ m}^3/\text{h}$.

Tabla 4-62 Caudal Respuesta Muro Centro de la presa con $h=25\text{m}$ y 1.5m de diámetro (3er Análisis) (Elaboración propia, 2020)

Profundidad (m)	Caudal Respuesta Estrato	Caudal Respuesta
	Inicial (m^3/s)	Estrato Medio (m^3/s)
	A	B
25 m	$0.00264\text{ m}^3/\text{s}$	$0.00163\text{ m}^3/\text{s}$

Pilote Secante al Centro de la presa con profundidad de 30 metros

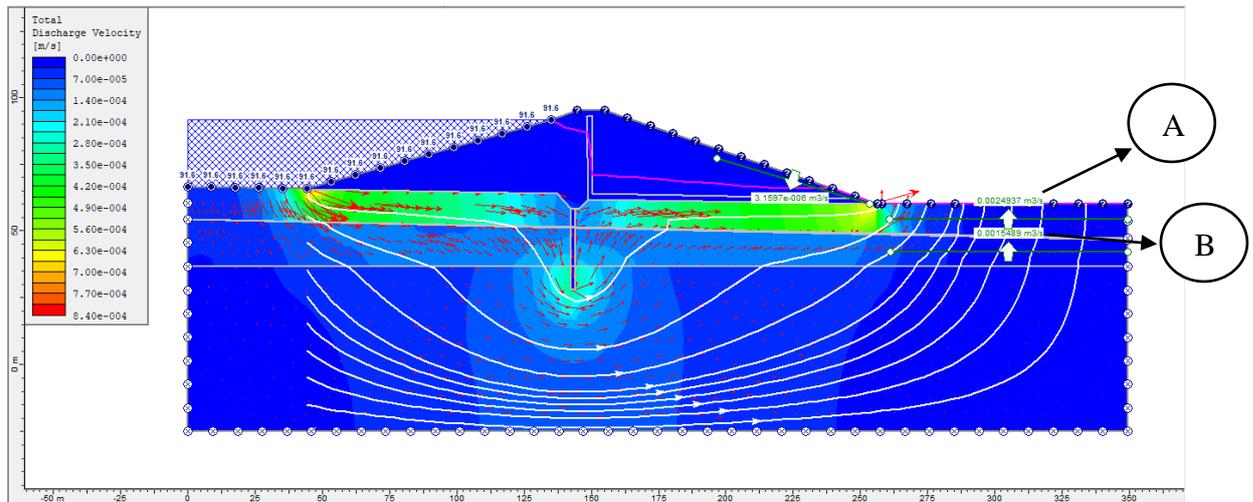


Figura 4-37 Análisis de Infiltración Muro al Centro de la presa con $h = 30\text{m}$ y 1.5m de diámetro (3er Análisis) (Elaboración propia, 2020)

En la siguiente imagen, se puede visualizar los valores de caudal respuesta para una profundidad de 30 metros de un muro pantalla conformado por Pilotes Secantes, el cual si cumple con el Q_{fmp} . La cantidad de agua que sale por infiltración de la presa es de $8.96 \text{ m}^3/\text{h}$.

Tabla 4-63 Caudal Respuesta Muro Centro de la presa con $h= 30\text{m}$ y 1.5m de diámetro (3er Análisis) (Elaboración propia, 2020)

Profundidad (m)	Caudal Respuesta Estrato	Caudal Respuesta
	Inicial (m^3/s)	Estrato Medio (m^3/s)
	A	B
30 m	$0.00249 \text{ m}^3/\text{s}$	$0.00155 \text{ m}^3/\text{s}$

Pilote Secante al Centro de la presa con profundidad de 35 metros

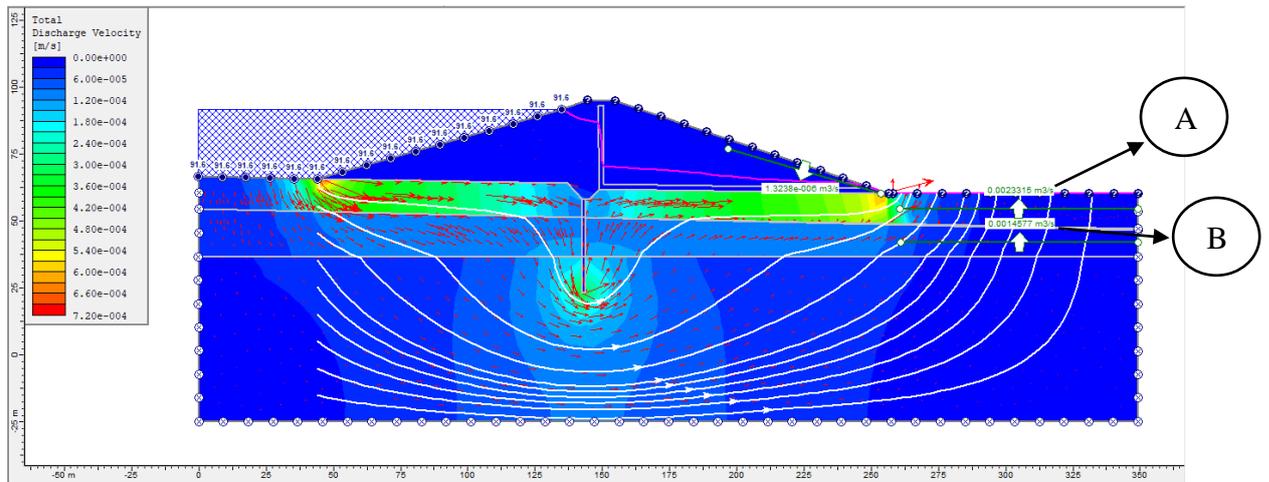


Figura 4-38 Análisis de Infiltración Muro al Centro de la presa con $h = 35\text{m}$ y 1.5m de diámetro (3er Análisis) (Elaboración propia, 2020)

En la siguiente imagen, se puede visualizar los valores de caudal respuesta para una profundidad de 35 metros de un muro pantalla conformado por Pilotes Secantes, el cual no cumple con el Q_{fmp} . La cantidad de agua que sale por infiltración de la presa es de $8.39\text{ m}^3/\text{h}$.

Tabla 4-64 Caudal Respuesta Muro Centro de la presa con $h = 35\text{m}$ y 1.5m de diámetro (3er Análisis) (Elaboración propia, 2020)

Profundidad (m)	Caudal Respuesta Estrato	Caudal Respuesta
	Inicial (m^3/s)	Estrato Medio (m^3/s)
	A	B
35 m	$0.00233\text{ m}^3/\text{s}$	$0.00146\text{ m}^3/\text{s}$

Pilote Secante al Final de la presa con profundidad de 25 metros

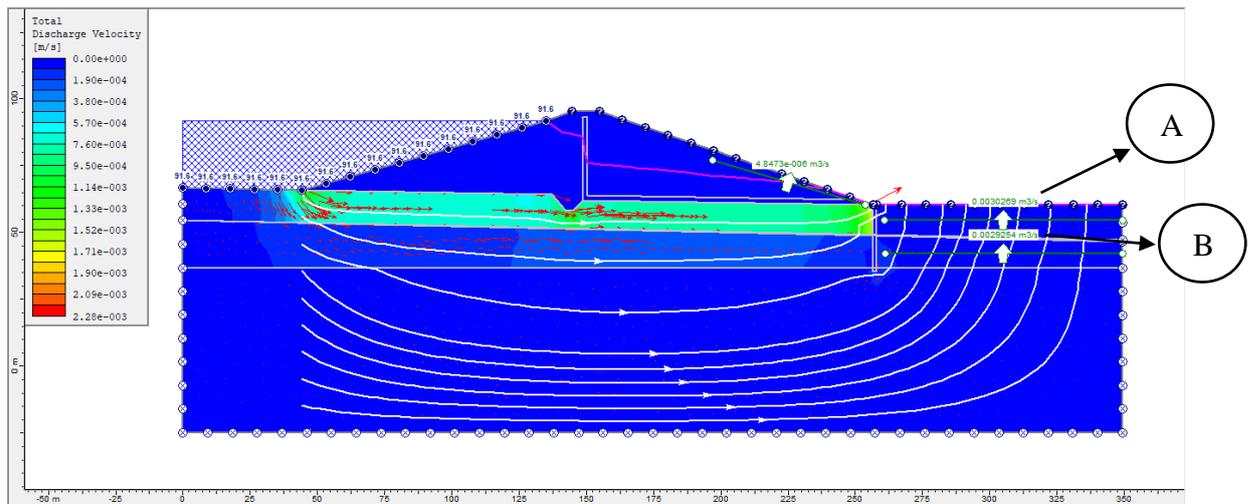


Figura 4-39 Análisis de Infiltración Muro al Final de la presa con $h = 25\text{m}$ y 1.5m de diámetro (3er Análisis) (Elaboración propia, 2020)

Se realizó una verificación para los diferentes profundidades previamente mencionadas colocando los Pilotes Secantes al centro de la presa de tierra. En la siguiente imagen, se puede visualizar los valores de caudal respuesta para una profundidad de 25 metros, el cual, si cumple con el Q_{imp} . La cantidad de agua que sale por infiltración de la presa es de $10.91\text{ m}^3/\text{h}$.

Tabla 4-65 Caudal Respuesta Muro Final de la presa con $h = 25\text{m}$ y 1.5m de diámetro (3er Análisis) (Elaboración propia, 2020)

Profundidad (m)	Caudal Respuesta Estrato	
	Inicial (m^3/s)	
	A	B
25 m	0.00303 m^3/s	0.00293 m^3/s

Pilote Secante al Final de la presa con profundidad de 30 metros

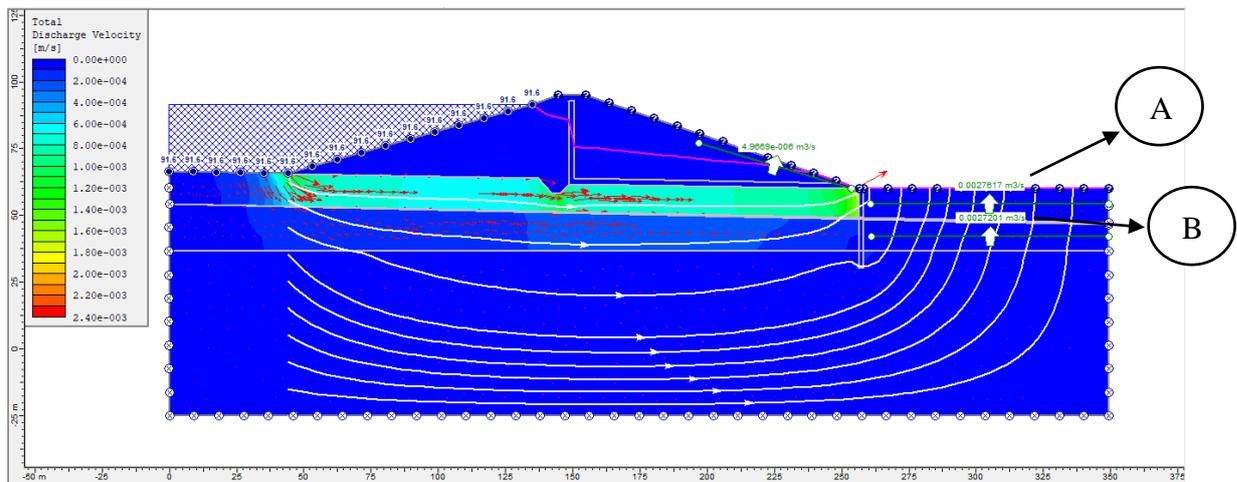


Figura 4-40 Análisis de Infiltración Muro al Final de la presa con $h = 30\text{m}$ y 1.5m de diámetro (3er Análisis) (Elaboración propia, 2020)

En la siguiente imagen, se puede visualizar los valores de caudal respuesta para una profundidad de 30 metros de un muro pantalla conformado por Pilotes Secantes, el cual si cumple con el Q_{fmp} . La cantidad de agua que sale por infiltración de la presa es de $9.94\text{ m}^3/\text{h}$.

Tabla 4-66 Caudal Respuesta Muro Final de la presa con $h = 30\text{m}$ y 1.5m de diámetro (3er Análisis) (Elaboración propia, 2020)

Profundidad (m)	Caudal Respuesta Estrato	
	Inicial (m^3/s)	Estrato Medio (m^3/s)
	A	B
30 m	$0.00276\text{ m}^3/\text{s}$	$0.00272\text{ m}^3/\text{s}$

Pilote Secante al Final de la presa con profundidad de 35 metros

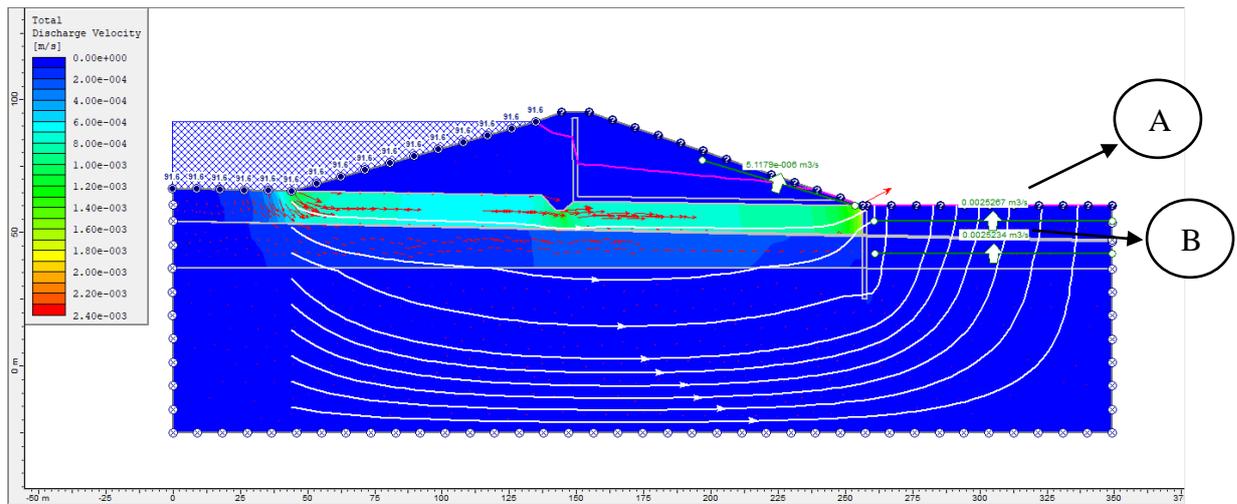


Figura 4-41 Análisis de Infiltración Muro al Final de la presa con $h = 35\text{m}$ y 1.5m de diámetro (3er Análisis) (Elaboración propia, 2020)

En la siguiente imagen, se puede visualizar los valores de caudal respuesta para una profundidad de 35 metros de un muro pantalla conformado por Pilotes Secantes, el cual no cumple con el Q_{fmp} . La cantidad de agua que sale por infiltración de la presa es de $9.11 \text{ m}^3/\text{h}$.

Tabla 4-67 Caudal Respuesta Muro Final de la presa con $h = 35\text{m}$ y 1.5m de diámetro (3er Análisis) (Elaboración propia, 2020)

Profundidad (m)	Caudal Respuesta Estrato	Caudal Respuesta
	Inicial (m^3/s)	Estrato Medio (m^3/s)
	A	B
35 m	$0.00253 \text{ m}^3/\text{s}$	$0.00252 \text{ m}^3/\text{s}$

Al concluir este análisis, en el programa Slide, se procedió a realizar una tabla resumen para poder visualizar de una manera más rápida y directa el impacto de las dimensiones, posición y profundidad de pilotes con el caudal respuesta que genera el agua subterránea. Asimismo, se elegirán las alternativas con mayor potencial (cuyos valores de caudal respuesta sean exclusivamente menor al Q_{fmp}) teniendo en cuenta todas las posiciones y diámetros de pilotes, pero considerando una profundidad de excavación mínima. La elección de dichas alternativas se puede ver coloreado en la siguiente tabla.

Tabla 4-68 Resumen Comparación de caudal respuesta a diferentes posiciones, diámetros y profundidad (3er Análisis)
(Elaboración propia, 2020)

Posición	Diámetro (m)	Profundidad (m)	Caudal Respuesta (m3/s)
Centro	1.5	35	0.00233
Centro	1.5	30	0.00249
Final	1.5	35	0.00253
Final	1.3	35	0.00254
Centro	1.3	35	0.00256
Inicio	1.3	35	0.00260
Centro	1.5	25	0.00264
Centro	1.3	30	0.00274
Final	1.5	30	0.00276
Final	1.3	30	0.00276
Inicio	1.3	30	0.00277
Centro	1.3	25	0.00291
Final	1.5	25	0.00303
Final	1.3	25	0.00304
Inicio	1.3	25	0.00307
Inicio	1.5	35	0.00326
Inicio	1.5	30	0.00349
Inicio	1.5	25	0.00388

4.3.4.3 Cantidad de pilotes a utilizar en el muro pantalla

Se procedió al análisis de la cantidad de pilotes a utilizar para formar el muro pantalla impermeable debajo de la presa Coltani. Para ello, se utilizó el plano “Diseño de la presa Coltani Planta, Perfil Longitudinal y Sección Típica”, obtenido del expediente técnico de la obra. Esto con el objetivo de determinar el ancho de la misma, así como tener una mejor visión de cómo sería la presa cuando esté totalmente construida.

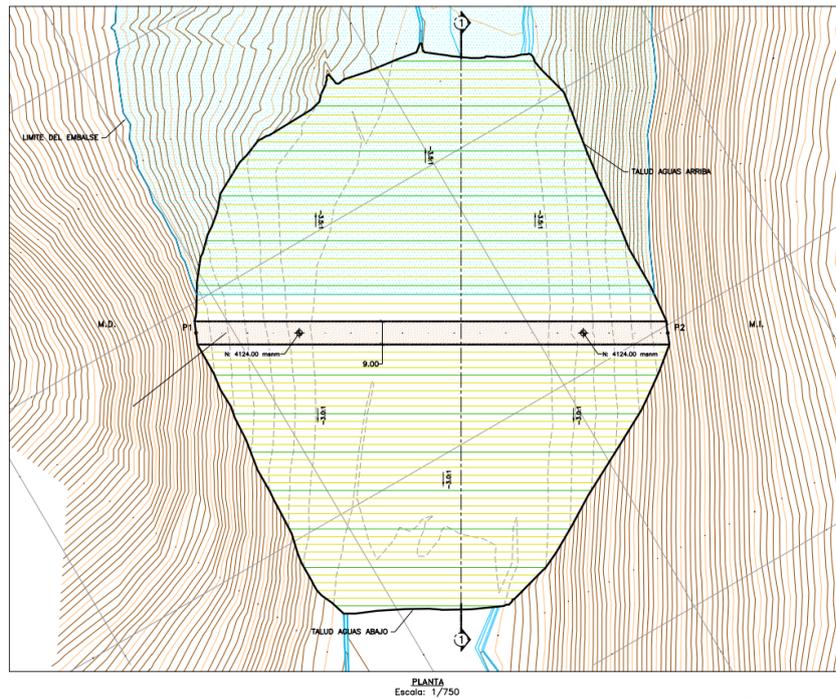


Figura 4-42 Diseño de la Presa Coltani – Planta (Expediente Técnico Presa Coltani, 2013)

CARACTERISTICAS DE LA PRESA COLTANI	
COTA DE CORONACION	4,124.00 msnm.
NIVEL MAXIMO DE ALMACENAMINETO	4,121.00 msnm.
BORDE LIBRE	3.00 m.
ALTURA MAXIMA	30.00 m.
ANCHO DE CORONA	9.00 m.
TALUD AGUAS ARRIBA	3.5H:1.0V
TALUD AGUAS ABAJO	3.0H:1.0V
LONGITUD DE CORONA	182.70 m.
VOLUMEN DE PRESA	424.355.00 m3.

Obteniendo la longitud de la corona, se determinó la longitud que tendrá nuestro muro pantalla en la zona central de la presa. Utilizando AutoCAD, con el archivo “Exploraciones Geotécnicas” del expediente técnico de la presa Coltani, se midió también la distancia entre cotas tanto para un muro pantalla al inicio (entre las curvas de nivel de 4100 msnm) y al final

de la presa (entre las curvas de nivel de 4091 msnm), siendo estos valores 100m y 75m respectivamente.

La separación entre ejes de los pilotes es un factor importante a analizar ya que de eso depende la cantidad de pilotes a utilizar y la menor cantidad de orificios posibles entre cada uno de estos. A continuación, se presenta la distribución de los pilotes secantes para conformar una pantalla impermeable.

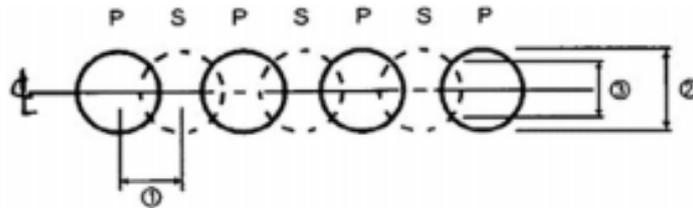


Figura 4-43 Secant Wall (Cutoffs for dam murs parafoilles, 2018)

Como se observa, estos están distribuidos alternando entre pilotes primarios (concreto armado) y pilotes secundarios (concreto simple). El material con el que están hechos los pilotes secantes puede variar, pero debido a que nuestro proyecto es denominado una “presa grande”, estos serán conformados de concreto $f'c = 250 \text{ kg/cm}^2$. La distancia entre ejes de cada pilote secante varía entre 0.6 – 0.9 m, siendo estos unos valores estándar. Sin embargo, para nuestro caso de estudio, se decidió utilizar una separación entre ejes de 0.6m para evitar una cantidad grande de orificios de pilote a pilote, logrando una proximidad mayor a una pantalla homogénea. A continuación, se presenta el cálculo de número de pilotes para cada alternativa elegida anteriormente.

Cálculo de cantidad de pilotes

Alternativa 1:

Diámetro de pilotes: 1.3m

Separación entre ejes: 0.6m

Longitud al Inicio de la presa: 100m

$$\text{Cantidad de pilotes: } \frac{100}{1.3-0.3} \rightarrow \mathbf{100 \text{ Pilotes}}$$

Alternativa 2:

Diámetro de pilotes: 1.3m

Separación entre ejes: 0.6m

Longitud al Centro de la presa: 182.70m

$$\text{Cantidad de pilotes: } \frac{182.70}{1.3-0.3} \rightarrow \mathbf{183 \text{ Pilotes}}$$

Alternativa 3:

Diámetro de pilotes: 1.3m

Separación entre ejes: 0.6m

Longitud al Final de la presa: 75m

$$\text{Cantidad de pilotes: } \frac{75}{1.3-0.3} \rightarrow \mathbf{75 \text{ Pilotes}}$$

Alternativa 4:

Diámetro de pilotes: 1.5m

Separación entre ejes: 0.6m

Longitud al Centro de la presa: 182.70m

$$\text{Cantidad de pilotes: } \frac{182.70}{1.5-0.3} \rightarrow \mathbf{153 \text{ Pilotes}}$$

Alternativa 5:

Diámetro de pilotes: 1.5m

Separación entre ejes: 0.6m

Longitud al Final de la presa: 75m

$$\text{Cantidad de pilotes: } \frac{75}{1.5-0.3} \rightarrow \mathbf{63 \text{ Pilotes}}$$

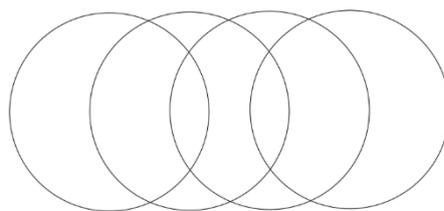


Figura 4-44 Esquema de Distribución de Pilotes Secantes (Elaboración propia, 2020)

Tabla 4-69 Resumen de la cantidad de pilotes respecto a las alternativas propuestas (Elaboración propia, 2020)

Ubicación	Diámetro (m)	Profundidad (m)	Cantidad de pilotes (#)
Al Inicio de la presa	1.3	25	100
Al Centro de la presa	1.3	25	183
Al Final de la presa	1.3	25	75
Al Centro de la presa	1.5	25	153
Al Final de la presa	1.5	25	63

Con todos los cálculos y análisis realizados a lo largo de este punto, los Pilotes Secantes de la Presa Coltani tendrán las características de una de las alternativas propuestas. En base a estas, se priorizo su constructabilidad y posteriormente el aspecto económico que conlleva realizar cada una de estas opciones. Todo esto con el objetivo de tener una mayor visión al momento de la elección de las propiedades finales con las que contarán los pilotes.

4.3.5 Proceso Constructivo

En este punto se detalló las diferentes etapas que comprende la construcción del muro de Pilotes Secantes. Está compuesta mediante una secuencia de actividades, las cuales fueron desarrolladas a continuación.

Perforación e Introducción Simultanea de la armadura

Para esta primera etapa, la maquinaria seleccionada se debe encargar de la perforación en el suelo mediante el uso de lodos bentónico, los cuales evitaban el desmoronamiento en las paredes del suelo. Para el proyecto se usará una perforadora giratoria cuyas propiedades cumplen con lo solicitado para nuestro muro impermeable. Esta tiene un tamaño máximo de pilote de 1.5m y una profundidad máxima de 56m.



Figura 4-45 SR150C Perforadora Giratoria (SANY, 2020)

Se tendrá que excavar hasta la profundidad deseada para luego poder realizar la limpieza en el fondo de la excavación. Primero serán excavados los pilotes secundarios de forma alternada, dejando el espacio para el pilote primario, con la dimensión de diámetro especificada. Después, se procederá a excavar estos últimos con el diámetro requerido. El procedimiento se repetirá hasta culminar toda la extensión del muro.

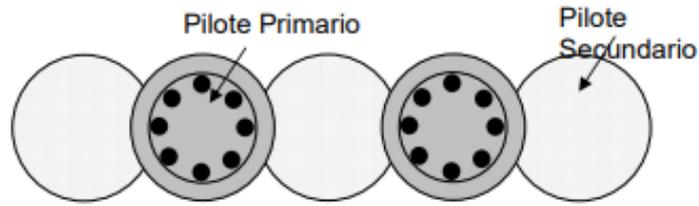


Figura 4-46 Pilotes Primarios y Secundarios (Geofortis, s/f)



Figura 4-47 Perforación y Excavación (Pilotes Keller, s/f)

Introducción de la armadura en Pilotes Primarios

Luego de la perforación realizada con el diámetro determinado, se procederá a la colocación de la armadura de acero, previamente habilitado, el cual nos permitirá reducir los tiempos de esta actividad. Este será colocado únicamente en los pilotes primarios que conforman el muro pantalla.



Figura 4-48 Colocación de Armadura en Pilotes Primarios



Figura 4-49 Habilitación y Colocación de Armadura (Pilotes Keller, s/f)

Vaciado de Concreto

Una vez culminada las dos primeras etapas, se procede a verter el concreto escogido dentro de los diámetros de los Pilotes Secantes con la ayuda de un conducto de alimentación. La tubería Tremie colocará el concreto de forma ascendente para evitar la segregación por la diferencia de altura entre el suelo superficial y el fondo de la excavación. El concreto será vertido inicialmente en los pilotes secundarios para luego continuar con los pilotes primarios. Es importante señalar, que el concreto vertido en los pilotes secundarios será concreto pobre. Además, simultáneamente el suelo excedente será extraído a la parte superior del terreno.

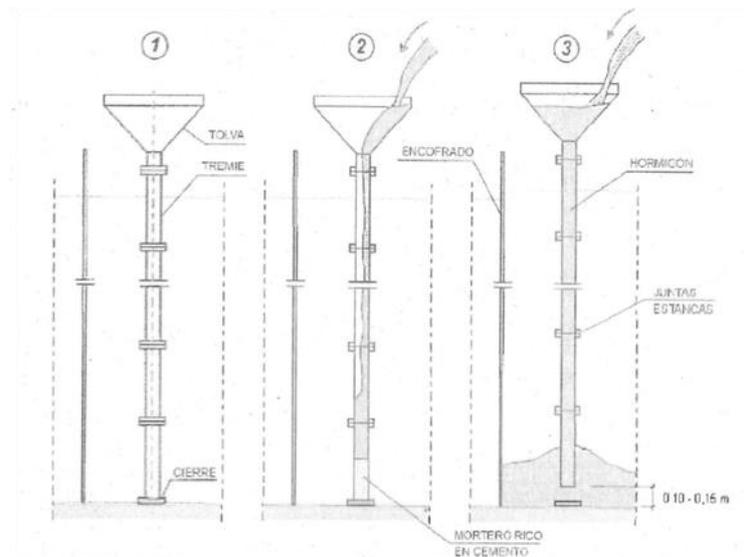


Figura 4-50 Proceso de uso de la tubería Tremie (Fultum, 2020)



Figura 4-51 Pilotes con Entubación (Pilotes Keller, s/f)



Figura 4-52 Colocación del concreto a través del tubo Tremie (Pilotes Keller, s/f)

Secuencia de la construcción de los pilotes

Esta secuencia está comprendida por 5 pasos los cuales serán desarrollados en los siguientes puntos.

1. Mediante el cabezal giratorio y el oscilador de la carcasa, la tubería avanzara hasta llegar a la profundidad requerida, el cual origina el orificio según el diámetro deseado del Pilote Secante.
2. Se colocará la armadura de acero de refuerzo en los pilotes primarios

3. Mediante la tubería de Tremie, se rellenará del pilote con concreto de forma ascendente.
4. Se completa el procedimiento con la formación de la tapa de los pilotes secantes.

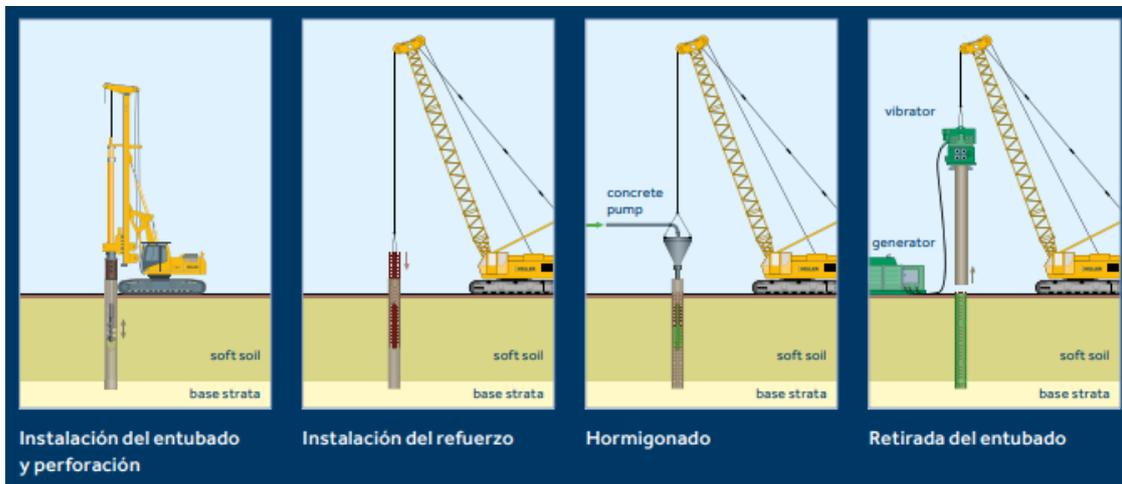


Figura 4-53 Descripción del Proceso (Pilotes Keller, s/f)

4.3.6 Comparación de Alternativas con respecto al Costo de Ejecución

El muro pantalla impermeable, conformado por Pilotes Secantes, será realizado con concreto en masa, cuyo precio fluctuará con el tiempo. Es por ello que solo se enfocó en los costos de ejecución, el cual comprende la perforación en el suelo y colocación de concreto. Esto conlleva a diferencias, aproximadas, en la cantidad de inversión respecto a las alternativas presentadas. Además, permitió la discusión de la mejor propuesta, no solamente en términos de eficacia sino también en términos financieros.

Pilotes Secantes de Concreto en Masa

La ejecución de los pilotes debajo de la presa Coltani será “in situ” para la conformación del muro impermeable. Se desarrolló el costo de las diferentes alternativas, las cuales varían en diámetro, profundidad y cantidad de los Pilotes Secantes.

Tabla 4-70 Longitud Total en (m) de las 5 Alternativas (Elaboración propia, 2020)

Longitudes Totales de los Diferentes Alternativas				
Alternativas	Diámetro	Profundidad	Cantidad	Longitud Total
	(m)	(m)		
Alternativa 1	1.3	25	100	2500
Alternativa 2	1.3	25	183	4575
Alternativa 3	1.3	25	75	1875
Alternativa 4	1.5	25	153	3825
Alternativa 5	1.5	25	63	1575

En el cuadro anterior, se determinó, para las diferentes alternativas, la longitud total mediante la profundidad de perforación por la cantidad de pilotes para cada una de ellas.

En el siguiente cuadro, se presenta el costo de ejecución de Pilotes Secantes para cada diámetro en metro lineal (ml), permitiendo obtener un costo total de manera individual.

Tabla 4-71. Presupuesto para cada Diámetro de Pilote (Elaboración propia, 2020)

Elaboración del Presupuesto por el Método de Pilotes Secantes				
Descripción de Recurso	Unidad	Cantidad	P.U (S/)	Parcial (S/)
Ejecución de Pilotes (D=1.3 m)	ml	1	1553.49	1553.49
Ejecución de Pilotes (D=1.5 m)	ml	1	1792.50	1792.50

A continuación, se presenta el cuadro de los análisis de precios unitarios con un costo total evidenciado la diferencia económica que representa entre ellas. Además, el cuadro estará distribuido de la alternativa menor a mayor en referencia al costo en soles (S/).

Tabla 4-72. Presupuesto Total para cada Alternativa (Elaboración propia, 2020)

Elaboración del Presupuesto Total por el Método de Pilotes Secantes					
Descripción de Recurso	Diámetro (m)	Unidad	Cantidad	P.U (S/)	Parcial (S/)
Alternativa 5	1.5	ml	1575	1792.50	2'823,187.50
Alternativa 3	1.3	ml	1875	1553.49	2'912,793.75
Alternativa 1	1.3	ml	2500	1533.49	3'833,725.00
Alternativa 4	1.5	ml	3825	1792.50	6'856,312.50
Alternativa 2	1.3	ml	4575	1533.49	7'015,716.75

4.3.7 Diseño Global (Planos a detalle y Esquemas)

Con el objetivo de presentar las diferentes alternativas que se obtuvieron se realizaron diversos planos a detalle y esquemas de los Pilotes Secantes y el muro pantalla conformado por los mismos. Estos servirán tanto para entender las dimensiones de los pilotes como las diferentes ubicaciones en donde se colocará el muro pantalla. Se utilizó el software AutoCAD para el desarrollo de cada una de las alternativas.

4.3.7.1 Alternativas de Ubicación de Muro Pantalla conformado por Pilotes Secantes

Plano: Alternativas de Ubicación de Muro Pantalla

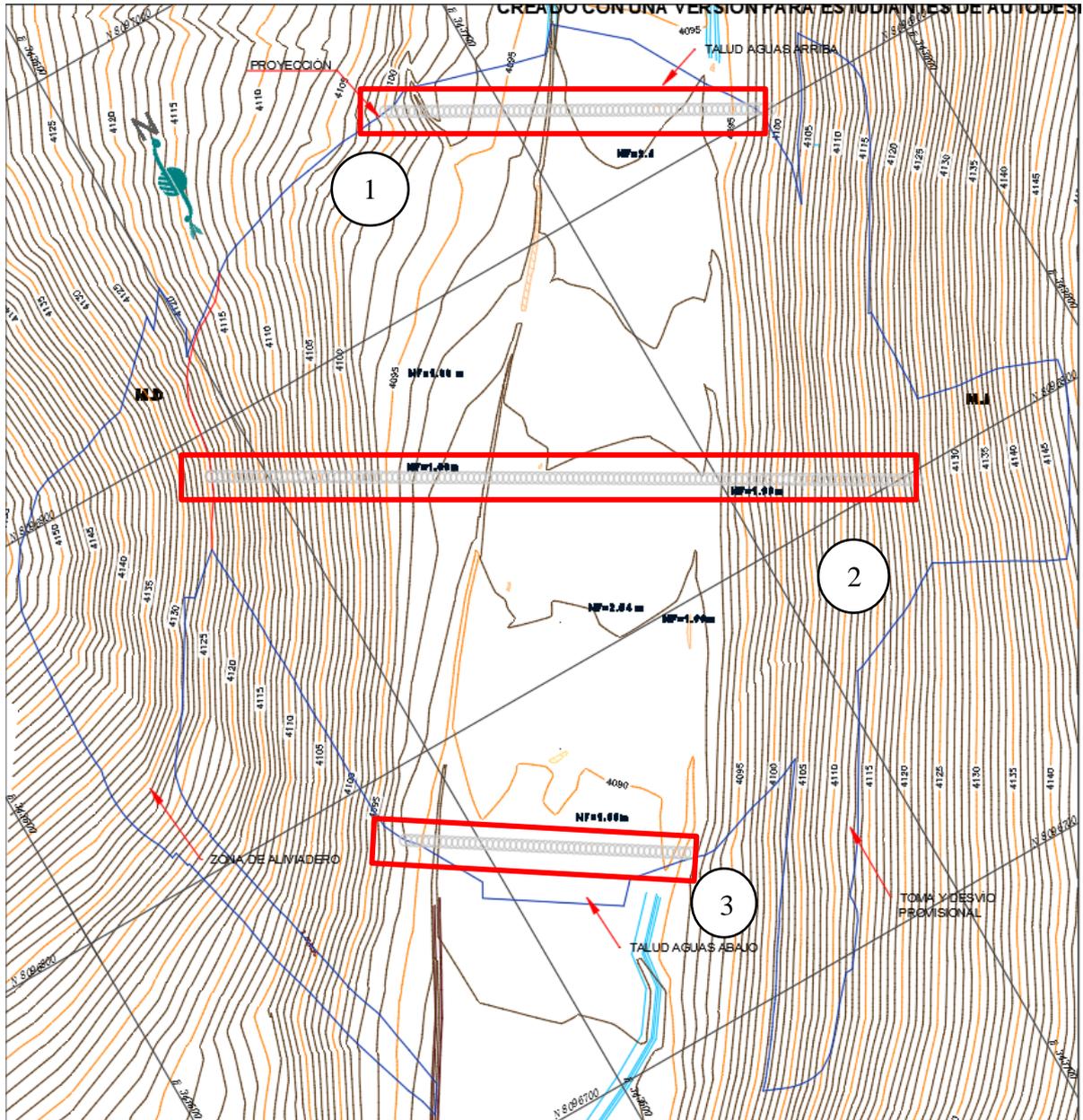


Figura 4-54 Plano Alternativas de ubicación de muro pantalla por medio de Pilotes Secantes (Expediente Técnico Presa Coltani, 2013)

En este plano se aprecian las diferentes alternativas de posición del muro pantalla. Los números presentados representan las alternativas de ubicación de los Pilotes Secantes

- **Numero 1:** Muro pantalla al inicio de la presa (entre las curvas de nivel de 4100 msnm)
- **Numero 2:** Muro pantalla al centro de la presa (debajo de la corona)
- **Numero 3:** Muro pantalla al final de la presa (entre las curvas de nivel de 4091 msnm)

4.3.7.2 Pilotes Secantes: Vista en Planta

Esquema: Vista en Planta de los Pilotes Secantes (Diámetro 1.3 y 1.5 m)

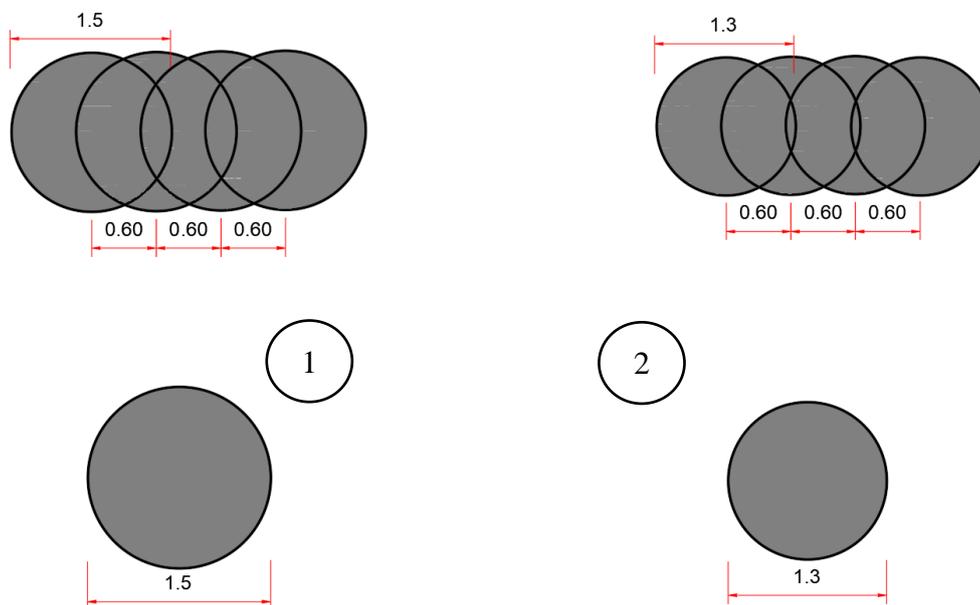


Figura 4-55 Plano en Planta de los Pilotes Secantes (Elaboración propia, 2020)

En este esquema se presenta la vista en planta de las dos alternativas a considerar para nuestro estudio.

- **Numero 1:** Pilote con 1.5 m de diámetro. Espaciamiento 0.60m
- **Numero 2:** Pilote con 1.3 m de diámetro. Espaciamiento de 0.60m

4.3.7.3 Pilotes Secantes: Vista en Perfil

Esquema: Perfil de las alternativas de Pilotes Secantes

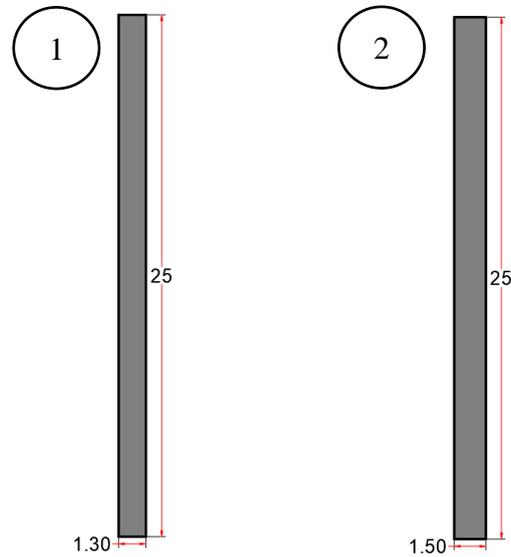


Figura 4-56 Esquema Perfil de los Pilotes Secantes (Elaboración propia, 2020)

En este esquema se presenta la vista en perfil de los Pilotes Secantes, y por ende también del muro pantalla, de las diferentes alternativas.

Numero 1: Muro pantalla conformado por Pilotes Secantes de 1.30m de diámetro y 25m de profundidad.

Numero 2: Muro pantalla conformado por Pilotes Secantes de 1.50m de diámetro y 25m de profundidad.

Esquema: Perfil de alternativas de Muros Pantalla conformado por Pilotes Secantes

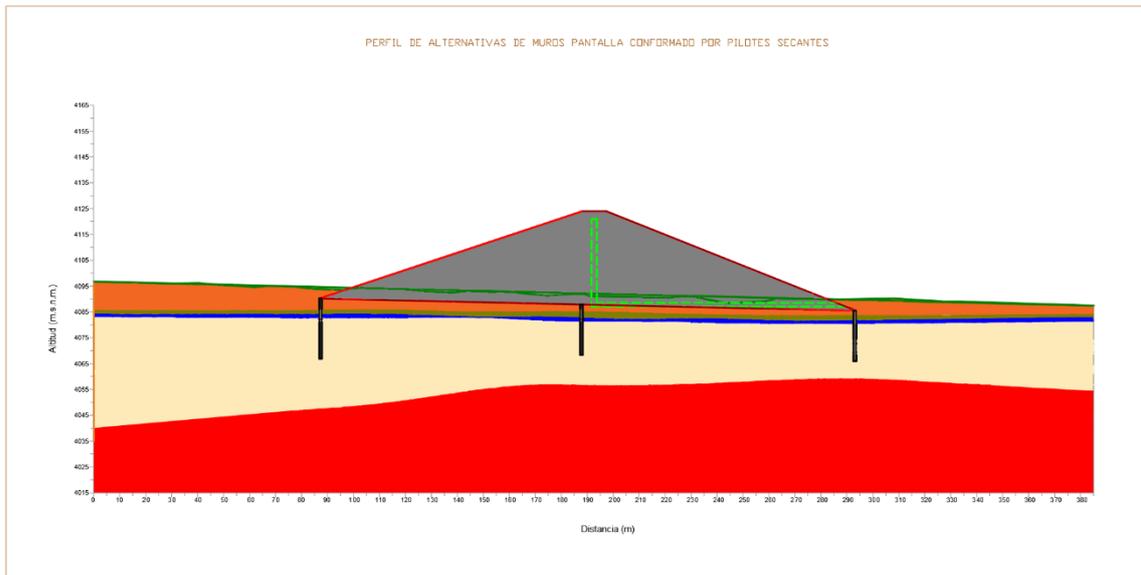


Figura 4-57 Esquema: Perfil de alternativas de Muros Pantalla conformado por Pilotes Secantes (Elaboración propia, 2020)

Este esquema permite visualizar las 3 alternativas de ubicación juntas de los pilotes debajo de la presa en una vista de perfil. Sin embargo, hay que tener en cuenta que existen 5 alternativas a desarrollar en este estudio (TABLA 4-73). Se hace énfasis a esto ya que al inicio de la presa existe una sola alternativa a considerar mientras que en las ubicaciones central y final de la misma se cuenta con dos alternativas en cada una con sus características respectivas.

4.3.7.4 Muro Pantalla de Pilotes Secantes: Vista Transversal

Plano: Cortes para Vista Transversal de alternativas del Muro Pantalla

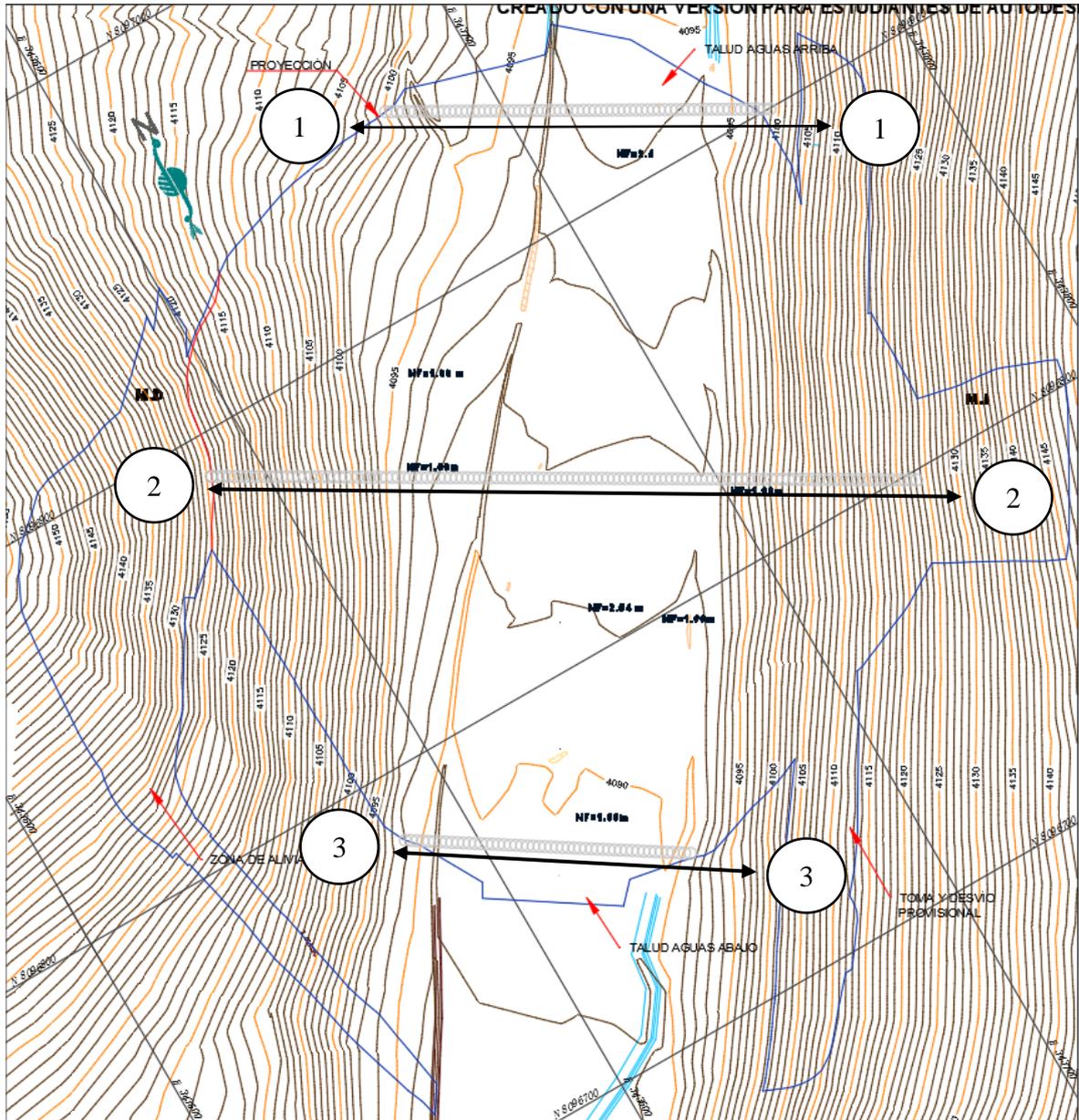


Figura 4-58 Plano: Cortes para Vista Transversal de alternativas del Muro Pantalla (Elaboración propia, 2020)

Esquema de alternativas de Muro Pantalla en Vista Transversal

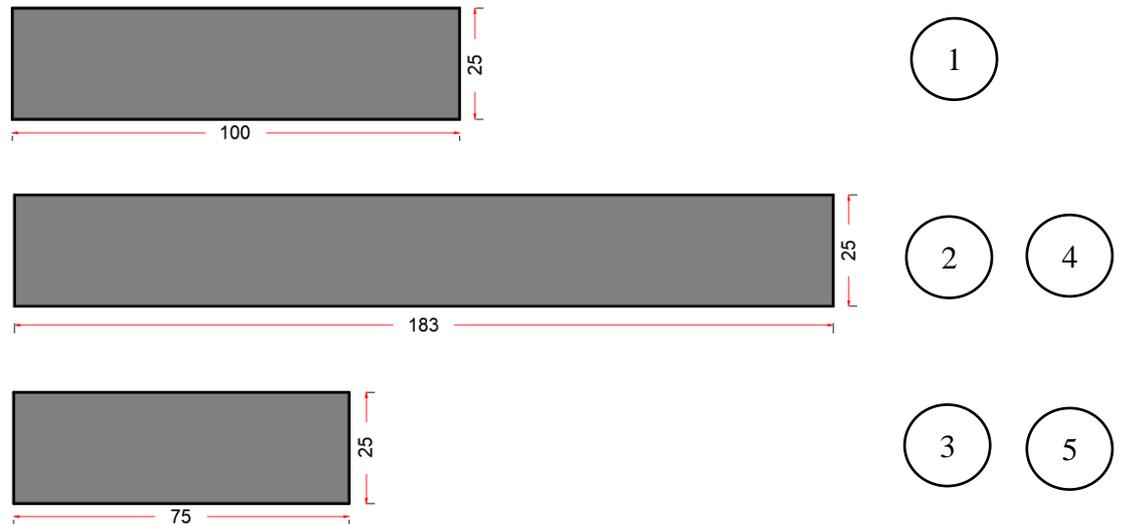


Figura 4-59 Esquema Transversal de muro conformado por Pilotes Secantes (Elaboración propia, 2020)

En este esquema se presenta la vista transversal de las diferentes alternativas del muro pantalla.

- **Alternativa 1:** Muro pantalla con 25m de profundidad y 100m de largo (Diámetro de pilote 1.3m)
- **Alternativa 2 y 4:** Muro pantalla con 25m de profundidad y 183m de largo (Diámetro de pilote 1.3m y 1.5m)
- **Alternativa 3 y 5:** Muro pantalla con 25m de profundidad y 75m de largo (Diámetro de pilote 1.3m y 1.5m)

Esquema Sección Transversal Corte 1 -1: Alternativa 1

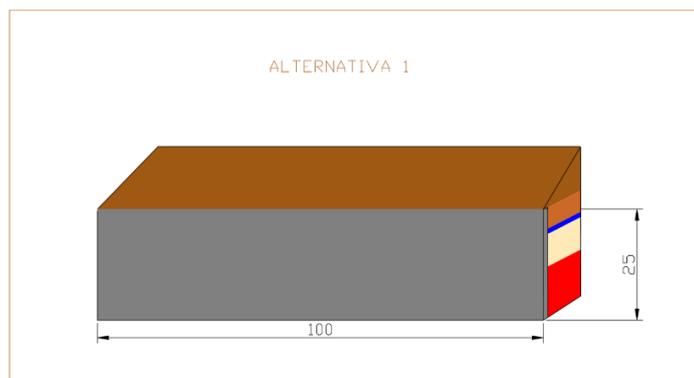


Figura 4-60 Esquema Sección Transversal Corte 1 -1: Alternativa 1 (Elaboración propia, 2020)

Esquema Sección Transversal Corte 2 -2: Alternativa 2 y 4

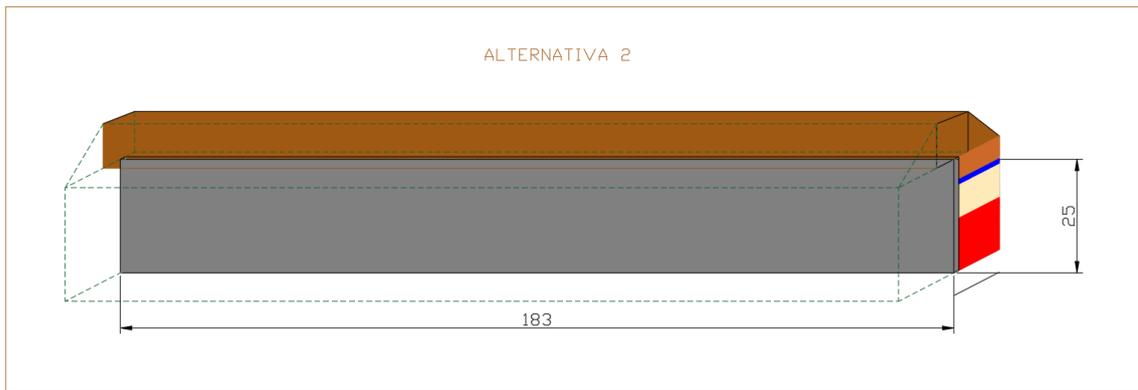


Figura 4-61 Esquema Sección Transversal Corte 2 -2: Alternativa 2 (Elaboración propia, 2020)

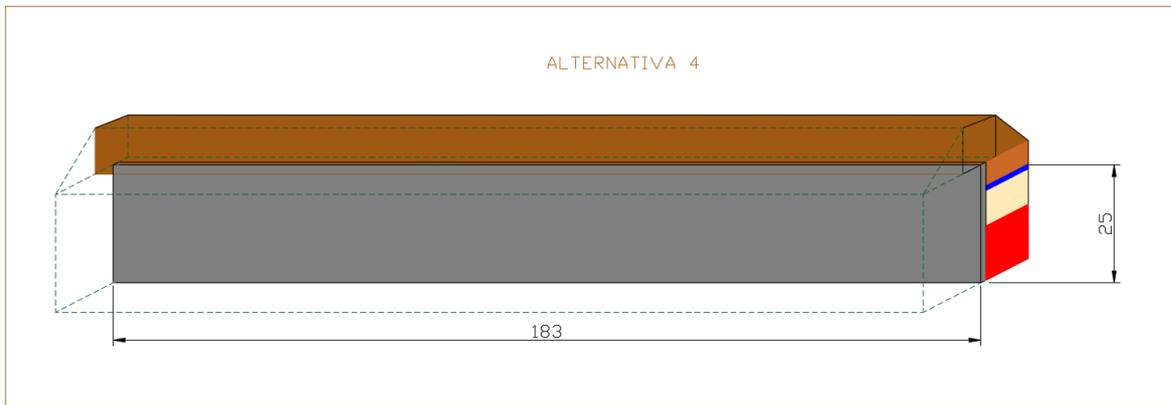


Figura 4-62 Esquema Sección Transversal Corte 2 -2: Alternativa 4 (Elaboración propia, 2020)

Esquema Sección Transversal Sección 3 -3: Alternativa 3 y 5

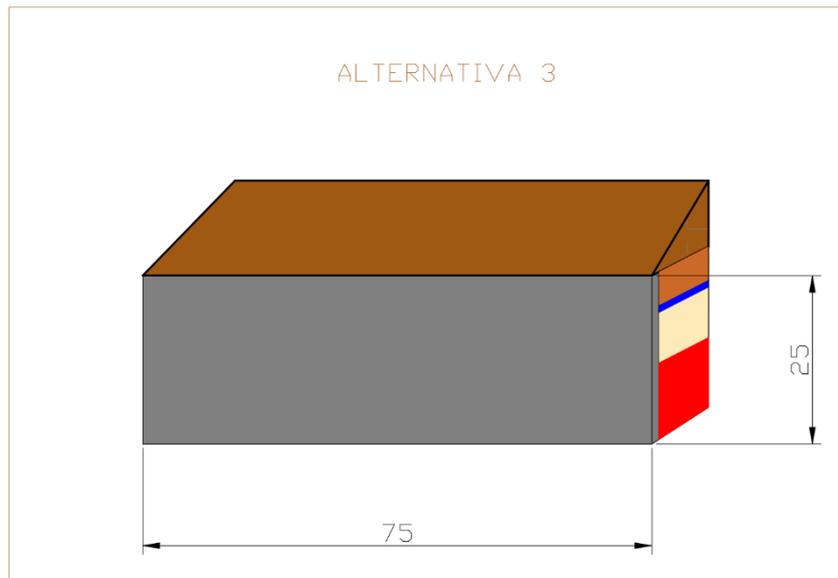


Figura 4-63 Esquema Sección Transversal Corte 3 -3: Alternativa 3 (Elaboración propia, 2020)

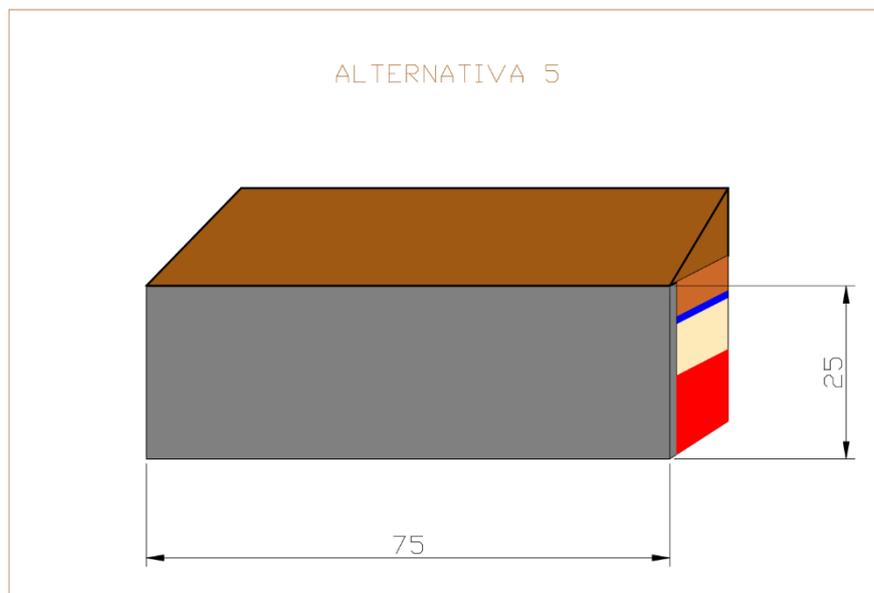


Figura 4-64 Esquema Sección Transversal Corte 3 -3: Alternativa 5 (Elaboración propia, 2020)

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- Se ha realizado el análisis de control de infiltraciones en la fundación de la presa Coltani-Tacna aplicando la técnica de pilotes secantes.
- Los tipos de suelo encontrados en la presa Coltani no contemplan las características óptimas para la realización de este tipo de proyectos. La zona del proyecto presenta estratos, cuya permeabilidad hidráulica (K) cuenta con niveles bajos y medio (entre 10^{-2} y 10^{-5} cm/s), el cual permite la facilidad del flujo de agua a través de este.
- Modelar la presa Coltani, en base a su geometría y características geotécnicas, permite obtener los caudales de infiltración y el comportamiento del flujo del agua subterránea en las diferentes variantes tanto en condición inicial como en condición muro impermeable.
- La propuesta de control de infiltraciones analizada será efectiva en todo momento de actividad de la presa Coltani. Esto es debido a que todos los análisis de infiltración se realizaron al modelar la presa a su máxima capacidad de embalse.
- Las dimensiones del pilote tanto en diámetro, profundidad y ubicación tienen un impacto directo en el comportamiento de manejo de infiltraciones brindando distintas alternativas que se comportan de manera individual. Se determinó que a mayor profundidad y diámetro de pilotes se obtiene un mayor control de infiltraciones mientras que en la ubicación esto se cumple a mayor medida al centro de la presa, seguido por su ubicación al final de la presa.
- La implementación de un muro pantalla impermeable conformado por Pilotes Secantes resulta efectiva en el control de infiltraciones de agua bajo la Presa Coltani. Se observó una disminución del valor de caudal de infiltración de talud aguas arriba en comparación al talud aguas abajo permitiendo que este sea inferior al Caudal Máximo de Infiltración.
- Toda alternativa propuesta para el control de infiltraciones debe realizarse en base al Caudal Máximo de Infiltración Permisible. Esto es debido a que una presa de tierra permite únicamente el flujo de agua, a través de sus estratos, una cantidad menor al 2% de su caudal de diseño. En este caso, el Q_{fmp} de la presa Coltani tiene un valor de $0.00315 \text{ m}^3/\text{s}$.

- En términos de constructabilidad, la mejor viabilidad en la implementación del muro pantalla impermeable corresponde en los extremos de la presa Coltani, tanto aguas abajo como aguas arriba. Esto es debido a que el muro pantalla puede ser construido al mismo tiempo que la presa de tierra en sí, evitando mayores tiempos de ejecución.
- En términos financieros, la mejor viabilidad en la implementación del muro impermeable corresponde en los extremos de la presa Coltani, tanto aguas abajo como aguas arriba, debido a la menor dimensión en relación al centro de la presa.
- Se analizaron 5 alternativas: (1) ubicado aguas arriba con diámetro 1.3 metros y longitud de 25 metros, (2) ubicado al centro de la presa con diámetro 1.3 metros y longitud de 25 metros, (3) ubicado aguas abajo con diámetro 1.3 metros y longitud de 25 metros, (4) ubicado al centro de la presa con diámetro 1.5 metros y longitud de 25 metros y (5) ubicado aguas abajo con diámetro 1.5 metros y longitud de 25 metros. Se concluye que la Alternativa 5 es la mejor opción para el manejo de infiltraciones en la presa Coltani. Esto es debido a que, además de cumplir con el Caudal Máximo de Infiltración Permisible, esta tiene mayor viabilidad en términos financiero y de constructabilidad por lo mencionado anteriormente.

5.2 Recomendaciones

- Realizar el análisis de infiltración en 3D debido al efecto valle. Un análisis tridimensional permite tener una perspectiva global, de fácil visualización e interpretación del proyecto a analizar.
- Para análisis más realistas de infiltración considerar en el estudio de suelos en la zona de la fundación del proyecto presa Coltani mediciones de infiltración que incluyan las paredes de los estribos, así como la evaluación de la hidrogeología del vaso.
- Realizar el análisis dinámico de los Pilotes Secantes. Esto con el objetivo de evaluar los esfuerzos estáticos que puedan existir en la presa Coltani ante un movimiento sísmico y así proporcionar una base de diseño más confiable.

6 REFERENCIAS

- Aghda, S. M. F., GanjaliPour, K., & Esmailzadeh, M. (2019). The Effect of Geological Factors on the Grout Curtain Performance Analysis of Darian Dam Using the Results of Instrumentation Data in the First Impounding. *Journal of the Geological Society of India*, 93(3), 360–368. <https://doi.org/10.1007/s12594-019-1185-x>
- Aguirre, L., Álvarez, A. (2014), Una presa de enrocado con cara de concreto según condiciones reales de obra (Tesis). Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Almeida Souza, L., & Marques Filho, J. (2020). Application of Probabilistic Method to Evaluate the Rock Mass Foundation Influence over the Probability of Failure by Sliding of Hydraulics Structures: Case Study of Baixo Iguaçu HPP Spillway. *Geotechnical and Geological Engineering*, 38(1), 47-60.
- Amaral, S., Caldeira, L., Viseu, T., & Ferreira, R. (2020). Designing Experiments to Study Dam Breach Hydraulic Phenomena. *Journal of Hydraulic Engineering*, 146(4).
- Ben Tahar, M., Bahi, L., & Ouadif, L. (2020). Dam foundation treatment: High stress watertightness. *E3S Web of Conferences*, 150.
- Bereta, G., Hui, P., Kai, H., Guang, L., Kefan, P., & Zhao, Y. (2020). Experimental study of cohesive embankment dam breach formation due to overtopping. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, 64(1), 198-211.
- Borzunov, V. V., Denisov, G. V., Kadushkina, E. A., Nikolaeva, E. A., & Fedorov, A. V. (2019). Experience of Designing and Constructing the Lower Bureya Earth-Fill Dam with an Impervious Diaphragm Made from Secant Bored Piles. *Power Technology and Engineering*, 53(4), 420–428. <https://doi.org/10.1007/s10749-019-01094-w>
- R. Marsal & D. Reséndiz. Presas de Tierra y Enrocamiento. (Limusa, 1975)
- Calamak, M., Yilmaz, A. N., & Yanmaz, A. M. (2018). Performance Evaluation of Internal Drains of Earthen Dams. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 32(6). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CF.1943-5509.0001232](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001232)
- Cañizo, L.; Eraso, A.; Aguado, J. (1976). La bentonita-cemento y sus aplicaciones. *Revista de Obras Públicas*, 123(3130):67-76.

- Cashman, P.M.; Preene, M. (2012). *Groundwater Lowering in Construction: A Practical Guide to Dewatering*, 2nd edition. CRC Press, Boca Raton, 645 pp
- CEUPE (2020) ¿Qué son las presas? Recuperado en: <https://www.ceupe.com/blog/que-son-las-presas.html> (2 de junio del 2020)
- Commission, I., Large, O. N., Internationale, C., & Grands, D. E. S. (2018). *CUTOFFS FOR DAM*. Recuperado en: <https://www.taylorfrancis.com/books/9781351035989> (04 de Octubre del 2020)
- Consortio Coltani (2013) Estudio de Factibilidad: “Construcción de un sistema de almacenamiento y regulación en el sector de la Quebrada Coltani para mejoramiento de áreas agrícolas – distrito de Ilabaya – Jorge Basadre – Tacna”
- CONSTRUMATICA (s/f). Guia EHE – El Hormigon. Recuperado en: https://www.construmatica.com/construpedia/Gu%C3%ADa_EHE_-_El_Hormig%C3%B3n (17 de setiembre del 2020)
- Das, B. M. (s/f). *Shallow Foundations Bearing Capacity and Settlement Third Edition*. Recuperado en: <https://www.taylorfrancis.com/books/9781315163871> (25 de setiembre del 2020)
- Diario Correo (2015) Culminación de represa Coltani demandará S/.45 millones de presupuesto. Recuperado en: <https://diariocorreo.pe/edicion/tacna/culminacion-de-represa-coltani-demandara-s-45-millones-de-presupuesto-649462/> (01 de abril del 2020)
- Diario Correo (2015) Detectan serias falencias en construcción de la presa Coltani. Recuperado en: <https://diariocorreo.pe/edicion/tacna/detectan-serias-falencias-en-construccion-de-la-represa-coltani-586907/> (01 de abril del 2020)
- de Freitas, M. C., Tsuha, C. de H. C., & Vilar, O. M. (2017). Briefing: Compacted soil columns for collapsible lateritic soil improvement. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Ground Improvement*, 170(4), 186–192. <https://doi.org/10.1680/jgrim.16.00019>

EN ISO 22476-3: Geotechnical investigation and testing - Field testing. Part 3: Standard penetration test, 2005.

Explomin (s/f) Perforación Diamantina. Recuperado en: <https://www.explomin.com/servicio/perforacion-diamantina-2/> (2 de junio del 2020)

FAO (s/f). Permeabilidad del suelo. Recuperado en: http://www.fao.org/tempref/FL/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6706s/x6706s09.htm (16 de setiembre del 2020)

Geofortis (s/f) Proceso Constructivo Muro Pilotes Secantes. Recuperado en: <http://www.geofortis.co.cr/descargas/Procedimiento%20constructivo%20pantalla%20de%20pilotes%20secantes.pdf> (2 de junio del 2020)

Geologia y Geotecnia (2010). Filtraciones. Recuperado de: <https://www.fceia.unr.edu.ar/geologiaygeotecnia/Filtraciones%202010%20octubre%201.pdf> (16 de octubre del 2020)

Geoseismic (2017) ¿Qué son las calicatas? Recuperado en: <http://www.geoseismic.cl/calicatas/> (2 de junio del 2020)

Giacconi, L., Flores, R., Giacconi, M. (2012), Tratamiento geotécnico de la fundación de la presa del Ramal H, Tandil mediante inyecciones cementíceas. Argentina

Implenia (s/f). Diaphragm walls, cut-off walls and slurry walls. Recuperado en: https://victoryepes.blogs.upv.es/files/2019/12/Diaphragm_walls_Cut-off_walls_and_slurry_walls.pdf (5 de setiembre del 2020)

Instituto Geológico Y Minero De España (1987). Manual de ingeniería de taludes. Serie: Guías y Manuales nº 3, Ministerio de Educación y Ciencia, Madrid, 456 pp.

Keller (2020) Deep soil mixing (DSM). Recuperado en: <https://www.keller.com.es/experiencia/tecnicas/deep-soil-mixing-dsm> (2 de junio del 2020)

- Keller (2020). Pilotes perforados y muros pilotes (pilotes “in situ”). Recuperado en: <https://www.keller.com.es/sites/keller-es/files/2019-04/e-catalogo-pilotes-perforados-muros-pantalla-pilotes-in-situ-keller.pdf> (13 de agosto del 2020)
- Keller. (s/f). *Pilotes*. Recuperado en: <https://www.keller.com.es/experiencia/tecnicas> (18 de agosto del 2020)
- Khaleghnejad Tabari, M., TaghaviGhalesari, A., Janalizadeh Choobbasti, A., & Afzalirad, M. (2019). Large-Scale Experimental Investigation of Strength Properties of Composite Clay. *Geotechnical and Geological Engineering*, 37(6), 5061–5075. <https://doi.org/10.1007/s10706-019-00962-6>
- Kudrin, K. P., Korolev, V. M., Argal, E. S., & Solov’eva, E. V. (2020). Technology of Constructing an Impervious Diaphragm in the Lower Bureya Earth-Fill Dam. *Power Technology and Engineering*, 54(2), 134–142. <https://doi.org/10.1007/s10749-020-01180-4>
- La Guia (2012). Mecánica del suelo – Flujo Bidimensional. Recuperado en: <https://fisica.laguia2000.com/dinamica-clasica/fuerzas/mecanica-del-suelo-flujo-bidimensional> (11 de octubre del 2020)
- Lambe, T.W., Whitman, R.V. (1996), *Mecánica de Suelos*. Editorial Limusa.
- Martí, J.V.; González, F.; Yepes, V. (2004). *Temas de procedimientos de construcción. Mejora de terrenos*. Editorial de la Universidad Politécnica de Valencia. Ref. 2004.844.
- Más que ingeniería (2016) Principales tipos de presas y su clasificación. Recuperado en: <https://masqueingenieria.com/blog/tipos-de-presas-y-su-clasificacion/> (2 de junio del 2020)
- Mirlisenna, G. (2016). Método de Elementos Finitos: ¿Qué es? Recuperado en: <https://www.esss.co/es/blog/metodo-de-los-elementos-finitos-que-es/> (17 de Agosto del 2020)

- Municipalidad Distrital de Ilabaya (s/f) Modulo I: Diagnostico de la situación actual. Recuperado en: http://ofi5.mef.gob.pe/appFs/Download.aspx?f=3182_OPIMDILABAYA_2012516_2038.pdf (05 de abril del 2020)
- Pantallax (2020) Pantalla de pilotes. Recuperado en: https://www.muropantalla.com/servicios_pantalla_pilotes.php (2 de junio del 2020)
- PLAXIS. (2009). Mohr-Coulomb parameters for modelling of concrete structures. Recuperado en: <https://communities.bentley.com/products/geotech-analysis/w/plaxis-soilvision-wiki/46078/mohr-coulomb-parameters-for-modelling-of-concrete-structures> (18 de setiembre del 2020)
- Powers, J.P.; Corwin, A.B.; Schmall, P.C.; kaeck, W.E. (2007). Construction dewatering and groundwater control: New methods and applications. Third Edition, John Wiley & Sons.
- Preene, M.; Roberts, T.O.L.; Powrie, W. (2016). Groundwater Control – Design and Practice, 2nd Edition. Construction Industry Research and Information Association, CIRIA Report C750, London.
- Ramos, A. (2017). Análisis de estabilidad de taludes en rocas. Simulación con LS-DYNA y comparación con slide. Recuperado en: http://oa.upm.es/47326/1/TFM_ABEL_ANTONIO_RAMOS_VASQUEZ.pdf (23 de octubre del 2020)
- Redrilsa (2019) Ensayos de permeabilidad Lefranc/Lugeon. Recuperado en: <http://www.redrilsa.com.pe/en/servicios/servicios-2/> (2 de junio del 2020)
- Rica, C. (s/f). PROCESO CONSTRUCTIVO MURO DE PILOTES SECANTES, (506). Recuperado en: <http://www.geofortis.co.cr/descargas/Procedimiento%20constructivo%20pantalla%20de%20pilotes%20secantes.pdf> (01 de octubre del 2020)
- Roy E. Hunt: Geotechnical Engineering Investigation Handbook, Second Edition (CRC Press, 2005).

- Sadeghi, S., Hakimzadeh, H., & Babaeian Amini, A. (2020). Experimental Investigation into Outflow Hydrographs of Nonhomogeneous Earth Dam Breaching due to Overtopping. *Journal of Hydraulic Engineering*, 146(1).
- Sainov, M. (2020). Theoretical Basis for Designing Seepage-Control Walls in Dam Foundations. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 753.
- Sissakian, V., Adamo, N., & Al-Ansari, N. (2020). The Role of Geological Investigations for Dam Siting: Mosul Dam a Case Study. *Geotechnical and Geological Engineering*, 38(2), 2085-2096.
- Texdelta (2020) Geotextil Bentonita. Recuperado en: <https://texdelta.com/geotextil-bentonita/> (2 de junio del 2020)
- Tomlinson, M.J. (1982). Diseño y construcción de cimientos. URMO, S.A. de Ediciones, Bilbao, 825 pp.
- Tomlinson.M.J., (s/f). PILE DESIGN and CONSTRUCTION PRACTICE. Recuperado en: https://www.academia.edu/18492234/Pile_Design_and_Construction_Practice_M_J_Tomlinson (08 de octubre del 2020)
- Trevigalante (s/f) Pilotes Secantes y Tangentes. Recuperado en: https://www.trevigalante.com/tecnolog%C3%ADas/secantes_tangentes (2 de junio del 2020)
- Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (2020) Embalses. Recuperado en: https://aulavirtual.upc.edu.pe/bbcswebdav/pid-21002818-dt-content-rid-185288037_1/courses/CI652-2001-CI92/UNIDAD%20IIe-ING%20RECURSO%20HIDRAUL-2020-1.pdf (5 de mayo del 2020)
- Valero, E. F. (2004.). EL METODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS (MEF ó FEM). Recuperado en: <https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6294/06Efv06de23.pdf> (29 de Octubre del 2020)
- Woolery, E. W. (2018). SH-Mode Seismic-Reflection Imaging of Earthfill Dams. *Engineering*, 4(5), 694–701. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2018.08.009>

- Yepes, V. (2016). Procedimientos de construcción de cimentaciones y estructuras de contención. Colección Manual de Referencia. Editorial Universitat Politècnica de València, 202 pp. Ref. 328. ISBN: 978-84-9048-457-9.
- Zhong, D., Li, X., Cui, B., Wu, B., & Liu, Y. (2018). Technology and application of real-time compaction quality monitoring for earth-rockfill dam construction in deep narrow valley. *Automation in Construction*, 90, 23–38. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.02.024>
- Zhong, Q., Chen, S., Fu, Z., & Shan, Y. (2020). New Empirical Model for Breaching of Earth-Rock Dams. *Natural Hazards Review*, 21(2). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)NH.1527-6996.0000374](https://doi.org/10.1061/(ASCE)NH.1527-6996.0000374)

7 ANEXOS

- Expediente Técnico Presa Coltani

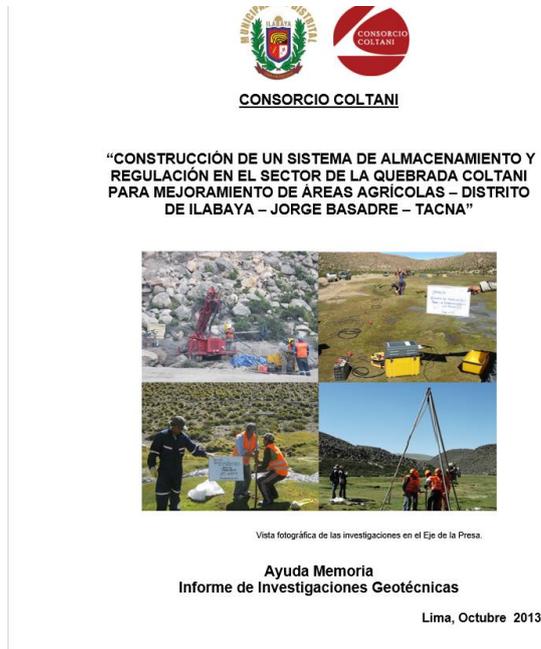


Figura 7-1 Informe de Investigaciones Geotécnicas (Expediente Técnico Presa Coltani, 2013)

	Expediente Técnico del Proyecto: "Construcción de un sistema de almacenamiento y regulación en el sector de la quebrada <u>Coltani</u> para mejoramiento de áreas agrícolas - Distrito de <u>Ilabaya</u> - Jorge Basadre - Tacna"	
EXPEDIENTE TECNICO		
"CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO Y REGULACIÓN EN EL SECTOR DE LA QUEBRADA COLTANI PARA MEJORAMIENTO DE ÁREAS AGRÍCOLAS - ILABAYA"		
GEOLOGIA Y GEOTECNIA		
ÍNDICE		
1. INTRODUCCIÓN		4
1.1. Antecedentes		4
2. MARCO GEOLÓGICO REGIONAL		6
2.1. Geomorfología		6
2.2. Estratigrafía		9
2.3. Geología Estructural.....		14
3. MARCO GEOLÓGICO ZONA DE EMBALSE Y EJE DE PRESA.....		16
3.1. Geomorfología		16
3.1.1 Agentes y Factores de Modelamiento Geomorfológico		16
3.1.2 Unidades Geomorfológicas.....		18
3.2. Estratigrafía		20
3.3. Geología Estructural.....		21
3.4. Hidrogeología.....		21
3.5. Geología del Subsuelo		22
3.5.1 Perfiles Estratigráficos de las Perforaciones Diamantinas Eje de Presa		22
3.5.2 Pruebas de Permeabilidad.....		24
3.6. Geodinámica Externa.....		27
3.5.1 Peligros Geológico - Climáticos.....		27
3.5.2 Estabilidad de las Márgenes		27
4. MARCO GEOLÓGICO ESTRUCTURAS DE CAPTACION.....		29
4.1. Geomorfología		29
4.2. Estratigrafía		29
4.3. Geología Estructural.....		32
4.4. Geología del Subsuelo		32
4.5. Hidrogeología.....		32
4.6. Geodinámica Externa.....		32

Figura 7-2 Expediente Técnico Geología y Geotecnia (Expediente Técnico Presa Coltani, 2013)