

**UNIVERSIDAD PRIVADA DE TACNA**  
**ESCUELA DE POSTGRADO**  
**MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL CON MENCIÓN EN GEOTECNIA**



**DISEÑO DE UNA PANTALLA DE IMPERMEABILIZACIÓN A PARTIR DEL  
ANÁLISIS DE FILTRACIONES EN EL SUELO DE CIMENTACIÓN EN LA  
REPRESA ANCCASCCOCHA, APURÍMAC - 2025**

**TESIS**

**Presentada por:**

**Bach. Jorge Hilario Quilla**

**ORCID: 0009-0005-6787-2756**

**Asesor:**

**Dr. Samuel Huaquisto Cáceres**

**ORCID: 0000-0002-9294-6359**

**Para obtener el grado académico de:**

**MAESTRO EN INGENIERÍA CIVIL CON MENCIÓN EN GEOTECNIA**

**TACNA – PERÚ**

**2026**

UNIVERSIDAD PRIVADA DE TACNA  
ESCUELA DE POSTGRADO  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL CON MENCIÓN EN GEOTECNIA

Tesis

“DISEÑO DE UNA PANTALLA DE IMPERMEABILIZACIÓN A PARTIR DEL  
ANÁLISIS DE FILTRACIONES EN EL SUELO DE CIMENTACIÓN EN LA  
REPRESA ANCCASCCOCHA, APURÍMAC 2025”

Presentada por:

Bach. Jorge Hilario Quilla

Tesis sustentada y aprobada el 23 de abril de 2026; ante el siguiente jurado examinador:

PRESIDENTE : Dr. Anibal Juan Espinoza Aranciaga

SECRETARIO : Dr. Pedro Valerio Maquera Cruz

VOCAL : Dr. Dennys Geovanni Calderón Paniagua

ASESOR : Dr. Samuel Huaquisto Cáceres

## **DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD**

Yo Jorge Hilario Quilla, en calidad de: maestrando de la Maestría en Ingeniería Civil con mención en Geotecnia de la Escuela de Postgrado de la Universidad Privada de Tacna, identificado (a) con DNI 42847358

Soy autor (a) de la tesis titulada:

### **DISEÑO DE UNA PANTALLA DE IMPERMEABILIZACIÓN A PARTIR DEL ANÁLISIS DE FILTRACIONES EN EL SUELO DE CIMENTACIÓN EN LA REPRESA ANCCASCCOCHA, APURÍMAC - 2025**

Con asesor: Dr. Samuel Huaquisto Cáceres

#### **DECLARO BAJO JURAMENTO**

Ser el único autor del texto entregado para obtener el grado académico de Maestro en Ingeniería Civil con mención en Geotecnia, y que tal texto no ha sido entregado ni total ni parcialmente para obtención de un grado académico en ninguna otra universidad o instituto, ni ha sido publicado anteriormente para cualquier otro fin.

Así mismo, declaro no haber trasgredido ninguna norma universitaria con respecto al plagio ni a las leyes establecidas que protegen la propiedad intelectual.

Declaro, que después de la revisión de la tesis con el software Turnitin se declara 01% de similitud, además que el archivo entregado en formato PDF corresponde exactamente al texto digital que presento junto al mismo.

Por último, declaro que para la recopilación de datos se ha solicitado la autorización respectiva a la empresa u organización, evidenciándose que la información presentada es real y soy conocedor (a) de las sanciones penales en caso de infringir las leyes del plagio y de falsa declaración, y que firmo la presente con pleno uso de mis facultades y asumiendo todas las responsabilidades de ella derivada.

Por lo expuesto, mediante la presente asumo frente a LA UNIVERSIDAD cualquier responsabilidad que pudiera derivarse por la autoría, originalidad y veracidad del

contenido de la tesis, así como por los derechos sobre la obra o invención presentada. En consecuencia, me hago responsable frente a LA UNIVERSIDAD y a terceros, de cualquier daño que pudiera ocasionar, por el incumplimiento de lo declarado o que pudiera encontrar como causa del trabajo presentado, asumiendo todas las cargas pecuniarias que pudieran derivarse de ello en favor de terceros con motivo de acciones, reclamaciones o conflictos derivados del incumplimiento de lo declarado o las que encontrasen causa en el contenido de la tesis, libro o invento.

De identificarse fraude, piratería, plagio, falsificación o que el trabajo de investigación haya sido publicado anteriormente; asumo las consecuencias y sanciones que de mi acción se deriven, sometiéndome a la normatividad vigente de la Universidad Privada de Tacna.

Lugar y fecha: Tacna, 23 de abril de 2026

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Jorge Hilario Quilla', with a stylized, cursive script.

Nombres y apellidos: Jorge Hilario Quilla

DNI: 42847358

## **DEDICATORIA**

A mi padre, alégrate por mí, ya sea que estes en el cielo o el infierno.

A mi madre amada, sea que espere mucho o poco de mí.

A mis hijos amados, sea que lleguen lejos o cerca.

Al amor de mi vida Yesenia Quispe Quispe, sea mutuo o no.

A las mujeres de mi vida, sea que me hayan querido o no.

## **AGRADECIMIENTO**

Quiero expresar mi agradecimiento a la Universidad Privada de Tacna, ciudad heroica del sur de mi amado Perú, por brindarme la oportunidad de continuar y fortalecer mi crecimiento académico y profesional en la ingeniería de presas.

A la empresa DICONST JAROME S.C.R.L., encargada de la construcción de la represa Ancascococha, por facilitar el acceso a la información y los datos técnicos que hicieron posible el desarrollo de esta investigación.

Finalmente, a mis compañeros de obra, casi hermanos, que participaron y participan en la construcción de la represa Ancascococha, gracias por sus aportes, apoyo y compañerismo a lo largo de este proceso. De manera especial agradecer al Ing. Edsel Patiño Valdivia, Ing. Luis Muñoz Barriga, Licenciado Richard Pallani Kana y al Ing. Igor Rojas Dominguez, por su acompañamiento y por enseñarme a afrontar los desafíos de trabajar en entornos de altísima complejidad social, experiencia que marca y marcó profundamente mi desarrollo profesional y personal.

## Índice de contenido

<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>CAPITULO I: EL PROBLEMA</b> .....	2
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	2
1.2. FORMULACION DEL PROBLEMA.....	3
1.2.1. Problema principal .....	3
1.2.2. Problemas secundarios.....	3
1.3. JUSTIFICACION DEL PROBLEMA.....	4
1.4. OBJETIVOS .....	5
1.4.1. Objetivo general.....	5
1.4.2. Objetivos específicos .....	5
<b>CAPITULO II: MARCO REFERENCIAL</b> .....	6
2.1. ANTECEDENTES DEL PROBLEMA .....	6
2.2. NORMATIVA VIGENTE .....	9
2.2.1. NORMA INTERNACIONAL APLICABLE .....	9
2.2.1.1. Diseño de presas .....	9
2.2.1.2. Análisis y control de filtraciones en presas.....	9
2.2.1.3. Ingeniería y diseño de inyecciones - 2017 .....	10
2.2.1.4. ASTM D4630-19-2019 .....	10
2.2.1.5. Investigaciones geotécnicas - 2001.....	11
2.2.2. NORMA NACIONAL APLICABLE.....	12
2.2.2.1. Manual criterios de diseños de obras hidráulicas para la formulación de proyectos hidráulicos multisectoriales y de afianzamiento hídrico - 2010 .....	12
2.2.2.2. Normas y Reglamento de seguridad de presas en el Perú .....	12
2.2.2.3. Norma E050 Suelos y Cimentaciones .....	13
2.3. DEFINICIÓN DE CONCEPTOS BÁSICOS .....	13
2.3.1. Variable independiente. ....	13
2.3.1.1. Ley de Darcy.....	13
2.3.1.2. Análisis del flujo bajo presas (ecuación de Laplace).....	15
2.3.1.3. Permeabilidad en macizos rocosos ( <b>ke</b> ).....	16
2.3.1.4. Ensayo Lugeon y determinación de la permeabilidad equivalente del macizo rocoso .....	17
2.3.1.5. Gradiente hidráulico. ....	20
2.3.1.6. Erosión interna o tubificación.....	20
2.3.1.7. Dimensiones e indicadores de la variable independiente .....	22
2.3.2. Variable dependiente. ....	22
2.3.2.1. Pantalla de impermeabilización .....	22
2.3.2.2. Dimensiones e indicadores de la variable dependiente .....	23
<b>CAPITULO III: METODOLOGIA Y DISEÑO DEL PROYECTO</b> .....	24

3.1.	DESCRIPCION DE LA INVESTIGACION APLICADA .....	24
3.1.1.	Tipo de investigación.....	24
3.1.2.	Nivel de investigación. ....	24
3.1.3.	Justificación del enfoque aplicado.....	24
3.2.	DISEÑO DEL PROYECTO .....	25
3.2.1.	Etapas del proyecto .....	25
3.2.1.1.	Ubicación de la represa Ancascococha .....	26
3.2.1.2.	Características geométricas del cuerpo represa Ancascococha .....	27
3.2.1.3.	Diseño de la campaña geotécnica .....	29
3.2.1.3.1	Criterios generales de diseño.....	29
3.2.1.3.2	Criterios geológicos.....	31
3.2.1.3.3	Definición del número, ubicación e inclinación de sondeos .....	32
3.2.1.4.	Estudios geotécnicos de campo o perforación diamantina .....	34
3.2.1.5.	Ensayos de permeabilidad de campo .....	35
3.2.1.6.	Ensayos de laboratorio de la matriz rocosa.....	37
3.2.2.	Herramientas y/o softwares utilizados .....	38
3.3.	EVALUACION TECNICA Y FACTIBILIDAD .....	39
3.3.1.	Caracterización geotécnica del macizo rocoso .....	39
3.3.1.1.	Perforaciones diamantinas .....	39
3.3.1.1.1	Sondaje de perforación PPA-01 .....	39
3.3.1.1.2	Sondaje de perforación PPA-02 .....	39
3.3.1.1.3	Sondaje de perforación PPA-03 .....	39
3.3.1.1.4	Sondaje de perforación PPA-04 .....	40
3.3.1.1.5	Clasificación del macizo rocoso - RMR.....	40
3.3.1.2.	Condición de permeabilidad y coeficiente de permeabilidad equivalente eje de presa .....	41
3.3.2.	Resultados de laboratorio de la matriz rocosa .....	44
3.4.	MODELADO HIDRAULICO .....	45
3.4.1.	Modelamiento numérico de filtraciones - Slide.....	45
3.4.2.	Criterios de diseño de la pantalla.....	50
3.4.2.1.	Criterios geotécnicos.....	50
3.4.2.2.	Criterios hidráulicos.....	50
3.4.3.	Análisis de sensibilidad y/o escenarios.....	51
3.4.4.	Simulación de impacto ambiental.....	53
3.5.	PLANIFICACIÓN Y EJECUCIÓN .....	54
3.5.1.	Cronograma de actividades.....	54
3.5.2.	Asignación de recursos .....	55
3.5.3.	Costos y financiamiento.....	55
<b>CAPITULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>		<b>57</b>
4.1.	DESARROLLO DEL PROYECTO Y VALIDACION DEL DISEÑO .....	57
4.1.1.	Procedimiento conceptual.....	57

4.1.2.	Escenarios de análisis .....	58
4.1.2.1.	Escenario sin pantalla .....	59
4.1.2.2.	Escenarios con pantalla, caudales de filtración revisión de la eficiencia de almacenamiento .....	62
4.1.3.	Gradientes hidráulicos y revisión de estabilidad de presa (piping) .....	65
4.1.4.	Altura óptima y distribución longitudinal de pantalla de impermeabilización.....	67
4.2.	ANALISIS DE IMPACTO, BENEFICIOS Y COMPARACION CON CASOS SIMILARES.....	69
4.2.1.	Impacto técnico de la solución propuesta .....	69
4.2.2.	Beneficios técnicos y operacionales .....	70
4.2.3.	Comparación con casos similares .....	70
4.3.	LIMITACIONES DEL ESTUDIO Y MEJORAS IDENTIFICADAS.....	71
4.3.1.	Limitaciones del estudio .....	71
4.3.2.	Mejoras identificadas .....	72
4.4.	DESCRIPCION DE LA SOLUCION PROPUESTA Y SU IMPLEMENTACION.....	72
4.4.1.	Consideraciones constructivas de la pantalla impermeabilización.....	75
4.4.1.1.	Estimación preliminar del consumo de cemento en etapa de proyecto .....	75
4.4.1.2.	Preparación y condiciones del macizo rocoso .....	77
4.4.1.3.	Secuencia constructiva adoptada .....	78
4.4.1.4.	Perforaciones de inyección .....	79
4.4.1.5.	Procedimiento y control de inyección .....	79
4.4.1.6.	Control de calidad y verificación.....	80
4.4.2.	Medidas complementarias y de control operacional.....	80
4.5.	EVALUACION DE COSTOS, SOSTENIBILIDAD Y VIABILIDAD A LARGO PLAZO. ....	81
4.5.1.	Evaluación de costos de la solución propuesta .....	81
4.5.2.	Evaluación de la sostenibilidad técnica y ambiental.....	81
4.5.3.	Viabilidad técnica y económica a largo plazo .....	82
<b>CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>		<b>83</b>
5.1.	CONCLUSIONES .....	83
5.2.	RECOMENDACIONES .....	84
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS .....</b>		<b>86</b>

## Índice de tablas

<b>Tabla 1</b> Presas del Perú algunas problemáticas y lecciones aprendidas asociadas al control de filtraciones.....	7
<b>Tabla 2</b> Gradiente hidráulico admisible en función del RMR.....	21
<b>Tabla 3</b> Volúmenes del embalse Ancascococha .....	29
<b>Tabla 4</b> Coordenadas de pozos diamantinos, longitud e inclinación para campaña geotécnica.....	33
<b>Tabla 5</b> Estados de presión propuestos.....	35
<b>Tabla 6</b> Condición del terreno según el valor de la unidad Lugeon. ....	41
<b>Tabla 7</b> Ensayos Lugeon y coeficiente de permeabilidad equivalente.....	42
<b>Tabla 8</b> Resultados de ensayos de laboratorio.....	44
<b>Tabla 9</b> Parámetros hidráulicos y geométricos adoptados para el modelamiento. ....	49
<b>Tabla 10</b> Cronograma de actividades de ejecución de la investigación. ....	54
<b>Tabla 11</b> Costos a precios reales de la ejecución de la investigación.....	56
<b>Tabla 12</b> Porcentaje de infiltración y eficiencia de almacenamiento (Sin pantalla). ....	61
<b>Tabla 13</b> Porcentaje de infiltración y eficiencia de almacenamiento (con pantalla 1.1H <sub>e</sub> ). ....	63
<b>Tabla 14</b> Porcentaje de infiltración y eficiencia de almacenamiento resumen de escenarios.....	64
<b>Tabla 15</b> Verificación de factor de seguridad ante seguridad hidráulica.....	67
<b>Tabla 16</b> Consumo promedio de cemento por metro lineal de perforación en antecedentes nacionales.....	76
<b>Tabla 17</b> Sistema de clasificación del consumo de lechada propuesto por Deere.....	76

## Índice de figuras

<b>Figura 1</b> Experiencia de Darcy .....	14
<b>Figura 2</b> Flujo a través de un suelo permeable saturado bajo una presa .....	15
<b>Figura 3</b> Esquema del ensayo Lugeon con 1 y 2 obturadores .....	18
<b>Figura 4</b> Flujo radial en un medio homogéneo e isotrópico .....	19
<b>Figura 5</b> Metodología para el diseño y verificación de una pantalla de impermeabilización. ....	25
<b>Figura 6</b> Localización de la laguna Ancascocha (WGS 84 – UTM Zona 18S. ....	26
<b>Figura 7</b> Sección transversal crítica para el análisis de filtraciones. ....	28
<b>Figura 8</b> Ortofoto del eje de presa. ....	31
<b>Figura 9</b> Fotografía panorámica de la zona de represa. ....	32
<b>Figura 10</b> Ubicación de pozos diamantinos propuestos. ....	33
<b>Figura 11</b> Inicio de perforación PPA-03. ....	34
<b>Figura 12</b> Ejecución de ensayos Lugeon. ....	36
<b>Figura 13</b> Toma de muestras de la matriz rocosa. ....	37
<b>Figura 14</b> Sección geotécnica con propiedades hidráulicas del macizo. ....	43
<b>Figura 15</b> Modelamiento hidráulico del flujo bajo la presa en SLIDE. ....	46
<b>Figura 16</b> Perfil de permeabilidades eje de cerrada. ....	49
<b>Figura 17</b> Metodología para la determinación de la altura óptima de la pantalla de impermeabilización. ....	52
<b>Figura 18</b> Verificación de la eficiencia de almacenamiento considerando pérdidas por filtración. ....	57
<b>Figura 19</b> Verificación de la estabilidad hidráulica en función del gradiente hidráulico. ....	58
<b>Figura 20</b> Definición de modelo - escenario sin y con pantalla. ....	59
<b>Figura 21</b> Discretización de sección de presa, situación sin cortina impermeable para determinar red de flujo interno y caudal de infiltración. ....	60
<b>Figura 22</b> Resultados escenario con pantalla de impermeabilización, red de flujo interno y caudal de infiltración ( $1.10H_e$ ). ....	62
<b>Figura 23</b> Gradientes hidráulicos en las cercanías de la pantalla impermeabilización ( $1.05H$ ). ....	66
<b>Figura 24</b> Esquema conceptual de la distribución de inyecciones de impermeabilización. ....	74
<b>Figura 25</b> Corte típico en junta de dilatación vertical. ....	80

### Índice de apéndices

<b>APENDICE A Matriz de consistencia .....</b>	<b>88</b>
<b>APENDICE B Registros de perforación diamantina .....</b>	<b>89</b>
<b>APENDICE C Registros de ensayos Lugeon .....</b>	<b>92</b>
<b>APENDICE D Resultados de laboratorio .....</b>	<b>94</b>
<b>APENDICE E Esquema Constructivos .....</b>	<b>98</b>

## RESUMEN

Las filtraciones bajo presas cimentadas en macizos rocosos fracturados pueden comprometer la eficiencia del almacenamiento y la estabilidad hidráulica, generando riesgos de erosión interna o tubificación. En la represa Ancascococha (Apurímac), la ausencia de estudios específicos de permeabilidad y modelamiento hidráulico impedía evaluar el comportamiento del flujo subterráneo y sustentar técnicamente el diseño de una pantalla de impermeabilización. Se ejecutó una campaña geotécnica con cuatro perforaciones diamantinas inclinadas y ensayos de permeabilidad tipo Lugeon, complementados con ensayos de laboratorio. Se estimó la permeabilidad equivalente del macizo rocoso y se modeló el flujo subterráneo, evaluando escenarios sin pantalla y con diferentes profundidades de impermeabilización. Los resultados fueron contrastados con criterios de gradiente hidráulico admisible en función del índice RMR. Los valores de permeabilidad iniciales del orden de  $10^{-4}$  a  $10^{-5}$  cm/s evidenciaron la necesidad de tratamiento. El modelamiento mostró que la incorporación de una pantalla con profundidad aproximada de  $1.10H_e$  reduce las pérdidas por filtración a niveles menores al 5% del volumen útil y mantiene los gradientes hidráulicos dentro de rangos admisibles. El diseño optimizado de la pantalla de impermeabilización garantiza la eficiencia hidráulica del embalse y la estabilidad del sistema presa–cimentación, constituyendo una solución técnica viable y sostenible para la represa Ancascococha.

## PALABRAS CLAVE

Gradiente hidráulico, Filtraciones, permeabilidad, presas y redes de flujo

## **ABSTRACT**

Seepage beneath dams founded on fractured rock masses can compromise storage efficiency and hydraulic stability, generating risks of internal erosion or piping. At the Ancascococha Dam (Apurímac, Peru), the absence of specific permeability studies and hydraulic modeling prevented proper evaluation of subsurface flow behavior and the technical justification for designing a grout curtain. A geotechnical investigation campaign was conducted, including four inclined diamond drill holes and in-situ Lugeon permeability tests, complemented by laboratory testing. The equivalent permeability of the rock mass was estimated, and subsurface flow was modeled by evaluating scenarios without a cutoff curtain and with different depths of impermeabilization. The results were compared against allowable hydraulic gradient criteria based on the Rock Mass Rating (RMR) index. Initial permeability values on the order of  $10^{-4}$  to  $10^{-5}$  cm/s indicated the need for treatment. Numerical modeling showed that incorporating a grout curtain with an approximate depth of  $1.10H_c$  reduces seepage losses to less than 5% of the useful reservoir volume and maintains hydraulic gradients within admissible ranges. The optimized grout curtain design ensures reservoir hydraulic efficiency and stability of the dam–foundation system, constituting a technically viable and sustainable solution for the Ancascococha Dam.

## **KEYWORDS**

Hydraulic gradient, Seepage, Permeability, Dams, Flow nets

## INTRODUCCIÓN

La presente investigación titulada “Diseño de una pantalla de impermeabilización a partir del análisis de filtraciones en el suelo de cimentación en la represa Ancascococha, Apurímac – 2025” tiene como objetivo diseñar una pantalla de impermeabilización a partir del análisis de filtraciones en el suelo de cimentación en la represa Ancascococha, Apurímac 2025 y como pregunta ¿Cómo influye el análisis de filtraciones en el suelo de cimentación en el diseño de una pantalla de impermeabilización eficiente para la represa Ancascococha, Apurímac – 2025?, ello tiene la importancia de asegurar la eficiencia de almacenamiento del embalse y la estabilidad hidráulica de la presa.

La presente investigación se organiza en cinco capítulos estructurados de manera secuencial para el desarrollo integral del estudio. El Capítulo I aborda el planteamiento del problema, incluyendo la descripción de la situación problemática, la formulación de las preguntas de investigación, la justificación y los objetivos. El Capítulo II presenta el marco referencial, donde se desarrollan los antecedentes, la normativa aplicable y los fundamentos teóricos relacionados con el análisis de filtraciones, la permeabilidad en macizos rocosos y el diseño de pantallas de impermeabilización. El Capítulo III describe la metodología y el diseño del proyecto, detallando la campaña geotécnica ejecutada, los ensayos de campo y laboratorio realizados, el procesamiento de datos y el modelamiento hidráulico empleado para evaluar los distintos escenarios de análisis. El Capítulo IV presenta los resultados obtenidos, su análisis e interpretación técnica, la validación del diseño propuesto y la descripción de la solución adoptada, incluyendo consideraciones constructivas y criterios de optimización. Finalmente, el capítulo V se presentan las conclusiones y recomendaciones.

## **CAPITULO I: EL PROBLEMA**

### **1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

En general, las filtraciones bajo presas constituyen un problema crítico en el diseño y operación de estas estructuras, ya que afectan directamente la eficiencia del almacenamiento y la estabilidad hidráulica del sistema presa–cimentación. Cuando los volúmenes de filtración y los gradientes hidráulicos desarrollados en la fundación no son adecuadamente controlados, pueden generarse procesos de erosión interna o tubificación, incrementando el riesgo de falla.

En este contexto, la implementación de una pantalla de impermeabilización se convierte en una medida fundamental para interceptar el flujo subterráneo, reducir los caudales de filtración y limitar los gradientes hidráulicos a valores admisibles, garantizando así la seguridad y funcionalidad de la presa.

Para minimizar los posibles problemas antes mencionados en la represa Ancascococha Challhuahuacho 2025 es imperativo estudiar el fenómeno del flujo bajo la presa, así descartar problemas de socavación interna y excesivas filtraciones que pudieran provocar la falla de la estructura y/o deficiencias en la función de almacenamiento.

En este contexto, la empresa encargada de la construcción represa Ancascococha observó la inexistencia de estudios básicos fundamentales, tales como la perforación diamantina y el modelamiento del flujo subterráneo bajo la presa, en el expediente técnico contractual. En consecuencia, propuso la ejecución de una campaña geotécnica en el eje de la represa Ancascococha, con la finalidad de caracterizar la roca de cimentación mediante la realización de cuatro perforaciones diamantinas y los ensayos geotécnicos correspondientes.

Para finalmente, con los resultados obtenidos, modelar el comportamiento del flujo subterráneo en la cimentación, cuantificar los caudales de filtración y el gradiente hidráulico. Y sustentar técnicamente el dimensionamiento óptimo de la pantalla de impermeabilización que permita garantizar la eficiencia del almacenamiento del embalse y la estabilidad de la represa.

## **1.2. FORMULACION DEL PROBLEMA**

### **1.2.1. Problema principal**

¿Cómo influye el análisis de filtraciones en el suelo de cimentación en el diseño de una pantalla de impermeabilización eficiente para la represa Ancascococha, Apurímac – 2025?

### **1.2.2. Problemas secundarios**

¿Qué características geotécnicas y de permeabilidad presenta la cerrada de la represa Ancascococha, y cómo afectan al comportamiento del flujo bajo la presa?

¿Cómo varía el comportamiento del flujo subterráneo al simular diferentes escenarios de altura de la pantalla de impermeabilización emplazada en la diorita y su interacción con la presa de concreto?

¿Cuál es el valor del gradiente hidráulico en el subsuelo y qué zonas presentan riesgo de erosión interna?

¿Cuáles son los caudales de filtración existentes y cómo afectan al diseño de sistemas de drenaje y al rendimiento del almacenamiento?

¿Cuál es la altura y distribución longitudinal óptima de la pantalla de impermeabilización que permite minimizar los caudales de filtración?

### 1.3. JUSTIFICACION DEL PROBLEMA

Diseñar soluciones técnicas para el control de las filtraciones en presas no es un asunto solo estructural o hidráulico, sino también una acción para proteger y asegurar el acceso al agua para la producción agrícola, consumo, recreación, etc. Para ello es necesario que los proyectos de aprovechamiento hídrico aseguren el aprovisionamiento del líquido elemento en cantidad y oportunidad. Es urgente atacar el problema de déficit del líquido elemento en dos frentes. El primero será aprovechar la totalidad de recurso hídrico en los meses de excedencia (enero, febrero y marzo), para ello es necesario proyectar diques o presas de almacenamiento; en segundo lugar, el cambio tecnológico en la aplicación del riego en los cultivos, lo último para disminuir la demanda aumentando la eficiencia de riego.

La construcción de la represa Ancascococha es una estructura que cubrirá el déficit hídrico presente en las áreas de riego. La misma que está asentada sobre un macizo rocoso de diorita, constituye una solución estratégica para enfrentar la problemática de déficit hídrico en estas zonas altoandinas de Apurímac, particularmente en las comunidades de Choccoyo, Chontahuillque, Tambulla, Parani y Ccasa.

La necesidad de diseño de la represa Ancascococha se fundamenta en el uso racional y sostenible del recurso hídrico, integrando soluciones de ingeniería que garanticen la seguridad estructural, la eficiencia hidráulica y la resiliencia climática de la región. En el distrito de Challhuahuacho, la agricultura depende en gran medida de las lluvias estacionales, lo que genera alta vulnerabilidad frente a sequías recurrentes y periodos de estrés hídrico.

La ausencia de infraestructura de regulación como presas limita el almacenamiento del agua de escorrentía, provocando que grandes volúmenes se pierdan sin ser aprovechados para riego, afectando la seguridad alimentaria y el desarrollo económico de las comunidades.

La represa Ancascocha busca revertir esta situación, almacenando y regulando el recurso hídrico para garantizar un riego eficiente y continuo, con impacto directo en la productividad agrícola y la calidad de vida de los beneficiarios. Es por ello la importancia del presente estudio, a fin de proponer un diseño adecuado y óptimo de la pantalla de impermeabilización.

Finalmente, sin una pantalla de impermeabilización, las pérdidas anuales por infiltración alcanzarían niveles superiores al 5%, lo que obliga a implementar soluciones como pantallas de impermeabilización o cortinas de inyección para mitigar las filtraciones y asegurar la estabilidad de la presa Ancascocha.

## **1.4. OBJETIVOS**

### **1.4.1. Objetivo general**

Diseñar una pantalla de impermeabilización a partir del análisis de filtraciones en el suelo de cimentación en la represa Ancascocha, Apurímac 2025.

### **1.4.2. Objetivos específicos**

- Realizar los estudios geotécnicos de perforación diamantina y ensayos de permeabilidad de la cerrada de la represa Ancascocha para realizar una buena simulación de análisis de flujo bajo la presa.
- Determinar el comportamiento del flujo subterráneo mediante la simulación de diferentes escenarios de altura de la pantalla de impermeabilización emplazada en la diorita y su interacción con la presa de concreto.
- Calcular el gradiente hidráulico, para identificar zonas críticas con riesgo de erosión interna.
- Determinar caudales de filtración, para dimensionar el diseño de sistemas de drenaje, control y eficiencia del almacenamiento.
- Determinar la altura y la distribución longitudinal de la pantalla de impermeabilización para alcanzar caudales de filtración mínimos.

## **CAPITULO II: MARCO REFERENCIAL**

### **2.1. ANTECEDENTES DEL PROBLEMA**

El problema de las filtraciones en presas ha sido ampliamente documentado en la ingeniería hidráulica y geotécnica, tanto a nivel internacional como nacional, evidenciándose que un control inadecuado del flujo subterráneo en la cimentación puede afectar la eficiencia del almacenamiento y comprometer la estabilidad hidráulica de las estructuras. Diversos estudios de casos reales demuestran que la ausencia de tratamientos de impermeabilización o su diseño deficiente ha derivado en pérdidas significativas de agua, elevados gradientes hidráulicos y, en situaciones extremas, fallas estructurales.

A nivel internacional, un caso representativo es la presa Cañada del Lobo, en México (1987), donde se presentaron filtraciones localizadas aproximadamente a la mitad del cuerpo de la presa, afectando sus condiciones de retención y almacenamiento, lo que hizo necesaria la implementación de medidas de remediación estructural (Geron Flores, 2022). Asimismo, la presa Teton, en los Estados Unidos (1976), constituye uno de los casos más emblemáticos asociados a problemas de filtración y altos gradientes hidráulicos, que derivaron en un proceso de sifonamiento progresivo y en el colapso total de la estructura, ocasionando la pérdida de 14 vidas humanas y daños económicos estimados en cerca de 1 000 millones de dólares (Haramboure & Guedes, 2020). Estos antecedentes evidencian la importancia crítica de evaluar adecuadamente el comportamiento hidráulico del macizo de cimentación desde las etapas iniciales del diseño.

En el contexto nacional, diversas presas han enfrentado problemáticas similares asociadas al control de filtraciones en la cimentación. La presa Huacatina, ubicada en la provincia de Julcán, región La Libertad, presentó filtraciones significativas que obligaron a la paralización de la obra, impidiendo que la estructura cumpla su función de almacenamiento del recurso hídrico. La ausencia de una pantalla de impermeabilización en la cimentación generó

dificultades técnicas y contractuales durante su ejecución, situación que motivó la reformulación del expediente técnico del saldo de obra (Viteri Montes, 2023).

Otro caso relevante es la presa Chirimayuni, localizada en la región Moquegua, en este proyecto se identificó la necesidad de implementar tratamientos geotécnicos específicos para asegurar la impermeabilización del eje de la represa, mediante una pantalla de impermeabilización e inyecciones de consolidación en la cimentación, evidenciando la relevancia del control del flujo subterráneo (Alarcón Maquera, 2013).

**Tabla 1**

*Presas del Perú algunas problemáticas y lecciones aprendidas asociadas al control de filtraciones.*

<i>Presa</i>	<i>Problemática y/o aprendizajes</i>
Pillones	Importancia de las inyecciones y pantalla de impermeabilización
Chirimayuni	Problemas de eficiencia en el almacenamiento, importancia de las inyecciones y pantalla de impermeabilización
Huacatina	Problemas de eficiencia en el almacenamiento y flujo en cimentaciones rocosas

En las regiones altoandinas del Perú, donde las condiciones geográficas, geológicas y climáticas son particularmente exigentes, las represas cumplen un rol fundamental en la gestión y regulación de los recursos hídricos. En este contexto, proyectos como la represa Ancascococha presentan similitudes con otras presas construidas en zonas altoandinas, tales como Pillones, Chirimayuni y Sutunta, las cuales han enfrentado desafíos geotécnicos y climatológicos comparables, constituyéndose en importantes fuentes de lecciones aprendidas para el diseño de soluciones de ingeniería.

La presa Pillones, ubicada en la región Arequipa, es una de las infraestructuras hidráulicas más importantes del sur del Perú, con una capacidad de almacenamiento superior a los 80 millones de metros cúbicos (MMC) y emplazada a una altitud aproximada de 4 300 msnm. Se trata de una presa de

enrocado con cara de concreto (CFRD), con una altura superior a los 30 metros, destinada principalmente al abastecimiento de agua para centrales hidroeléctricas, así como para usos mineros y agrícolas. En esta presa se implementó una pantalla de inyecciones bajo el plinto, orientada a reducir la permeabilidad de la fundación, asegurar la función de almacenamiento y prevenir procesos de erosión interna, destacándose la importancia de los tratamientos de impermeabilización en presas cimentadas sobre roca fracturada.

Por su parte, la represa Chirimayuni, con una capacidad de almacenamiento superior a los 6 millones de metros cúbicos (MMC), incorporó una pantalla de impermeabilización y trabajos de inyección en la cimentación. La ejecución de la pantalla se realizó mediante inyecciones de mezclas de agua, cemento y acelerantes de fraguado, alcanzando un consumo aproximado de 13 789 bolsas de cemento, equivalentes a 586 toneladas (Alarcón Maquera, 2013). Este antecedente pone en evidencia la necesidad de optimizar el diseño de las pantallas de impermeabilización, considerando no solo criterios técnicos de seguridad hidráulica, sino también aspectos económicos y constructivos.

En conjunto, los antecedentes internacionales y nacionales revisados demuestran que el control de filtraciones en presas cimentadas sobre macizos rocosos fracturados constituye un aspecto crítico del diseño hidráulico y geotécnico. Asimismo, evidencian que la ausencia de estudios específicos de filtraciones o de criterios claros para el diseño de pantallas de impermeabilización puede comprometer la eficiencia del almacenamiento y la estabilidad hidráulica de las presas, lo que justifica la necesidad de desarrollar investigaciones aplicadas orientadas al análisis del flujo subterráneo y al dimensionamiento óptimo de soluciones de impermeabilización en proyectos con características similares.

En particular, los casos analizados demuestran que el control adecuado del flujo subterráneo resulta determinante para garantizar la eficiencia del almacenamiento y la estabilidad hidráulica de las presas, constituyéndose en una referencia técnica para la optimización de los criterios de diseño y tratamientos de

fundación en proyectos con características similares, como la represa Ancascococha.

## **2.2. NORMATIVA VIGENTE**

### **2.2.1. NORMA INTERNACIONAL APLICABLE**

#### **2.2.1.1. Diseño de presas**

El manual *Gravity Dam Design* del U.S. Army Corps of Engineers (1995) recomienda analizar el flujo subterráneo a través de la cimentación y definir medidas de drenaje e impermeabilización orientadas a interceptar caminos preferenciales de filtración, sirviendo como referencia para la definición de la profundidad y extensión de la pantalla de impermeabilización propuesta.

La reducción de las filtraciones en la cimentación mediante pantallas de impermeabilización contribuye a disminuir las pérdidas de agua del embalse, mejorando la eficiencia del almacenamiento disponible. Asimismo, la disminución de la permeabilidad del macizo rocoso permite reducir las presiones de levantamiento bajo la estructura, favoreciendo la estabilidad global de la presa. El uso combinado de cortinas de inyección y sistemas de drenaje es señalado como una medida efectiva para el control de filtraciones y subpresiones en presas de gravedad fundadas en roca. (US Army Corps of Engineers, 1995)

#### **2.2.1.2. Análisis y control de filtraciones en presas**

*Seepage Analysis and Control for Dams* (1993) proporciona los lineamientos técnicos para el análisis y control de las filtraciones en presas, señalando que el comportamiento hidráulico del suelo de cimentación debe evaluarse mediante la determinación de parámetros como la permeabilidad, las presiones intersticiales y los gradientes hidráulicos desarrollados. La norma enfatiza que un manejo inadecuado de estos factores puede afectar la estabilidad hidráulica y la seguridad de la estructura, particularmente en presencia de zonas de alta permeabilidad.

Asimismo, el documento desarrolla criterios para el diseño de medidas de control de filtraciones, tales como pantallas impermeables y tratamientos de inyección, describiendo sus materiales, mecanismos de funcionamiento e interacción con la cimentación. Estas medidas se orientan a la reducción de los gradientes hidráulicos y al control de los caudales de filtración a niveles admisibles, constituyéndose en parámetros fundamentales para la evaluación del desempeño hidráulico de la presa.

#### **2.2.1.3. Ingeniería y diseño de inyecciones - 2017**

*Engineering and Design Grouting Technology* (2017) establece los criterios técnicos para el diseño y ejecución de inyecciones en presas, definiendo parámetros como la profundidad de tratamiento, el tipo y la dosificación de la lechada, así como las propiedades reológicas y el tiempo de fraguado, en función de las características del macizo rocoso y de las aperturas de discontinuidades identificadas mediante investigaciones geotécnicas.

La norma indica que la planificación del tratamiento de inyecciones debe orientarse a la conformación de una barrera hidráulica continua, capaz de reducir la permeabilidad del macizo rocoso, controlar los caudales de filtración y disminuir los gradientes hidráulicos a valores admisibles, contribuyendo a la estabilidad hidráulica de la presa y a la prevención de procesos de erosión interna.

Asimismo, el documento enfatiza la importancia del control de calidad durante la ejecución de las inyecciones, recomendando la implementación de protocolos de monitoreo y ensayos de verificación post-inyección que permitan evaluar la eficacia del tratamiento, mediante indicadores asociados a la reducción de la permeabilidad y al comportamiento hidráulico de la cimentación.

#### **2.2.1.4. ASTM D4630-19-2019**

La norma **ASTM D4630-19 (2019)**, emitida por la American Society for Testing and Materials, establece los procedimientos para la ejecución e

interpretación de ensayos de permeabilidad *in situ* en macizos rocosos, constituyéndose en la base técnica para la determinación de parámetros hidráulicos confiables. El cumplimiento de sus protocolos garantiza la validez y reproducibilidad de los valores de permeabilidad utilizados en el análisis del flujo subterráneo.

Asimismo, la norma permite evaluar la anisotropía hidráulica del macizo rocoso, es decir, la variación direccional de la permeabilidad asociada a la presencia de discontinuidades estructurales. Esta caracterización resulta fundamental para la identificación de trayectorias preferenciales de filtración y para la definición de tratamientos de impermeabilización orientados a reducir la permeabilidad efectiva, controlar los caudales de filtración y disminuir los gradientes hidráulicos a niveles admisibles.

#### **2.2.1.5. Investigaciones geotécnicas - 2001**

El manual *Geotechnical Investigations* (EM 1110-1-1804, 2001) del U.S. Army Corps of Engineers establece los criterios y procedimientos para la planificación y ejecución de investigaciones geotécnicas en proyectos de presas, destacando la perforación diamantina como técnica fundamental para la caracterización del macizo rocoso de cimentación. La norma indica que la obtención de testigos de alta calidad permite definir la estratigrafía, estructura geológica, grado de fracturamiento y calidad del macizo rocoso, así como identificar discontinuidades relevantes para el comportamiento hidráulico y mecánico de la fundación.

Asimismo, el manual señala que las perforaciones diamantinas deben complementarse con ensayos hidráulicos *in situ*, registros sistemáticos de recuperación de testigos y del índice RQD. La integración de esta información permite sustentar el diseño de tratamientos de impermeabilización y evaluar su efecto en la reducción de caudales de filtración y gradientes hidráulicos,

constituyéndose en una base técnica esencial para el análisis de filtraciones en presas.

## **2.2.2. NORMA NACIONAL APLICABLE**

### **2.2.2.1. Manual criterios de diseños de obras hidráulicas para la formulación de proyectos hidráulicos multisectoriales y de afianzamiento hídrico - 2010**

El *Manual de Criterios de Diseño de Obras Hidráulicas* constituye el principal marco normativo nacional para la formulación y diseño de proyectos hidráulicos en el Perú, estableciendo criterios técnicos aplicables al análisis hidráulico y geotécnico de infraestructuras de regulación y almacenamiento; en el caso de presas, define lineamientos orientados a garantizar la eficiencia del almacenamiento, la seguridad hidráulica y la estabilidad del sistema presa-cimentación, considerando la interacción con las condiciones hidrológicas y geológicas del emplazamiento, así como la evaluación y control de los procesos de filtración mediante la incorporación de soluciones técnicas que permitan reducir pérdidas por infiltración y asegurar una operación hidráulicamente estable de las obras de regulación.

### **2.2.2.2. Normas y Reglamento de seguridad de presas en el Perú**

El *Reglamento de Seguridad de Presas en el Perú* establece los lineamientos técnicos obligatorios para garantizar la seguridad estructural, hidráulica y geotécnica de las presas a lo largo de sus fases de diseño, construcción, operación y mantenimiento, exigiendo la evaluación del comportamiento de la cimentación, la estabilidad de taludes y el control de los procesos de filtración y subpresión, así como la verificación de factores de seguridad compatibles con las condiciones de carga hidráulica y geológica del emplazamiento, con el fin de prevenir fallas asociadas a inestabilidad o filtraciones no controladas.

### **2.2.2.3. Norma E050 Suelos y Cimentaciones**

La Norma Técnica E.050 *Suelos y Cimentaciones* establece los requisitos mínimos obligatorios para la caracterización geotécnica del suelo y roca de fundación, el análisis de la capacidad portante, la evaluación de asentamientos y la verificación de la estabilidad global de las cimentaciones, incorporando explícitamente la influencia del nivel freático, las subpresiones y los gradientes hidráulicos en la seguridad del sistema suelo–estructura; en este marco, la norma exige que el diseño geotécnico garantice factores de seguridad adecuados frente a falla por corte y deformaciones excesivas, criterios que resultan directamente aplicables al análisis del comportamiento hidráulico y geotécnico de la cimentación en estructuras sometidas a cargas hidráulicas permanentes.

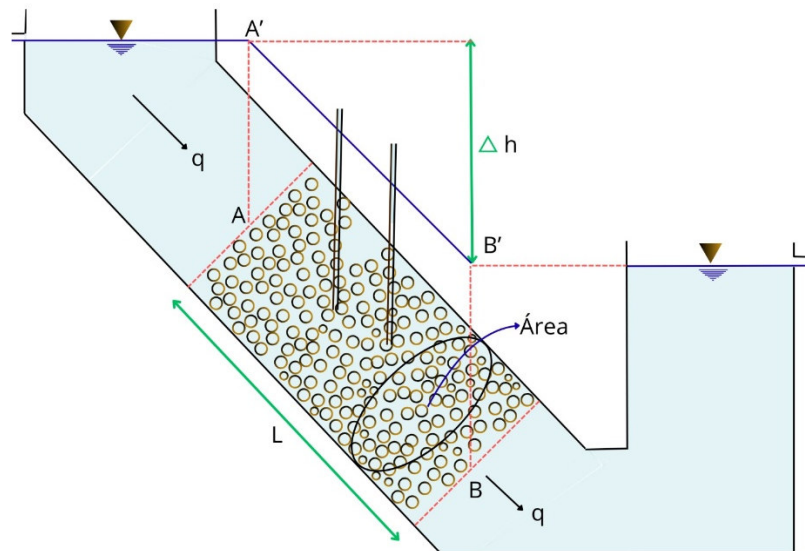
## **2.3. DEFINICIÓN DE CONCEPTOS BÁSICOS**

### **2.3.1. Variable independiente.**

#### **2.3.1.1. Ley de Darcy.**

De acuerdo con González de Vallejo (2002), el comportamiento del flujo de agua en medios porosos y fracturados saturados puede describirse mediante la ley de Darcy, la cual sustenta el análisis de filtraciones en macizos rocosos empleados como cimentación de presas. González de Vallejo (2002) y USACE (1993) observan que para que exista flujo subterráneo es indispensable la presencia de una *diferencia de carga hidráulica entre dos puntos del medio*, lo que genera un *gradiente hidráulico* que actúa como fuerza motriz del movimiento del agua. En este contexto, la ley de Darcy establece que el caudal de flujo es directamente proporcional a dicho gradiente hidráulico y al área transversal del medio de flujo, e inversamente proporcional a la resistencia hidráulica del material (Custodio & Llamas, 1983).

**Figura 1**  
*Experiencia de Darcy*



Nota: Elaboración propia basada en Custodio y Llamas (1983).

$$q = k \cdot \frac{\Delta h}{L} \cdot A$$

$$q = k \cdot i \cdot A$$

donde:

$q$ : es el caudal de filtración ( $\text{m}^3/\text{s}$ ),

$k$ : es el coeficiente de permeabilidad hidráulica del medio ( $\text{m/s}$ ),

$i = \frac{\Delta h}{L}$ : es el gradiente hidráulico (adimensional)

$A$ : es el área transversal perpendicular a la dirección del flujo ( $\text{m}^2$ ).

Custodio y Llamas (1983) señalan que esta relación es válida siempre que el régimen de flujo sea laminar, condición que generalmente se cumple en medios porosos naturales y, de manera aproximada, en macizos rocosos fracturados cuando las velocidades de circulación son reducidas y las discontinuidades no inducen un régimen turbulento. Bajo estas condiciones, el flujo puede ser analizado mediante el supuesto de un medio continuo equivalente, permitiendo la utilización de parámetros hidráulicos representativos para su caracterización.

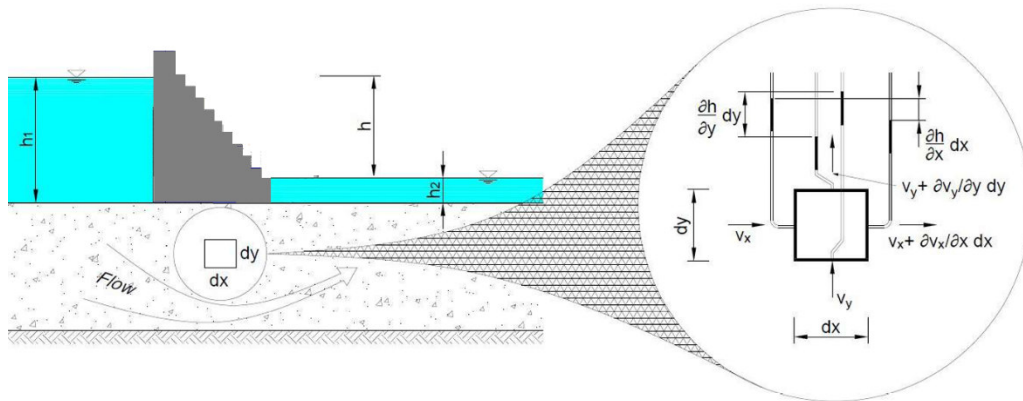
### 2.3.1.2. Análisis del flujo bajo presas (ecuación de Laplace)

El desarrollo presentado en este apartado se basa en el Manual EM 1110-2-1901 del U.S. Army Corps of Engineers (1993) y Aslan y Temel (2022). El análisis del flujo subterráneo en medios porosos saturados, como los que se presentan en la cimentación de presas, se basa en la formulación matemática de la ecuación de Laplace.

Tomando en cuenta un medio continuo representativo, observemos la siguiente figura:

**Figura 2**

*Flujo a través de un suelo permeable saturado bajo una presa*



Nota: tomado de Aslan y Temel (2022).

Asumiendo las siguientes hipótesis según (USACE, 1993), las cargas hidráulicas  $h_1$  y  $h_2$  son constantes; por lo tanto, el flujo se encuentra en régimen permanente, el fluido es incompresible, volumen de vacíos permanece constante por lo que el suelo se considera incompresible, flujo es laminar, el flujo se considera bidimensional y el estrato de suelo permeable saturado es homogéneo.

Utilizando la ley de Darcy en las direcciones  $x$  y  $y$  tendríamos:

$$v_x = k_x i_x = -k_x \frac{\partial h}{\partial x}$$

$$v_y = k_y i_y = -k_y \frac{\partial h}{\partial y}$$

Téngase en cuenta que  $h$  es la carga hidráulica total:

$$h = z + \frac{p}{\gamma_w}$$

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

Esta última expresión según USACE (1993) constituye una forma de la ecuación de Laplace para flujo laminar bidimensional en medios porosos homogéneos e isotrópicos, esta es la manera clásica de entender el fenómeno.

La formulación presentada, así como el procedimiento iterativo para la determinación de la superficie libre mediante el método de los elementos finitos, se basa en el enfoque desarrollado para el análisis de filtraciones bajo presas en medios porosos saturados, descrito en Aslan y Temel (2022), y es consistente con la metodología implementada en programas comerciales de análisis de estabilidad y filtración como SLIDE.

### 2.3.1.3. Permeabilidad en macizos rocosos ( $k_e$ )

A diferencia de los medios porosos granulares, la permeabilidad del macizo rocoso no depende principalmente de la porosidad intergranular de la roca intacta, sino de la presencia, continuidad, apertura y conectividad de las discontinuidades estructurales, tales como diaclasas, fallas, planos de estratificación y zonas de alteración (Custodio & Llamas, 1983; U.S. Army Corps of Engineers, 1993).

Para fines de análisis hidráulico y modelamiento numérico, el flujo subterráneo en macizos rocosos se representa mediante la adopción de un medio continuo equivalente, en el cual el comportamiento hidráulico global del macizo

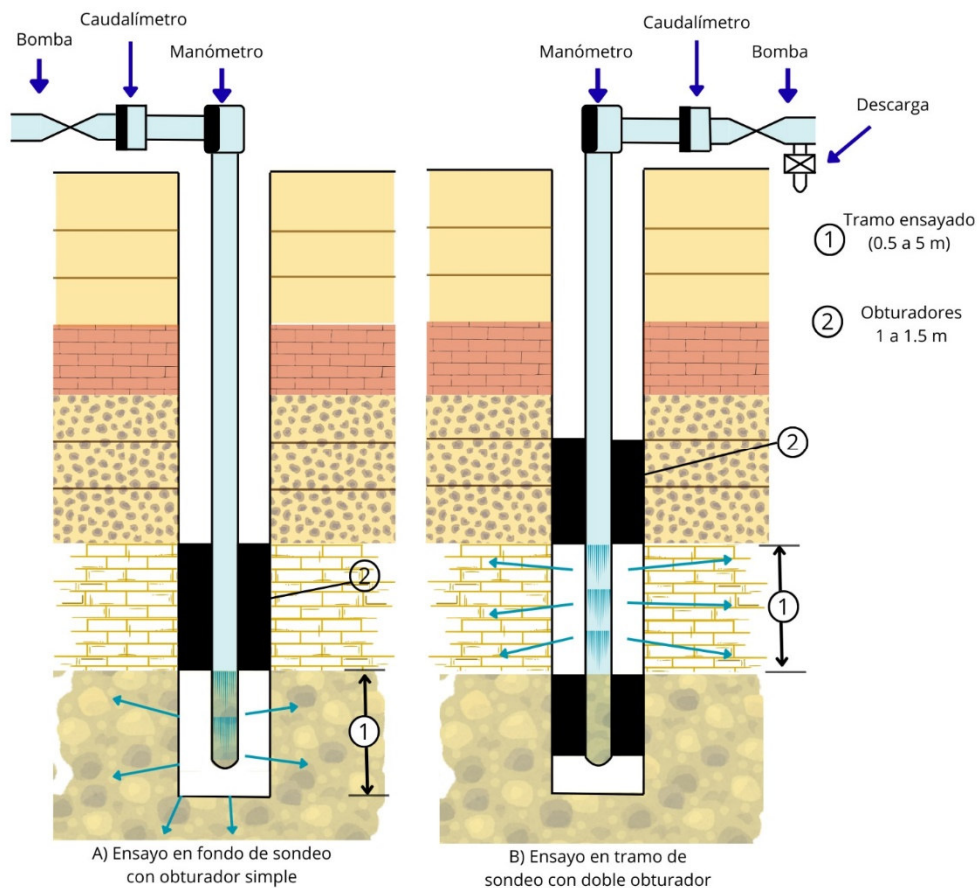
se describe a través de un coeficiente de permeabilidad equivalente o conductividad hidráulica equivalente ( $k_e$ ). Este enfoque permite la aplicación de la ley de Darcy, siempre que el régimen de flujo sea predominantemente laminar y que la escala del modelo sea suficiente para integrar el efecto conjunto de las discontinuidades del macizo rocoso (Custodio & Llamas, 1983; U.S. Army Corps of Engineers, 1993).

#### **2.3.1.4. Ensayo Lugeon y determinación de la permeabilidad equivalente del macizo rocoso**

El ensayo consiste en la inyección de agua a presión controlada en un tramo aislado del sondeo, midiendo el caudal absorbido por el macizo como un indicador de su comportamiento hidráulico. Los resultados se expresan en unidades Lugeon (LU), constituyendo un índice empírico de la permeabilidad del macizo rocoso (U.S. Army Corps of Engineers, 1993, Apéndice C).

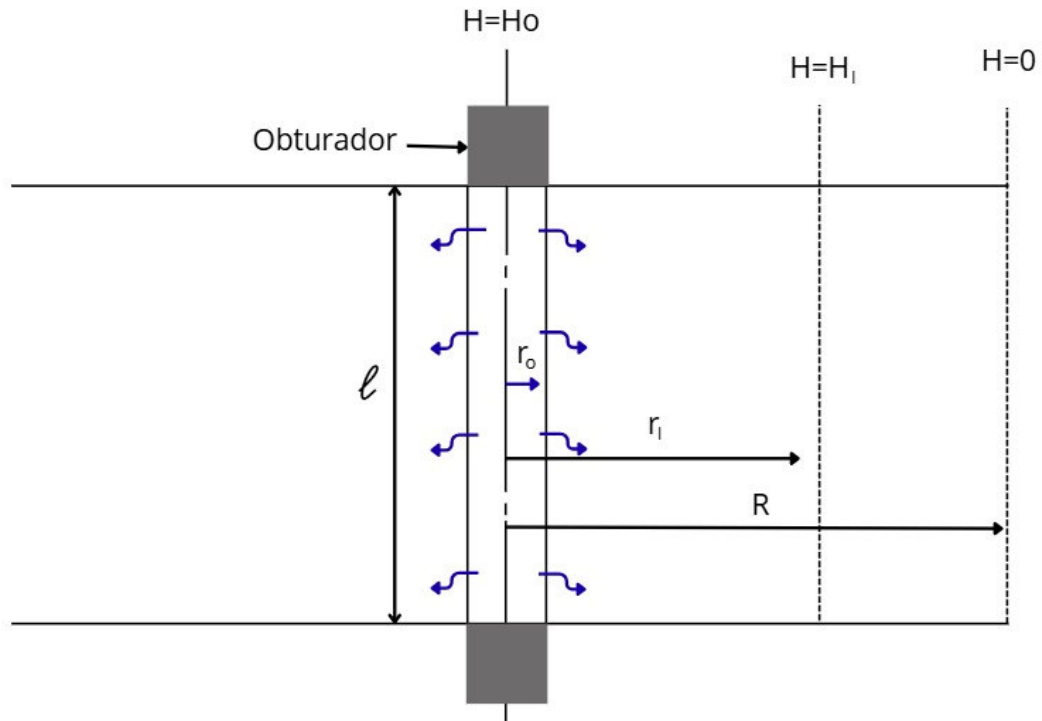
Una unidad Lugeon se define como la absorción de 1 L/min por metro de tramo ensayado, bajo una presión efectiva de 1 MPa. El USACE enfatiza que el valor Lugeon no representa una propiedad hidráulica intrínseca del material, sino un parámetro equivalente que refleja el grado de fracturamiento y conectividad hidráulica del macizo rocoso (USACE, 1993).

Durante el ensayo, la presión de inyección se controla mediante un manómetro ubicado en la boca del sondeo, mientras que el caudal inyectado se mide con un caudalímetro. El ensayo se ejecuta en etapas de presión crecientes y decrecientes, manteniendo cada nivel durante un intervalo de tiempo constante, usualmente de 10 minutos, evitando exceder la presión de confinamiento para no inducir fracturamiento hidráulico (Weaver & Bruce, 2007).

**Figura 3***Esquema del ensayo Lugeon con 1 y 2 obturadores*

Nota: Adaptado de (Weaver & Bruce, 2007).

Para la determinación de la permeabilidad equivalente del macizo rocoso, el desarrollo teórico del ensayo se basa en el Apéndice C-1 del Manual EM 1110-2-1901 del U.S. Army Corps of Engineers (1993). El análisis asume flujo radial estacionario, régimen laminar, medio homogéneo e isotrópico, y un tramo ensayado de longitud  $\ell$ .

**Figura 4***Flujo radial en un medio homogéneo e isotrópico*

Nota: Adaptado de (USACE, 1993).

$r_0 \rightarrow$  radio del sondeo

$R \rightarrow$  radio de influencia

$l \rightarrow$  longitud del tramo ensayado

$H_0, H_1, H = 0 \rightarrow$  distribución de carga hidráulica

La permeabilidad equivalente del macizo rocoso es:

$$k_e = \frac{q}{2\pi l H_0} \ln \left( \frac{R}{r_0} \right)$$

donde  $H_0$  es la carga hidráulica excedente aplicada durante el ensayo.

### **2.3.1.5. Gradiente hidráulico.**

De acuerdo con González de Vallejo (2002), el gradiente hidráulico es un parámetro determinante en el análisis del flujo subterráneo, ya que controla el movimiento del agua y la estabilidad hidráulica en macizos rocosos. De acuerdo con el *Seepage Analysis and Control for Dams* del U.S. Army Corps of Engineers (1993), gradientes hidráulicos elevados pueden inducir fenómenos de inestabilidad tales como sifonamiento, erosión interna o incremento progresivo de la permeabilidad, especialmente en materiales fracturados o alterados.

La verificación de la estabilidad hidráulica se realiza mediante la comparación entre los gradientes hidráulicos desarrollados, obtenidos a partir del análisis numérico de filtraciones, y los valores de gradiente hidráulico admisible asociados a la calidad del macizo rocoso. Cuando los gradientes calculados superan los valores admisibles, se incrementa el riesgo de erosión interna o tubificación, lo que hace necesaria la implementación de medidas de control de filtraciones, tales como pantallas de impermeabilización o tratamientos de la cimentación. De aquí que el gradiente hidráulico se adopta como criterio fundamental de verificación de la estabilidad hidráulica del macizo rocoso,

### **2.3.1.6. Erosión interna o tubificación.**

De acuerdo con el *Seepage Analysis and Control for Dams* del U.S. Army Corps of Engineers (1993), este proceso se produce cuando las fuerzas de filtración inducen el arrastre progresivo de partículas finas o material alterado a través de poros, discontinuidades o contactos, incrementando la permeabilidad y los vacíos internos, lo que puede comprometer la estabilidad de la estructura.

En el contexto nacional, ingenieros peruanos como el Ing. Jorge Briones Gutiérrez han abordado este fenómeno en estudios aplicados a presas, destacando en su publicación *Presa Limón – Olmos: análisis de filtración, riesgos e incertidumbres* la relación entre los límites de gradiente hidráulico admisible en

macizos rocosos y su calidad geomecánica, evaluada mediante el índice RMR (*Rock Mass Rating*).

De acuerdo con González de Vallejo et al. (2002), el índice RMR integra parámetros que controlan directamente la circulación del agua en el macizo rocoso, tales como el espaciamiento, persistencia y condición de las discontinuidades, así como las condiciones de agua subterránea. Estos factores determinan la conectividad hidráulica de las fracturas, influyendo de manera directa en el comportamiento hidráulico del macizo y en la efectividad de las medidas de impermeabilización.

El análisis de filtraciones y la evaluación del riesgo de erosión interna se basan en criterios de gradiente hidráulico admisible ampliamente desarrollados por el U.S. Army Corps of Engineers en el manual EM 1110-2-1901 (*Seepage Analysis and Control for Dams*), donde se establece que los gradientes hidráulicos máximos dependen de la calidad del material y de las condiciones del macizo rocoso. En el presente estudio, dichos criterios se aplican en función del valor del RMR, adoptándose rangos empíricos reportados por Briones (2022) como criterio conservador para la evaluación del riesgo de tubificación.

**Tabla 2**

*Gradiente hidráulico admisible en función del RMR*

<i>RMR</i>	<i>Gradiente hidráulico máximo admisible (m/m)</i>
81<RMR<100	15-30
61<RMR<80	10-14
41<RMR<60	7-9
21<RMR<40	5-6
RMR<20	3-4

Nota: Briones Gutiérrez (2022), adaptado; RMR según Bieniawski (1989).

Los rangos de gradiente hidráulico admisible presentados en la tabla anterior se emplean en el presente estudio como criterio de evaluación del riesgo de erosión interna o tubificación en el macizo rocoso de cimentación. La comparación entre los gradientes hidráulicos obtenidos a partir del análisis de filtraciones y los valores admisibles definidos en función del índice RMR permite determinar si las condiciones hidráulicas desarrolladas son seguras o potencialmente críticas. Este enfoque constituye una herramienta de verificación complementaria para el diseño de la pantalla de impermeabilización, orientada a reducir los gradientes hidráulicos a niveles compatibles con la calidad geomecánica del macizo rocoso.

#### **2.3.1.7. Dimensiones e indicadores de la variable independiente**

##### **Dimensiones:**

- Permeabilidad del macizo rocoso
- Gradiente hidráulico
- Caudal de filtración

##### **Indicadores:**

- Unidad Lugeon (UL)
- Coeficiente  $k$  equivalente (cm/s)
- Gradiente hidráulico máximo (adimensional)
- Caudal de filtración ( $m^3/s$ )

#### **2.3.2. Variable dependiente.**

##### **2.3.2.1. Pantalla de impermeabilización**

Según Engineering and design: Grouting technology (U.S. Army Corps of Engineers. (2017) la cortina de impermeabilización es el tratamiento que se realiza para interrumpir la filtración bajo presas, o reducirla hasta un nivel que pueda ser aceptable a nivel de operación. Se ejecuta mediante la perforación e

inyección de lechada agua cemento u otros en una o más líneas de pozos de inyección en la fundación, normalmente en la cerrada y paralelas al eje de la presa o perpendiculares a la dirección del flujo de agua.

#### **2.3.2.2. Dimensiones e indicadores de la variable dependiente**

##### **Dimensiones:**

- Altura de la pantalla impermeabilización
- Eficiencia hidráulica del almacenamiento
- Estabilidad hidráulica del macizo rocoso

##### **Indicadores:**

- Altura final optimizada de la pantalla (m)
- Pérdidas anuales por filtración ( $m^3/año$ )
- Relación pérdidas por filtración / volumen útil de embalse (%)
- Gradiente hidráulico máximo desarrollado en el macizo rocoso (m/m)
- Factor de seguridad hidráulica frente al gradiente

## **CAPITULO III: METODOLOGIA Y DISEÑO DEL PROYECTO**

### **3.1. DESCRIPCION DE LA INVESTIGACION APLICADA**

#### **3.1.1. Tipo de investigación.**

Es aplicada, porque está orientada a la solución de un problema técnico real y específico, identificado en la represa Ancascococha, ubicada en la región Apurímac, relacionado con la presencia de filtraciones en el suelo de cimentación que podría comprometer eficiencia del almacenamiento, la estabilidad y seguridad de la infraestructura.

#### **3.1.2. Nivel de investigación.**

La presente investigación es de nivel explicativo, dado que busca identificar, analizar y explicar las relaciones causa–efecto entre las características geotécnicas del macizo rocoso de fundación y el comportamiento del flujo de filtraciones y gradiente hidráulico en la cimentación de la represa Ancascococha.

El carácter explicativo del estudio se manifiesta en que no solo se describen los fenómenos de filtración, sino que se analizan las causas que los generan, así como los efectos que producen sobre la eficiencia en el almacenamiento y la estabilidad represa. En este sentido, la modelación del flujo permite explicar cómo la geometría de la presa, las condiciones del macizo rocoso y la presencia de la pantalla de impermeabilización influyen en la magnitud de las filtraciones y el gradiente hidráulico

#### **3.1.3. Justificación del enfoque aplicado.**

El enfoque cuantitativo se sustenta en la medición objetiva de variables obtenidas en campo, tales como el coeficiente de permeabilidad, la condición de Lugeon y la clasificación del macizo rocoso (RMR). A partir de estos datos se desarrollan modelos matemáticos y numéricos que permiten simular el comportamiento de las filtraciones y los gradientes hidráulicos en el escenario sin proyecto. Los resultados obtenidos son analizados para evaluar la necesidad del

diseño de una cortina de impermeabilización, con el propósito de reducir tanto el caudal de filtración como los gradientes hidráulicos a valores admisibles, para garantizar tanto la eficiencia del almacenamiento como la estabilidad de la represa.

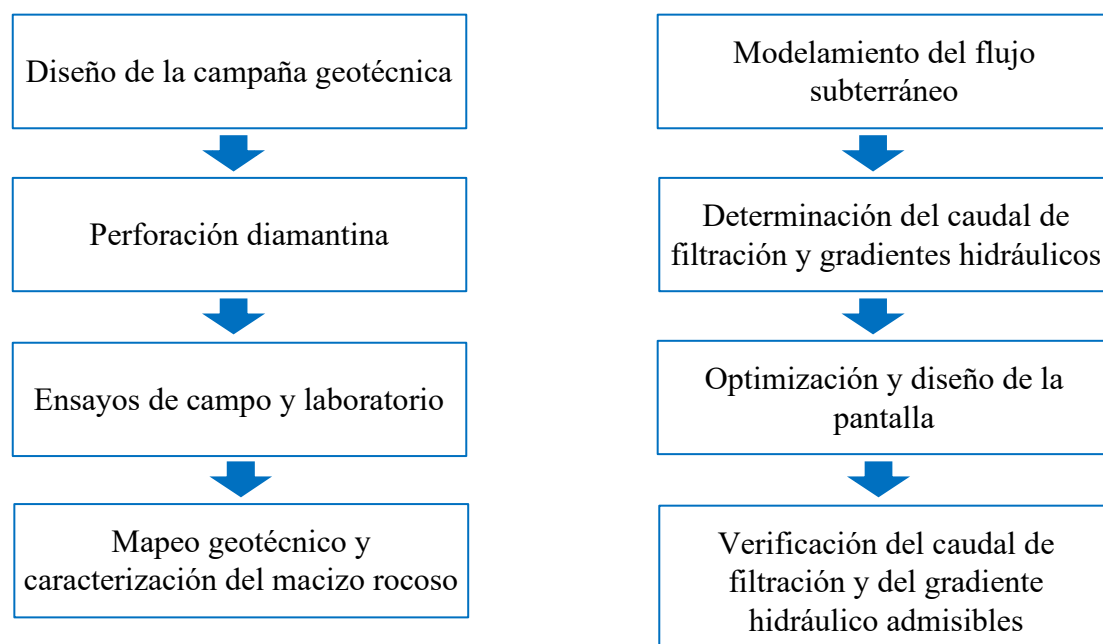
## 3.2. DISEÑO DEL PROYECTO

En la presente, el diseño de la pantalla de impermeabilización se entiende como el proceso de definición de su geometría óptima (altura y distribución longitudinal), basada en el análisis de filtraciones, gradientes hidráulicos admisibles y control de pérdidas por filtración.

### 3.2.1. Etapas del proyecto

#### Figura 5

*Metodología para el diseño y verificación de una pantalla de impermeabilización.*



Nota: Elaboración propia a partir de USACE (1993), USACE (2017) y Weaver y Bruce (2007).

A partir de la revisión de los lineamientos técnicos del U.S. Army Corps of Engineers (USACE, 1993; USACE, 2017) y de los criterios propuestos por Weaver y Bruce (2007), el desarrollo de un proyecto de pantalla de

impermeabilización se estructura mediante una secuencia metodológica que integra la caracterización geotécnica del macizo rocoso, el análisis del flujo subterráneo y la verificación de los criterios eficiencia del almacenamiento y seguridad en la estabilidad de la presa.

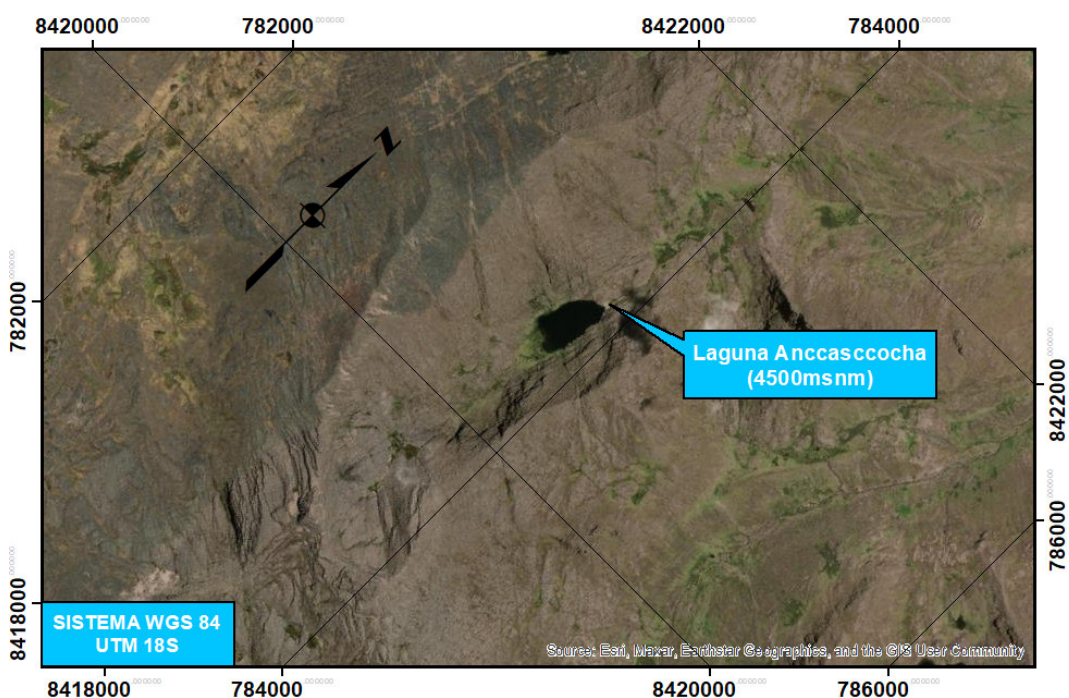
Dicha secuencia metodológica se resume en el flujograma presentado en la figura antes mostrada, el cual orienta el proceso desde la etapa de investigación geotécnica hasta la verificación del caudal de filtración y del gradiente hidráulico admisible.

### 3.2.1.1. Ubicación de la represa Anccascocha

La represa Anccascocha se localiza en el departamento de Apurímac, provincia de Cotabambas, distrito de Challhuahuacho, en el ámbito territorial de la comunidad campesina de Choccoyo, específicamente en el lugar denominado Anccascocha.

#### Figura 6

*Localización de la laguna Anccascocha (WGS 84 – UTM Zona 18S).*



### **3.2.1.2. Características geométricas del cuerpo represa Ancascococha**

En esta investigación se adopta la ubicación y la geometría general del cuerpo de la represa definidas en el expediente técnico adicional de obra propuesto por el contratista.

La tipología de la presa es definida por el especialista en presas y/o el jefe de proyecto. Parámetros tales como la altura útil, el borde libre y las dimensiones de la tubería de descarga y de limpia son establecidos por el especialista en hidrología e hidráulica. Asimismo, el ancho de corona, la configuración geométrica del cuerpo, el nivel de desplante y las características de los materiales del cuerpo son definidos por el especialista en estructuras.

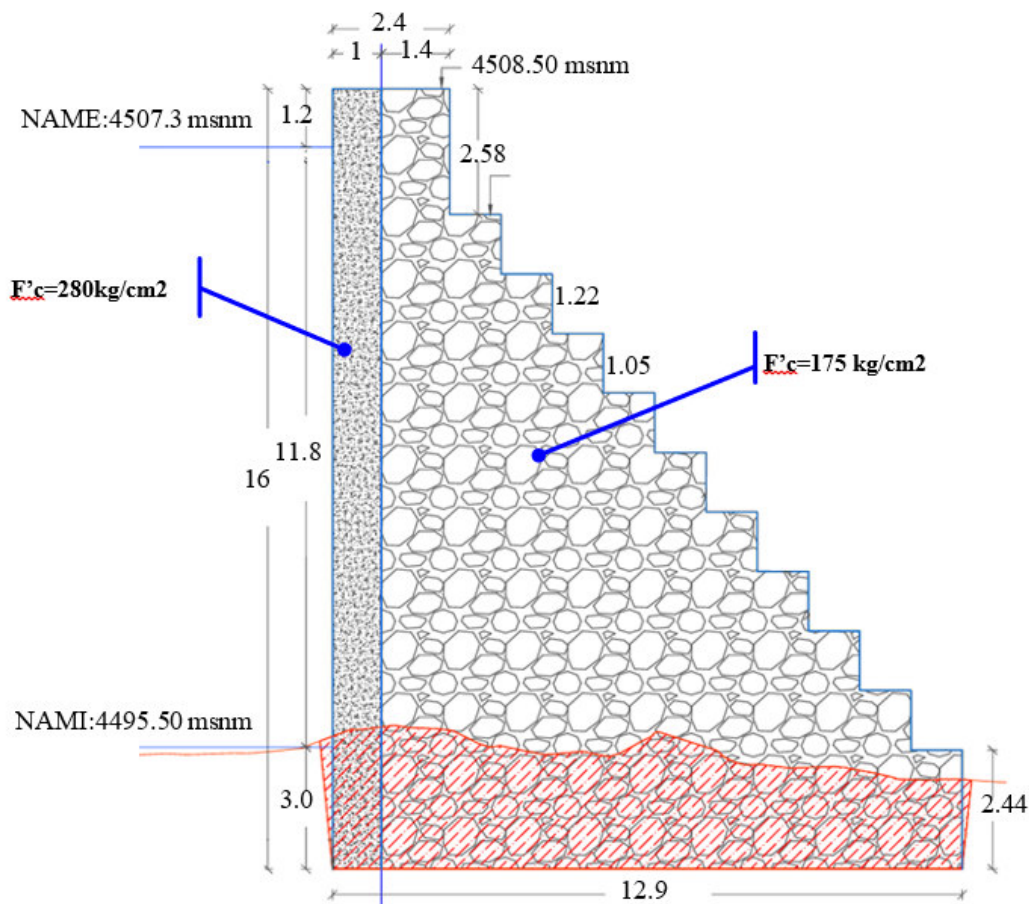
La determinación y el análisis detallado de dichos parámetros no forman parte de los alcances de la presente tesis, por lo que se consideran como datos de entrada para el desarrollo de la presente tesis.

La sección transversal mostrada en la figura siguiente corresponde a la condición más desfavorable desde el punto de vista hidráulico, considerando la geometría del cuerpo de la presa, los niveles de operación del embalse y las condiciones de contacto con la fundación. En tal sentido, dicha sección se adopta como sección transversal crítica para el modelamiento hidráulico, constituyéndose en la base para el análisis del flujo subterráneo y la evaluación de las condiciones de filtración a través del cuerpo de la presa y su fundación.

Las principales características geométricas del cuerpo de la represa Ancascococha y de los niveles operativos del embalse se resumen a continuación, las cuales constituyen parámetros de referencia para la definición de las condiciones hidráulicas del proyecto.

**Figura 7**

*Sección transversal crítica para el análisis de filtraciones.*



La elevación de la corona de la presa se ubica en 4508.50 m.s.n.m., mientras que la elevación correspondiente al Nivel de Aguas Máximas Extraordinarias (NAME) es 4507.30 m.s.n.m.; el Nivel de Aguas Máximas Ordinarias (NAMO) se sitúa en 4507.00 m.s.n.m., y el Nivel de Aguas Mínimas (NAMI) en 4495.50 m.s.n.m. Asimismo, la elevación del terreno natural en el cauce del río a la altura del eje de la presa es 4495.30 m.s.n.m. En cuanto a su configuración estructural, la presa presenta una altura total desde la cimentación de 16.00 m y una altura hidráulica del embalse ( $H_e$ ) de 12 m, valores que definen el régimen de carga hidráulica considerado en los análisis de filtración y estabilidad.

En la presente tesis, la altura hidráulica del embalse ( $H_e$ ) se define como la diferencia de niveles entre la elevación del terreno natural en el eje de la presa y el Nivel Máximo Extraordinario (NAME). Asimismo, para efectos del presente estudio, se adoptan como niveles característicos del embalse el Nivel Máximo Operativo (NAMO), correspondiente a las condiciones normales de operación; el Nivel Máximo Extraordinario (NAME), asociado a condiciones excepcionales; y el Nivel Mínimo Operativo (NAMIN), correspondiente al nivel mínimo de operación del embalse.

Asimismo, de acuerdo con la propuesta de diseño, se consideran los volúmenes característicos del embalse, los cuales permiten satisfacer los requerimientos de almacenamiento del proyecto; dichos volúmenes, expresados en millones de metros cúbicos (MMC), se presentan de manera resumida en la tabla siguiente:

**Tabla 3**  
*Volúmenes del embalse Ancascococha*

<i>Concepto</i>	<i>Volumen (MMC)</i>
Volumen Muerto ( $V_m$ )	0.084
Volumen Útil ( $V_u$ )	0.881

Nota: Diseño hidrológico expediente técnico adicional de obra.

### **3.2.1.3. Diseño de la campaña geotécnica**

#### **3.2.1.3.1 Criterios generales de diseño**

El diseño de la campaña geotécnica debe estructurarse a partir de criterios técnicos que permitan una adecuada caracterización geotécnica e hidrogeológica del sitio, tales como la ubicación, número, orientación y profundidad de las perforaciones diamantinas, tanto en el eje de la presa como en el área del embalse.

Según González de Vallejo et al., la campaña geotécnica en presas debe iniciarse con una adecuada *recopilación de información geológica regional y local, seguida de trabajos de campo que incluyan mapeo geológico-geotécnico*

*superficial detallado*, identificación y caracterización de las discontinuidades estructurales, la determinación de su orientación, buzamiento y espaciamiento, así como la evaluación del grado de fracturamiento y del estado de alteración del macizo rocoso.

De acuerdo con los lineamientos del U.S. Army Corps of Engineers, la campaña geotécnica debe estar orientada a la caracterización de la *fundación de la presa y estribos*. En aquellos casos en que el eje de la presa se encuentre circunscrito a una o más formaciones geológicas, o atraviese contactos litológicos, las perforaciones diamantinas deben permitir la identificación y caracterización de vetas o zonas débiles, diaclasas y fallas, así como la determinación de su orientación y ángulo de buzamiento (USACE, 1995).

De acuerdo con los lineamientos del U.S. Army Corps of Engineers (USACE, 1993; 2017), los sondeos deben extenderse más allá de la zona directamente afectada por la carga hidráulica del embalse, de modo que se *intercepten tanto las discontinuidades dominantes como las trayectorias preferenciales de filtración*. Este criterio se fundamenta en que los gradientes hidráulicos más elevados suelen concentrarse en las proximidades del contacto presa–cimentación y decrecen progresivamente con la profundidad, hasta alcanzar valores hidráulicamente poco significativos.

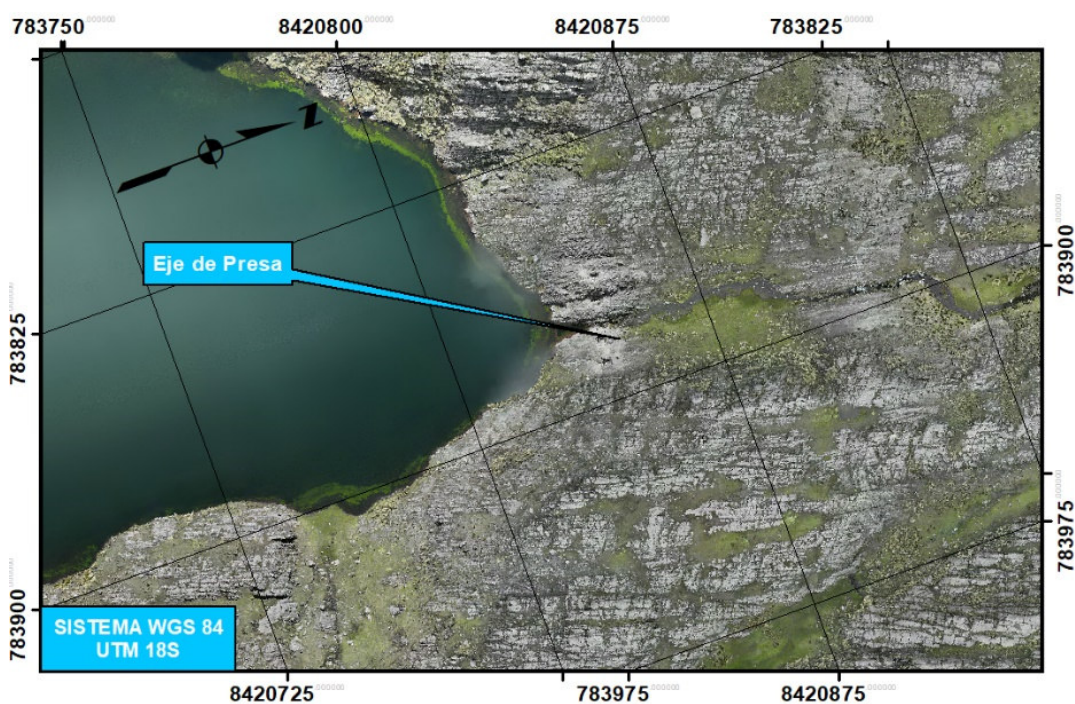
Diversos estudios de filtraciones bajo presas indican que, en macizos rocosos fracturados, los gradientes hidráulicos elevados se desarrollan, en general, *hasta profundidades del orden de 0.8 a 2 veces la altura hidráulica del embalse*, dependiendo de la permeabilidad equivalente del macizo, del grado de fracturamiento y de la conectividad de las discontinuidades (USACE, 1993; Weaver & Bruce, 2007). Por debajo de esta zona, el flujo tiende a distribuirse de manera más difusa y los gradientes disminuyen significativamente, reduciendo el riesgo de erosión interna y sifonamiento, este criterio se adopta como referencia de diseño y no como un valor normativo rígido.

### 3.2.1.3.2 Criterios geológicos

Según los estudios de Perfil Técnico y Expediente Técnico contractual de la represa Ancascococha se concluye que la cerrada litológicamente está constituida por un solo tipo de roca, identificada como diorita la cual se encuentra fracturada. La descripción petrográfica corresponde a una roca ígnea intrusiva de textura granular, de color gris, con tamaño de grano entre 1 a 1.5mm, su composición mineralógica tiene como mineral plagioclasa y como material secundario biotita.

#### Figura 8

*Ortofoto del eje de presa.*



**Figura 9**

*Fotografía panorámica de la zona de represa.*



Respecto a las estructuras geológicas el fracturamiento principal en el eje de la cerrada y estribos, sigue la orientación preferencial N-S y el buzamiento de aproximadamente  $89^\circ$ , concordante con la delineación tectónica regional y la dirección del río que sale de la laguna.

### **3.2.1.3.3 Definición del número, ubicación e inclinación de sondeos**

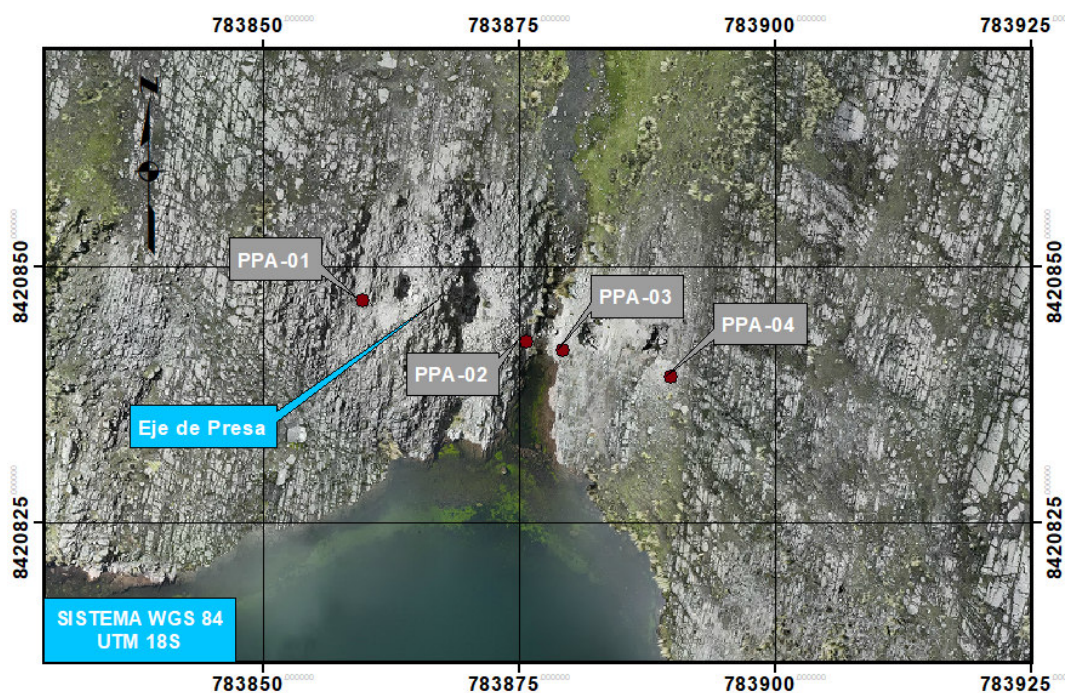
Luego de la revisión de los estudios anteriores se realizó una visita de campo para verificar in situ las características geológicas locales, confirmando las descripciones realizadas a nivel de perfil y expediente técnicos. Así también para mayor entendimiento de la zona de la cerrada se realizó un vuelo dron y se obtuvo una ortofoto para entender de mejor manera las orientaciones de las diaclasas.

Definida la cantidad de unidades litológicas, la orientaciones y buzamiento preferentes de las fracturas, y definido la carga hidráulica de la presa, se planteó el diseño de la campaña geotécnica. Las ubicaciones de los pozos diamantinos se plantearon por debajo de la posible pantalla de impermeabilización específicamente en el eje, proponiéndose dos pozos situados cercanos al riachuelo y 02 pozos en los estribos derecho e izquierdo respectivamente.

Así también, dado el buzamiento de la línea de fracturas se propone que los pozos diamantinos tengan una inclinación de  $70^\circ$ , para interceptar y explorar la mayor cantidad de discontinuidades posibles, finalmente se presenta el plan de la campaña geotécnica a nivel de perforación diamantina.

**Figura 10**

*Ubicación de pozos diamantinos propuestos.*



**Tabla 4**

*Coordenadas de pozos diamantinos, longitud e inclinación para campaña geotécnica.*

<i>Pozo</i>	<i>Coordenadas</i>		<i>Profundidad (m)</i>	<i>Inclinación</i>
	<i>UTM WGS 84, zona 18S</i>			
	<i>Este (m)</i>	<i>Norte (m)</i>		
PPA-01	783859.68	8420846.65	15	$70^\circ$
PPA-02	783875.62	8420842.71	25	$70^\circ$
PPA-03	783879.29	8420841.80	25	$70^\circ$
PPA-04	783889.77	8420839.20	15	$70^\circ$

#### 3.2.1.4. Estudios geotécnicos de campo o perforación diamantina

Los estudios geotécnicos de campo realizados en el área del eje de presa Ancascococha se ejecutaron mediante perforación diamantina con recuperación continua de testigos. Estos trabajos tuvieron como finalidad caracterizar las condiciones geológicas, estructurales, geomecánicas e hidrogeológicas del macizo rocoso de cimentación, así como obtener información confiable para el modelamiento subterráneo de la presa y de las medidas de tratamiento geotécnico correspondientes.

Se ejecutaron un total de cuatro (04) perforaciones diamantinas, denominadas PPA-01, PPA-02, PPA-03 y PPA-04 e inclinadas  $70^\circ$ , con un metraje acumulado de 80,0 m, distribuidas en ambos márgenes y el centro del eje de presa. Dos perforaciones alcanzaron profundidades de 15,0 m (PPA-01 y PPA-04) y dos perforaciones profundidades de 25,0 m (PPA-02 y PPA-03).

#### Figura 11

*Inicio de perforación PPA-03.*



Durante la ejecución de los sondajes se realizó el logueo geológico y geotécnico continuo de los testigos, registrándose parámetros tales como litología

y grado de alteración, intensidad y frecuencia de fracturamiento, índice RQD, espaciamiento y condición de las discontinuidades y presencia de rellenos y agua en fracturas.

El levantamiento geotécnico se efectuó por tramos de calidad geotécnica homogénea (iso-calidad), definidos a partir de similitudes en el grado de fracturamiento, estado de alteración y condiciones estructurales del macizo rocoso. Esta segmentación permitió aplicar de manera representativa la clasificación del macizo rocoso mediante el índice RMR.

### 3.2.1.5. Ensayos de permeabilidad de campo

Para los ensayos Lugeon se ha propuesto tramos de 5m de prueba, fijando un obturador en la parte superior de este tramo virgen y e inyectando agua a presión con una bomba. Un manómetro colocado en la boca del pozo, un caudalímetro y una válvula de descarga, permiten medir los caudales inyectados a una presión dada.

Definidos la presión máxima que va a ser utilizada, la cual no debe exceder a la presión de confinamiento esperada a la profundidad de la perforación con el fin de no generar fracturas en la roca a causa de la presión generada por el agua, a partir de esta presión máxima se trabaja durante el ensayo.

**Tabla 5**

*Estados de presión propuestos.*

<i>Estado 1</i>	<i>Estado 2</i>	<i>Estado 3</i>	<i>Estado 4</i>	<i>Estado 5</i>
<i>bajo</i>	<i>medio</i>	<i>máximo</i>	<i>medio</i>	<i>bajo</i>
$0.5 \cdot P_{max}$	$0.75 \cdot P_{max}$	$P_{max}$	$0.75P_{max}$	$0.5 \cdot P_{max}$

El ensayo se realiza en cinco estados, en los cuales la presión con la que el agua es inyectada varía entre cada uno de ellos. Cada estado consiste en bombear cuanta cantidad de agua sea necesaria para mantener definida y constante la presión de esta. Esto se hace, generalmente, en intervalos de 10 minutos. Esta

presión es incrementada en cada estado subsecuente, hasta llegar a la presión máxima ya establecida. Una vez ésta es alcanzada, la presión del agua debe ser reducida pasando por las mismas presiones de los estados anteriores.

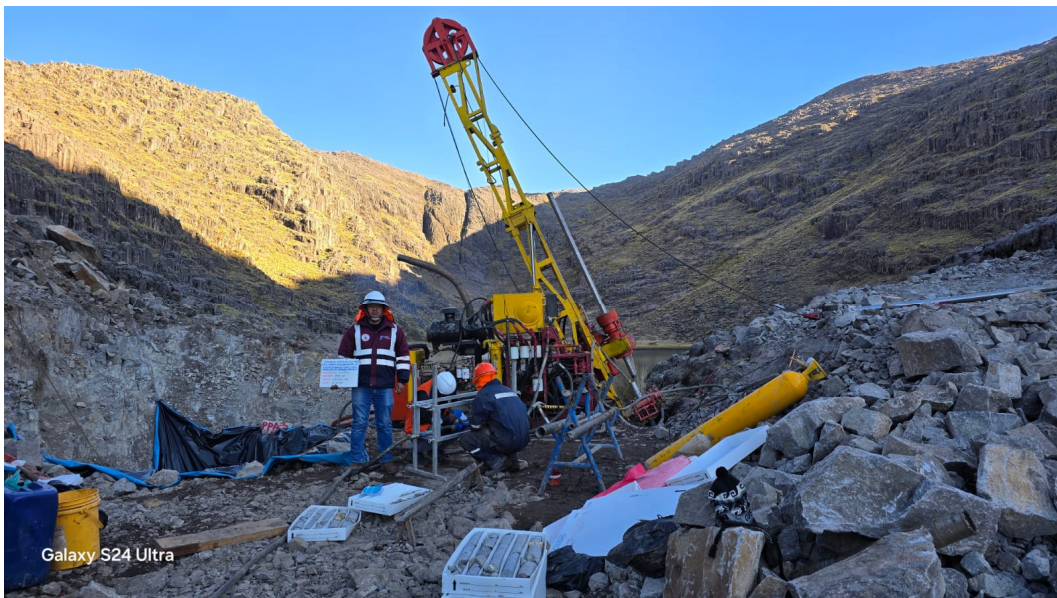
Ahora bien, tomando en cuenta la expresión de USACE (1993):

$$k_e = \frac{q}{2\pi\ell H_0} \ln \left( \frac{R}{r_0} \right)$$

En la práctica habitual de la ingeniería, suele emplearse la longitud del tramo ensayado  $\ell$  en lugar del radio de influencia  $R$ . Esta aproximación, si bien no representa con precisión el alcance real del flujo inducido, resulta aceptable para fines prácticos, debido a la baja sensibilidad del término logarítmico, por lo que su influencia en la determinación de  $k_e$  es reducida (USACE, 1993). Bajo esta consideración, la expresión anterior puede escribirse como:

$$k_e = \frac{q}{2\pi\ell H_0} \ln \left( \frac{\ell}{r_0} \right)$$

**Figura 12**  
*Ejecución de ensayos Lugeon.*



Esta formulación permite estimar la permeabilidad equivalente asociada al sistema de fracturas del macizo rocoso, los resultados obtenidos evidencian valores de permeabilidad del orden de  $10^{-4}$  a  $10^{-5}$  cm/s en los primeros metros de profundidad, mejorando progresivamente con la profundidad, lo que resulta consistente con la disminución del grado de fracturamiento del macizo rocoso.

### 3.2.1.6. Ensayos de laboratorio de la matriz rocosa

A partir de los testigos recuperados se seleccionaron muestras representativas de roca diorita para la realización de ensayos de laboratorio, entre los cuales se incluyeron resistencia a la compresión simple, determinación de densidad, porcentaje de vacíos, módulo de elasticidad y relación de Poisson.

Estos ensayos permitieron complementar la caracterización geomecánica del macizo rocoso y aportar parámetros fundamentales para el análisis de capacidad portante y diseño de la cimentación.

### Figura 13

*Toma de muestras de la matriz rocosa.*



### 3.2.2. Herramientas y/o softwares utilizados

Los resultados de los ensayos de permeabilidad tipo Lugeon, así como los parámetros geotécnicos obtenidos de las perforaciones diamantinas, fueron procesados y sistematizados empleando hojas de cálculo en Microsoft Excel, permitiendo estimar los coeficientes de permeabilidad equivalentes, la elaboración de perfiles hidráulicos y el análisis comparativo entre escenarios.

La elaboración de secciones transversales, esquemas de ubicación de perforaciones y figuras de apoyo se realizó mediante herramientas de dibujo asistido por computadora (CAD), las cuales permitieron representar de manera consistente la geometría del cuerpo de la presa, la cimentación y la disposición de la pantalla de impermeabilización utilizada en el modelamiento hidráulico.

El análisis de filtraciones se realizó mediante el software SLIDE, el cual resuelve el problema del flujo subterráneo empleando el método de los elementos finitos, permitiendo incorporar condiciones de frontera complejas y la determinación iterativa de superficies libres. Estas capacidades lo hacen adecuado para el análisis de filtraciones en presas cimentadas sobre macizos rocosos fracturados, como el caso de la represa Ancascococha.

Los resultados obtenidos del modelamiento numérico fueron contrastados con los criterios y rangos recomendados por el U.S. Army Corps of Engineers (USACE, 1993; 2017), particularmente en lo referente a gradientes hidráulicos admisibles y comportamiento esperado del flujo bajo presas. Asimismo, se verificó la coherencia de los resultados mediante análisis de sensibilidad, evaluando la influencia de la variación de la profundidad de la pantalla de impermeabilización.

### **3.3. EVALUACION TECNICA Y FACTIBILIDAD**

#### **3.3.1. Caracterización geotécnica del macizo rocoso**

##### **3.3.1.1. Perforaciones diamantinas**

###### **3.3.1.1.1 Sondaje de perforación PPA-01**

La perforación PPA-01 se encuentra ubicada en el talud izquierdo de la presa, esta perforación tuvo una profundidad final perforada de 15.0 m, inclinada 70°, muestra un grado de alteración hasta los 0.9m de profundidad conformado por: Roca ígnea intrusiva Diorita de color gris oscuro, textura fanerítica de grano medio, de 0.00 m a 0.60 m presenta un fracturamiento fuerte por exposición a la superficie. A partir 0.90 m presenta un fracturamiento moderado a leve con relleno en las fracturas de minerales de alteración como la calcita y clorita de 0.1 a 1mm. Presenta relleno blando y una familia de discontinuidad paralela.

###### **3.3.1.1.2 Sondaje de perforación PPA-02**

La perforación PPA-02 se encuentra ubicada en el centro de la presa lado izquierdo de la presa, esta perforación tuvo una profundidad final perforada de 25.0 m, inclinada 70°, de 0.0 hasta los 2.90 m muestra una roca ígnea intrusiva Diorita de color gris oscuro, textura fanerítica de grano medio, presenta fracturamiento moderado a fuerte con relleno en las fracturas de minerales de alteración (calcita) de 0.1 a 1 mm. Presenta relleno blando. A partir de los 2.90 m en adelante continua la roca ígnea intrusiva Diorita de color gris oscuro, textura fanerítica de grano medio, presenta fracturamiento moderado a leve con relleno en las fracturas de minerales de alteración como la calcita y clorita de 0.1 a 1 mm. Presenta relleno blando y una discontinuidad paralela.

###### **3.3.1.1.3 Sondaje de perforación PPA-03**

La perforación PPA-03 se encuentra ubicada en el centro de la presa lado derecho, esta perforación tuvo una profundidad final perforada de 25.0m, inclinada 70°, desde los 0.00m hasta los 3.00 muestra la roca ígnea intrusiva

Diorita de color gris oscuro, textura fanerítica media, presenta fracturamiento fuerte con relleno en las fracturas de minerales de alteración (calcita) de 1 a 2 mm. Presenta relleno blando. A partir de los 3.00m muestra a la roca ígnea intrusiva Diorita de color gris oscuro, textura fanerítica (granular) de grano medio, presenta fracturamiento fuerte con relleno en las fracturas de minerales de alteración como la calcita de 1 a 2 mm. A partir de 4.10 m a 5.00 m Roca masiva con fracturamiento leve.

#### **3.3.1.1.4 Sondaje de perforación PPA-04**

La perforación PPA-04 se encuentra ubicada en el talud derecho de la presa, esta perforación tuvo una profundidad final perforada de 15.0m, inclinada 70°, de 0.00 hasta los 1.20m muestra roca ígnea intrusiva Diorita de color gris oscuro, textura fanerítica de grano medio, presenta fracturamiento moderado a leve con relleno en las fracturas de minerales de alteración como la calcita y clorita de 0.1 a 1 mm. Presenta relleno blando y una familia de discontinuidad paralela desde los 1.20 muestra a la roca ígnea intrusiva Diorita de color gris oscuro, textura fanerítica de grano medio, presenta fracturamiento moderado a leve con relleno en las fracturas de minerales de alteración como la calcita y clorita de 0.1 a 1 mm. Presenta relleno blando y una familia de discontinuidad paralela.

#### **3.3.1.1.5 Clasificación del macizo rocoso - RMR**

Los registros de perforación diamantina presentan valores de RMR básico calculados por tramos, los cuales reflejan variaciones locales en la calidad del macizo rocoso. No obstante, dado que la clasificación RMR fue concebida para representar el comportamiento global del macizo y no condiciones puntuales, en la presente tesis se adopta un único valor de RMR representativo para la cimentación de la presa.

Dicho valor se estimó mediante la integración de los resultados correspondientes a los sondeos PPA-01, PPA-02, PPA-03 y PPA-04, resultando

un macizo rocoso de calidad media (Clase III), con un RMR representativo del orden de 50.

$$RMR = 50 \text{ (CLASE III – roca de calidad media)}$$

### 3.3.1.2. Condición de permeabilidad y coeficiente de permeabilidad equivalente eje de presa

En total se ejecutaron 15 ensayos Lugeon, distribuidos en las cuatro perforaciones, determinándose las unidades Lugeon y coeficientes de permeabilidad equivalentes:

Para interpretar la condición del terreno y patrones de flujo se aplicó las siguientes tablas de Houlsby, 1976.

**Tabla 6**

*Condición del terreno según el valor de la unidad Lugeon.*

<i>Condición del terreno según el valor de la unidad Lugeon</i>
0-1 Muy favorable
1-3 Favorable
3-10 Desfavorable
> 10 Muy desfavorable

Nota: (Houlsby,1976).

Los resultados de los ensayos de permeabilidad tipo Lugeon evidencian un comportamiento hidráulico heterogéneo del macizo rocoso de cimentación, caracterizado por valores elevados de permeabilidad en los primeros metros de profundidad y una disminución progresiva con la profundidad. En los sondeos PPA-01 a PPA-04 se identificaron zonas con condiciones desfavorables, principalmente entre los 2 y 10 m de profundidad, asociadas a mayores grados de fracturamiento y conectividad hidráulica, con valores de permeabilidad del orden

de  $10^{-4}$  cm/s. A partir de profundidades mayores, predominan condiciones favorables a muy favorables, con coeficientes de permeabilidad del orden de  $10^{-5}$  a  $10^{-6}$  cm/s, lo que indica una mejora progresiva de la calidad hidráulica del macizo rocoso.

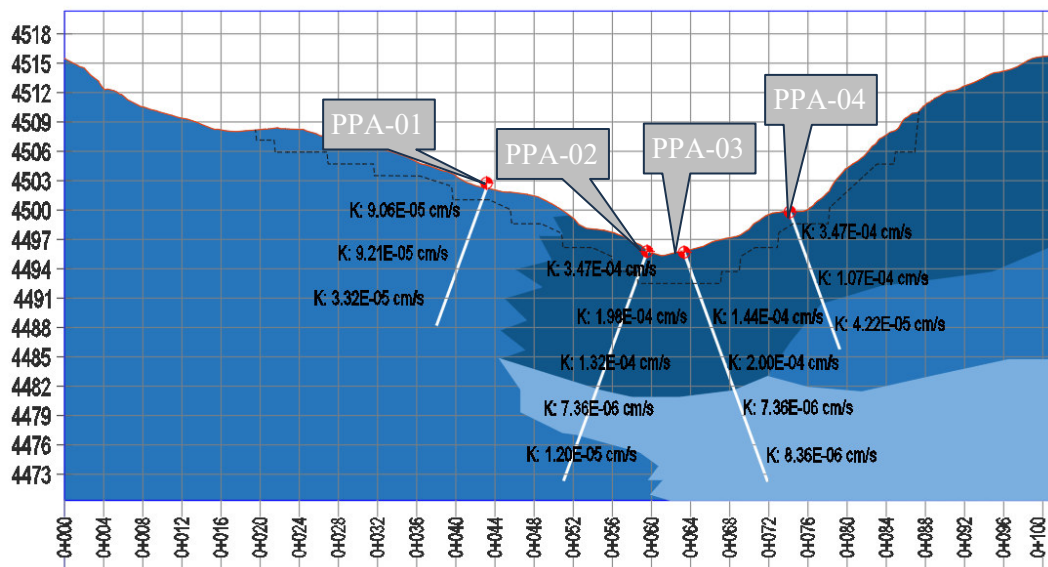
**Tabla 7**  
*Ensayos Lugeon y coeficiente de permeabilidad equivalente.*

<i>Perforación</i>	<i>Profundidad de ensayo</i>	<i>Unidad Lugeon (UL)</i>	<i>Coefficiente permeabilidad equivalente (cm/s)</i>	<i>Condición de Lugeon</i>
PPA-01	2.0	1.69 UL	$9.06 \cdot 10^{-5}$	Favorable
	5.0	1.59 UL	$9.21 \cdot 10^{-5}$	Favorable
	10.0	0.57 UL	$3.32 \cdot 10^{-5}$	Muy favorable
PPA-02	2	6.45 UL	$3.47 \cdot 10^{-4}$	Desfavorable
	5	3.41 UL	$1.98 \cdot 10^{-4}$	Desfavorable
	10	2.27 UL	$1.32 \cdot 10^{-4}$	Favorable
	15	0.13 UL	$7.36 \cdot 10^{-6}$	Muy Favorable
	20	0.21 UL	$1.20 \cdot 10^{-5}$	Muy favorable
PPA-03	5	2.48 UL	$1.44 \cdot 10^{-4}$	Favorable
	10	3.45 UL	$2.00 \cdot 10^{-4}$	Desfavorable
	15	0.13 UL	$7.36 \cdot 10^{-6}$	Muy favorable
	20	0.14 UL	$8.36 \cdot 10^{-6}$	Muy favorable
PPA-04	2	6.45 UL	$3.47 \cdot 10^{-4}$	Desfavorable
	5	1.84 UL	$1.07 \cdot 10^{-4}$	Favorable
	10	0.73 UL	$4.22 \cdot 10^{-5}$	Muy favorable

Nota: (Estudio geotecnico,2025).

**Figura 14**

*Sección geotécnica con propiedades hidráulicas del macizo.*



Los valores de permeabilidad equivalente obtenidos a partir de los ensayos Lugeon en el eje de presa evidencian un macizo rocoso con permeabilidades bajas a moderadas, predominando condiciones favorables a muy favorables según la clasificación en unidades Lugeon. Este comportamiento es característico de macizos rocosos moderadamente fracturados, en los cuales la permeabilidad está controlada principalmente por la conectividad y apertura de discontinuidades, más que por la matriz rocosa intacta (U.S. Army Corps of Engineers, 1993).

De acuerdo con Houlsby (1976) y Weaver y Bruce (2007), macizos que presentan valores inferiores a aproximadamente 5 UL son, en general, groutables, siendo posible reducir de manera efectiva la permeabilidad mediante inyecciones de lechada de cemento orientadas a interrumpir las trayectorias preferenciales de flujo. En este contexto, la finalidad del tratamiento no es la obturación total del macizo, sino la reducción de la conductividad hidráulica equivalente hasta niveles compatibles con los criterios de eficiencia del almacenamiento y seguridad hidráulica de la presa.

Asimismo, la tendencia observada de disminución progresiva del coeficiente de permeabilidad equivalente con la profundidad resulta coherente con la reducción del grado de fracturamiento del macizo rocoso, lo que, valida el empleo de pantallas de impermeabilización de ancho efectivo moderado, diseñadas en función de criterios hidráulicos y no únicamente geométricos. Este enfoque es consistente con las recomendaciones del U.S. Army Corps of Engineers (1993), que señalan que, para permeabilidades del orden de  $10^{-4}$  a  $10^{-5}$  cm/s, el control de filtraciones puede lograrse mediante pantallas continuas adecuadamente ejecutadas, sin requerir tratamientos excesivos.

### 3.3.2. Resultados de laboratorio de la matriz rocosa

Los resultados de los ensayos realizados a las muestras de roca se presentan en la siguiente tabla:

**Tabla 8**

*Resultados de ensayos de laboratorio.*

<i>Perforación</i>	<i>Profundidad</i>	<i>Ensayo</i>	<i>Unidad</i>	<i>Resultado</i>
PPA-02	3.10 – 3.85	Compresión simple	kg/cm <sup>2</sup>	489.2
		Densidad	gr/cm <sup>3</sup>	2.6
		Porcentaje de vacíos	%	0.016
		Módulo de elasticidad	Mpa	84,857.80
		Relación de Poisson	-	0.3
PPA-03	3.50 – 4.80	Compresión simple	kg/cm <sup>2</sup>	954.1
		Densidad	gr/cm <sup>3</sup>	2.61
		Porcentaje de vacíos	%	0.022
		Módulo de elasticidad	-	40,909.10
		Relación de Poisson	Mpa	0.2

Nota: (Estudio geotecnico,2025).

Los resultados de los ensayos de laboratorio realizados sobre muestras representativas de la matriz rocosa evidencian un material denso, de baja porosidad y alta resistencia mecánica, característico de una roca ígnea intrusiva tipo diorita. Los valores de resistencia a compresión simple obtenidos, del orden de 489 a 954 kg/cm<sup>2</sup>, así como densidades cercanas a 2.6 g/cm<sup>3</sup> y porcentajes de vacíos inferiores al 0.03 %, indican una matriz rocosa competente y poco susceptible a procesos de degradación o reblandecimiento en presencia de agua.

Esta condición es consistente con la caracterización petrográfica del macizo, en la que no se identifican minerales arcillosos expansivos ni fases fácilmente alterables, descartándose comportamientos de colapso o pérdida significativa de resistencia inducidos por saturación. En consecuencia, se concluye que la permeabilidad del macizo rocoso en el eje de presa está controlada fundamentalmente por el sistema de fracturas, tal como lo reflejan los ensayos Lugeon, y no por la matriz rocosa intacta, lo cual es coherente con los criterios establecidos por el U.S. Army Corps of Engineers (1993) para presas cimentadas sobre macizos rocosos.

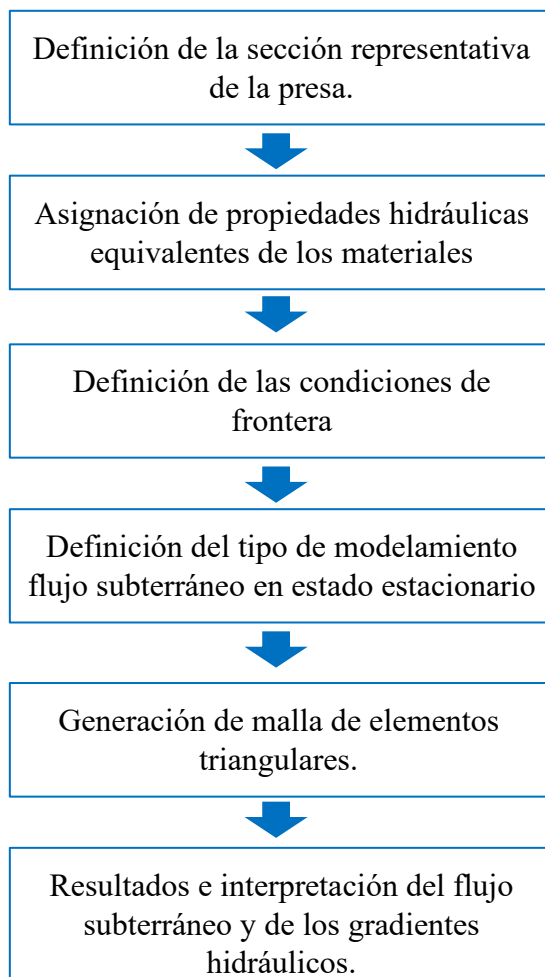
### **3.4. MODELADO HIDRAULICO**

#### **3.4.1. Modelamiento numérico de filtraciones - Slide**

El modelamiento numérico de las filtraciones bajo la represa Ancascococha se desarrolló con el objetivo de cuantificar los caudales de filtración y los gradientes hidráulicos generados en la cimentación, así como de evaluar el efecto hidráulico de la pantalla de impermeabilización propuesta, bajo distintas configuraciones geométricas.

**Figura 15**

*Modelamiento hidráulico del flujo bajo la presa en SLIDE.*



La figura anterior resume la secuencia metodológica seguida para el análisis del flujo subterráneo bajo la presa. En primer lugar, se define una sección transversal representativa, correspondiente a la sección crítica desde el punto de vista hidráulico, caracterizada por presentar la mayor altura de agua del embalse. Posteriormente, se asignan propiedades hidráulicas equivalentes a los materiales, obtenidas a partir de los ensayos de campo y laboratorio. Luego, se establecen las condiciones de frontera hidráulicas y se define el análisis de flujo subterráneo en estado estacionario. Finalmente, el dominio se discretiza mediante una malla de elementos triangulares de alta calidad, lo que permite obtener la distribución del flujo subterráneo y de los gradientes hidráulicos para su interpretación y evaluación del desempeño hidráulico de la presa.

En el modelamiento numérico de filtraciones, la pantalla de impermeabilización no se representa como una serie de perforaciones individuales, sino como una franja continua del macizo rocoso cuya conductividad hidráulica ha sido reducida significativamente como resultado del tratamiento de inyección. Este enfoque corresponde al concepto de ancho efectivo de la pantalla, el cual representa el volumen de roca realmente influenciado por la propagación del grout y que actúa como una barrera hidráulica equivalente en el análisis de flujo.

De acuerdo con la literatura especializada, la lechada de inyección no se distribuye de manera uniforme ni ilimitada en el macizo rocoso, sino que su alcance está controlado por la apertura, conectividad y persistencia de las discontinuidades, así como por las presiones de inyección aplicadas. En macizos rocosos fracturados, como la diorita presente en la cimentación de la represa Ancascococha, la zona de influencia efectiva del tratamiento suele limitarse a unos pocos metros alrededor del eje de los taladros, siendo poco realista asumir mejoras homogéneas en volúmenes mayores (USACE, 1993; USACE, 2017; Weaver & Bruce, 2007).

Estudios recientes sobre el diseño de cortinas de inyección bajo presas, como el desarrollado por Zhang et al. (2021), tratan la cortina como un elemento estructural del sistema presa–cimentación, cuyo diseño requiere definir explícitamente su posición, profundidad y espesor (thickness). En dicho estudio, el espesor de la cortina no se concibe como una barrera geométrica sólida, sino como el resultado del traslape del grout inyectado desde perforaciones adyacentes, el cual define una zona tratada de permeabilidad reducida. En el ejemplo de diseño presentado por los autores, un espesor del orden de 3 m resulta óptimo al satisfacer simultáneamente los criterios de conductividad hidráulica residual admisible, control del gradiente hidráulico y reducción de la fuerza de levantamiento.

En el presente estudio, se adopta un ancho efectivo de pantalla de 2.0 m, del mismo orden de magnitud, empleando deliberadamente un valor conservador, con el fin de evitar la sobreestimación de la eficiencia hidráulica del tratamiento de inyección.

Respecto al cuerpo de presa de concreto, los manuales del U.S. Army Corps of Engineers lo consideran un elemento esencialmente impermeable desde el punto de vista hidráulico, concentrándose el análisis de filtraciones en la fundación y los estribos. En consecuencia, para efectos del modelamiento numérico, el concreto se representa mediante un coeficiente de permeabilidad muy bajo, del orden de  $10^{-7}$  cm/s, valor que no controla el flujo del sistema y permite una adecuada estabilidad numérica del modelo (USACE, 1993; 1995).

La cortina de impermeabilización se modela como una zona de conductividad hidráulica reducida respecto al macizo rocoso original. Diversos autores señalan que los tratamientos de inyección permiten reducir la permeabilidad del macizo en uno a dos órdenes de magnitud; en consecuencia, para el presente estudio se adopta para la pantalla de impermeabilización un coeficiente de permeabilidad del orden de  $10^{-6}$  cm/s, valor representativo de una reducción significativa pero realista de la permeabilidad del macizo rocoso (USACE, 1993; USACE, 2017; Weaver & Bruce, 2007).

Respecto a las condiciones de frontera del modelo, es necesario aclarar que el Nivel Máximo de Agua del Embalse (NAME) no se define en el marco del modelamiento hidráulico de filtraciones, sino que responde a los criterios de balance hidrológico del proyecto. En el presente estudio, el NAME se adopta únicamente como un dato de entrada para el análisis de filtraciones, actuando como condición de frontera hidráulica aguas arriba.

La tabla siguiente resume los parámetros hidráulicos y geométricos adoptados para el modelamiento numérico, los cuales constituyen los datos de entrada empleados en los diferentes escenarios de análisis.

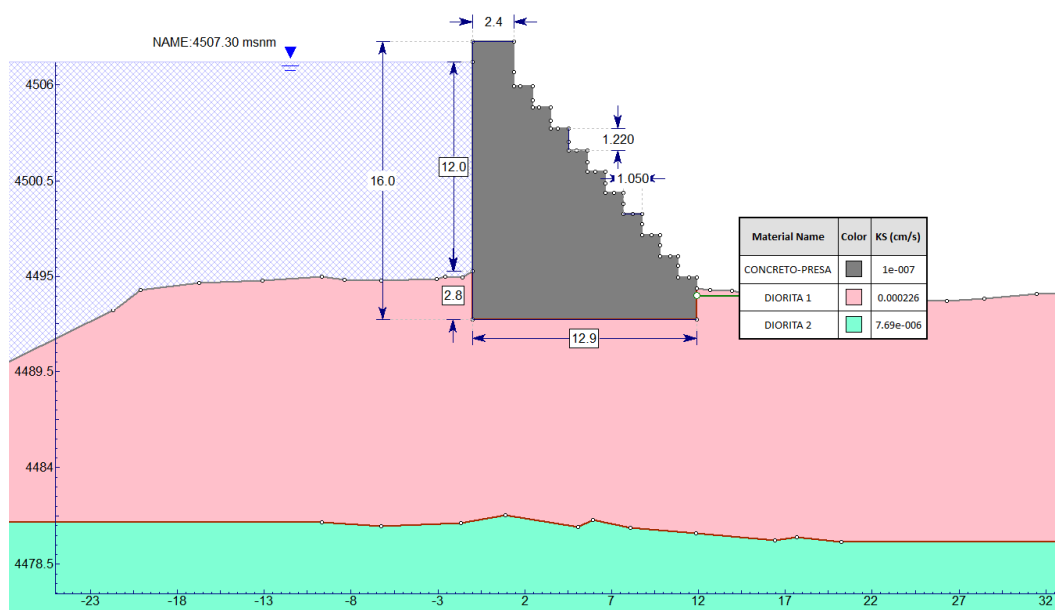
**Tabla 9**

*Parámetros hidráulicos y geométricos adoptados para el modelamiento.*

<i>Elemento</i>	<i><math>k_e</math> (cm/s)</i>	<i>Ancho efectivo</i>	<i>Definición de geometría</i>
Macizo rocoso	$2.11 \times 10^{-4}$	-	Geometría definida a partir del modelo geológico-geotécnico
Pantalla de impermeabilización	$10^{-6}$	2m	Geometría definida por el diseño hidráulico de la cortina
Cuerpo de presa de concreto	$10^{-7}$	-	Geometría definida por el modelamiento estructural de la presa; comportamiento evaluado hidráulicamente

**Figura 16**

*Perfil de permeabilidades eje de cerrada.*



### 3.4.2. Criterios de diseño de la pantalla

El diseño de la pantalla de impermeabilización se rige por criterios hidráulicos y geotécnicos previamente establecidos, los cuales constituyen las condiciones de aceptación que deben cumplirse durante el proceso de verificación y optimización del diseño. Estos criterios permiten evaluar la eficacia de la pantalla propuesta y garantizar condiciones hidráulicamente estables en la cimentación de la presa.

#### 3.4.2.1. Criterios geotécnicos

**Compatibilidad con el macizo rocoso:** la geometría de la pantalla deberá ser consistente con las condiciones geomecánicas del macizo de cimentación, evitando profundidades innecesarias en zonas de roca competente.

**Continuidad hidráulica:** la pantalla deberá interceptar de manera efectiva las zonas de mayor permeabilidad identificadas, garantizando la continuidad del elemento impermeable a lo largo del eje de la presa.

#### 3.4.2.2. Criterios hidráulicos

**Eficiencia del almacenamiento:** Las pérdidas por filtración deberán ser iguales o menores al umbral admisible definido para el proyecto, expresadas como porcentaje del volumen útil del embalse.

El criterio de control de pérdidas por filtración respecto al volumen útil del embalse no se adopta como un parámetro normativo rígido, sino como un criterio hidráulico–operacional ampliamente utilizado en la práctica del diseño y evaluación de presas, dado que pérdidas excesivas comprometen la función primaria de almacenamiento y la seguridad hidráulica de la estructura.

Relación pérdidas por filtración / volumen útil del embalse

$$\frac{Q_{infil}}{V_u} \leq 5\%$$

Qinfil es el caudal total de infiltración que atraviesa el sistema presacimentación bajo una condición hidráulica dada, obtenido a partir del análisis numérico de filtraciones y correspondiente a la descarga integrada a lo largo del dominio modelado, el cual puede expresarse en términos de caudal instantáneo ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) o como volumen equivalente para un periodo de referencia ( $\text{m}^3/\text{día}$  o MMC/año).

Control del gradiente hidráulico: El gradiente hidráulico máximo desarrollado en el macizo rocoso deberá ser compatible con la calidad geomecánica del macizo, evaluada mediante el índice RMR.

Seguridad hidráulica frente al gradiente: Se deberá cumplir un factor de seguridad hidráulica frente al gradiente, definido como:

$$FS_h = \frac{i_{adm}}{i_{max}}, \text{ con } FS_h \geq 2.0.$$

$FS_h$ : Factor de seguridad hidráulica frente al gradiente

$i_{adm}$ : Gradiente hidráulico admisible del macizo rocoso

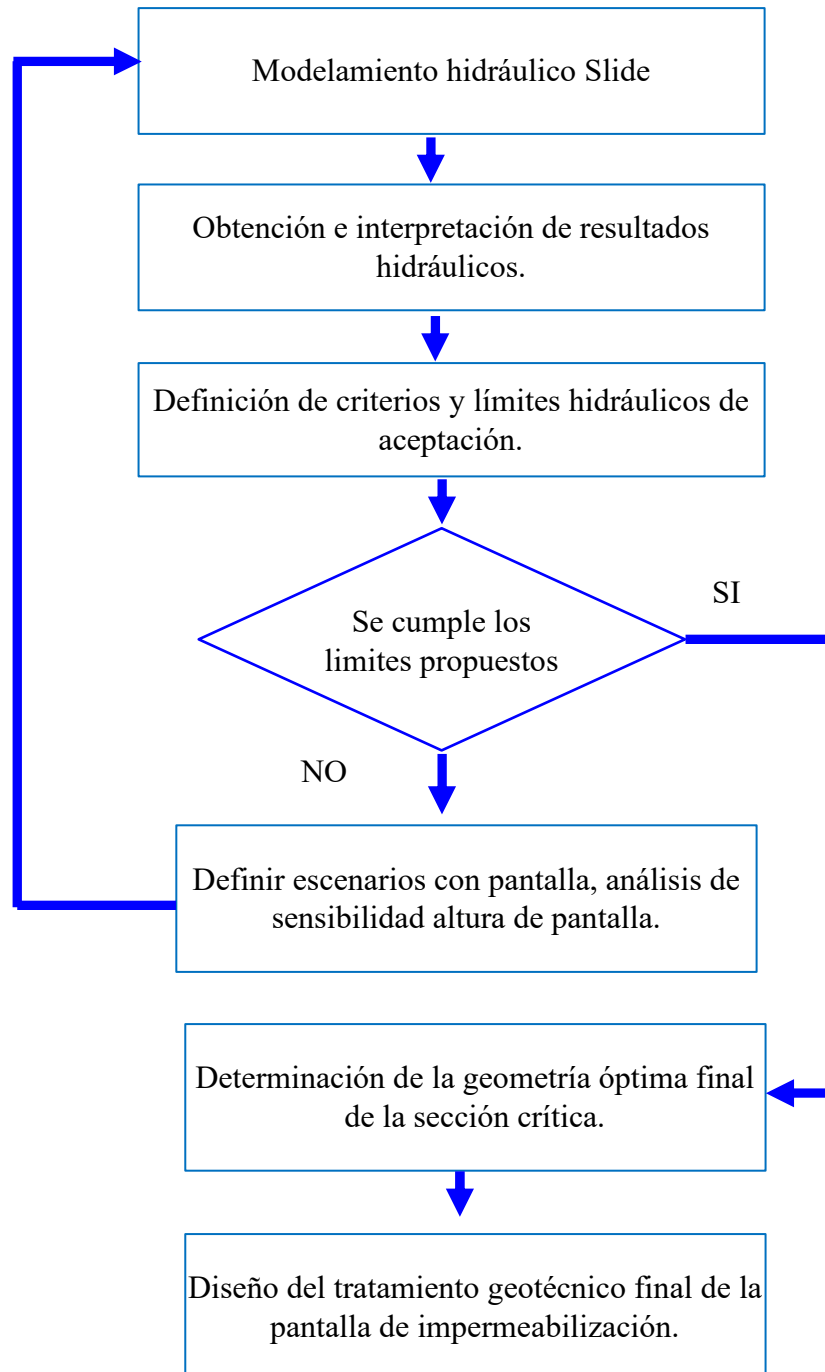
$i_{max}$ : gradiente hidráulico máximo desarrollado en la cimentación de la presa bajo la condición hidráulica analizada, obtenido a partir del modelamiento numérico del flujo subterráneo

### 3.4.3. Análisis de sensibilidad y/o escenarios

Optimización geométrica: La altura final de la pantalla se definirá mediante un proceso iterativo de verificación, seleccionando la mínima altura que permita cumplir simultáneamente los criterios de eficiencia de almacenamiento y estabilidad hidráulica.

**Figura 17**

*Metodología para la determinación de la altura óptima de la pantalla de impermeabilización.*



La metodología presentada en la figura anterior permite determinar de manera racional la altura óptima de la pantalla de impermeabilización, mediante un proceso iterativo basado en el análisis de sensibilidad hidráulica. La altura de la pantalla se incrementa progresivamente hasta que los caudales de filtración y los gradientes hidráulicos obtenidos del modelamiento numérico cumplen con los criterios de aceptación establecidos. La altura óptima se define como aquella a partir de la cual incrementos adicionales de profundidad no generan reducciones significativas en los parámetros hidráulicos evaluados.

#### **3.4.4. Simulación de impacto ambiental**

Durante la etapa constructiva, las principales fuentes de impacto temporal están asociadas a la movilización de maquinaria, ejecución de perforaciones, inyecciones de cemento y transporte de materiales. Estos impactos se consideran moderados y reversibles, al desarrollarse en un área definida y durante un periodo limitado de tiempo. Las medidas de control previstas, tales como el riego de vías de acceso, la gestión de materiales excedentes y la implementación de seguridad en obra, contribuyen a minimizar la generación de polvo, ruido y afectación al entorno inmediato.

Respecto al impacto ambiental, el presente estudio se fundamenta en el uso racional y sostenible del recurso hídrico, integrando soluciones de ingeniería orientadas a garantizar la seguridad estructural de la presa, la eficiencia hidráulica del sistema de almacenamiento y la resiliencia frente a la variabilidad climática. En el distrito de Challhuahuacho, la actividad agrícola depende en gran medida de las precipitaciones estacionales, lo que genera una alta vulnerabilidad frente a sequías recurrentes y periodos de estrés hídrico. En este contexto, la reducción de pérdidas por filtración y la mejora del control hidráulico del embalse constituyen un impacto ambiental positivo, al asegurar una mayor disponibilidad de agua durante la época de estiaje, contribuyendo a la estabilidad productiva local sin incrementar la presión sobre las fuentes naturales de agua.

En consecuencia, el diseño optimizado de la pantalla de impermeabilización no solo responde a criterios hidráulicos y geotécnicos, sino que se constituye en una medida de adaptación frente a la variabilidad climática, al mejorar la confiabilidad del almacenamiento hídrico en una zona con marcada estacionalidad de precipitaciones.

### 3.5. PLANIFICACIÓN Y EJECUCIÓN

#### 3.5.1. Cronograma de actividades

**Tabla 10**

*Cronograma de actividades de ejecución de la investigación.*

Nº	Actividades.	Tiempo (meses) 2025-2026						
		O	N	D	E	F	M	A
1.	<b><i>Planificación del plan de investigación.</i></b>							
1.1	Planteamiento del problema.	X						
1.2	Marco teórico.	X						
1.3	Diseño metodológico.	X						
1.4	Presentación del plan de investigación.	X						
2.	<b><i>Autorización de ejecución.</i></b>							
2.1	Presentación a Dirección de Investigación de la EPG.	X						
2.2	Aprobación.		X					
3.	<b><i>Ejecución del proyecto de investigación.</i></b>							
3.1	Preparación de instrumentos.		X					
3.2	Validación de instrumentos.		X					
3.3	Selección de muestras.			X				
3.4	Toma de datos de campos.			X				
3.5	Procesamiento de información secundaria.			X				
3.6	Sistematización y organización de datos.				X			
3.7	Análisis e interpretación de datos.					X		
4.	<b><i>Redacción de la tesis.</i></b>							
4.1	Redacción del informe.						X	
4.2	Redacción del artículo de investigación.						X	
4.3	Conclusiones y sugerencias.						X	
4.4	Sustentación							X

En la tabla anterior se presenta el cronograma de actividades correspondiente al desarrollo de la investigación, estructurado en función de las fases de planificación, ejecución y redacción de la tesis. Este cronograma permite organizar de manera sistemática las actividades necesarias para el cumplimiento de los objetivos de la investigación, garantizando la coherencia temporal entre la recopilación de información, el análisis de datos y la elaboración del informe final

### **3.5.2. Asignación de recursos**

Para el desarrollo del presente estudio se contó con acceso directo a la información técnica del proyecto, incluyendo planos, memorias descriptivas y antecedentes de obra, lo que permitió realizar un análisis detallado y consistente del comportamiento hidráulico de la cimentación. Asimismo, la investigación se sustentó en información generada durante la ejecución de la campaña geotécnica propuesta, la cual incluyó perforaciones diamantinas y ensayos geotécnicos orientados a caracterizar la roca de cimentación en el eje de la presa Ancascococha. Esta disponibilidad de información técnica garantizó la confiabilidad de los datos empleados en el modelamiento del flujo subterráneo, la estimación de caudales de filtración y la evaluación del gradiente hidráulico, permitiendo sustentar técnicamente el dimensionamiento óptimo de la pantalla de impermeabilización.

### **3.5.3. Costos y financiamiento**

A continuación, se presenta tabla donde se detalla los gastos reales incurridos durante la ejecución de la investigación, incluyendo recursos humanos, materiales, servicios y logística necesarios para el desarrollo del estudio. Estos costos están asociados exclusivamente a la elaboración de la tesis y al procesamiento de la información técnica empleada. El financiamiento del presente estudio fue asumido con recursos propios del investigador, garantizando la disponibilidad de los medios necesarios para el cumplimiento de los objetivos planteados.

**Tabla 11***Costos a precios reales de la ejecución de la investigación.*

<b>Rubro</b>	<b>Unidad de medida</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio unitario (S/.)</b>	<b>Precio subtotal (S/.)</b>
<b>1. Personal</b>				
-Personal de apoyo.	Mes	06	360.00	2160.00
<b>2. Material y Equipo</b>				
-Lapiceros.	Und.	12	2.00	24.00
-Papel bond 80g. A4.	Millar	02	26.00	52.00
-Folder.	Und.	24	0.50	12.00
-Tinta de impresora.	Und.	01	240.00	240.00
-Fotocopiado de hojas.	Ciento	04	10.00	40.00
-USB (16 GB).	Und	01	40.00	40.00
-Computadora portátil.	Und.	01	3000.00	3000.00
-Impresora	Und.	01	500.00	500.00
-Textos.	Und.	06	80.00	480.00
-Artículos digitales.	Und.	05	105.00	525.00
<b>3. Servicios</b>				
-Internet. (horas)	Hrs.	30	1.00	30.00
-Impresión informe.	Und.	06	8.00	48.00
-Tipeo de proyecto.	Und.	01	40.00	40.00
-Tipeo de gráficos.	Und.	01	80.00	80.00
<b>4. Otros</b>				
-Pasajes y refrigerios.	Glb.	01	2000.00	2000.00
			Total, S/=	9271.00

## CAPITULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

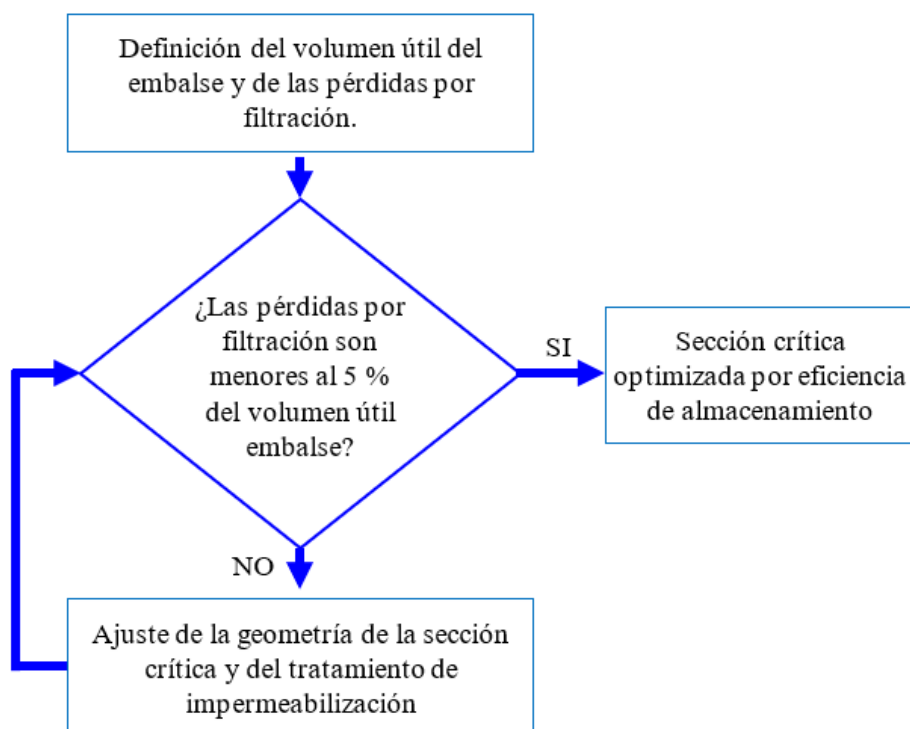
### 4.1. DESARROLLO DEL PROYECTO Y VALIDACION DEL DISEÑO

#### 4.1.1. Procedimiento conceptual

En este capítulo analizaremos y discutiremos los resultados del modelamiento numérico del flujo subterráneo del sistema cimentación, represa y pantalla de impermeabilización, dichos resultados obtenidos se interpretan en función de dos criterios fundamentales: *la eficiencia del almacenamiento* del embalse, evaluada a partir de los caudales de filtración, y *la estabilidad hidráulica de la presa*, analizada mediante la distribución de los gradientes hidráulicos en la cimentación.

#### Figura 18

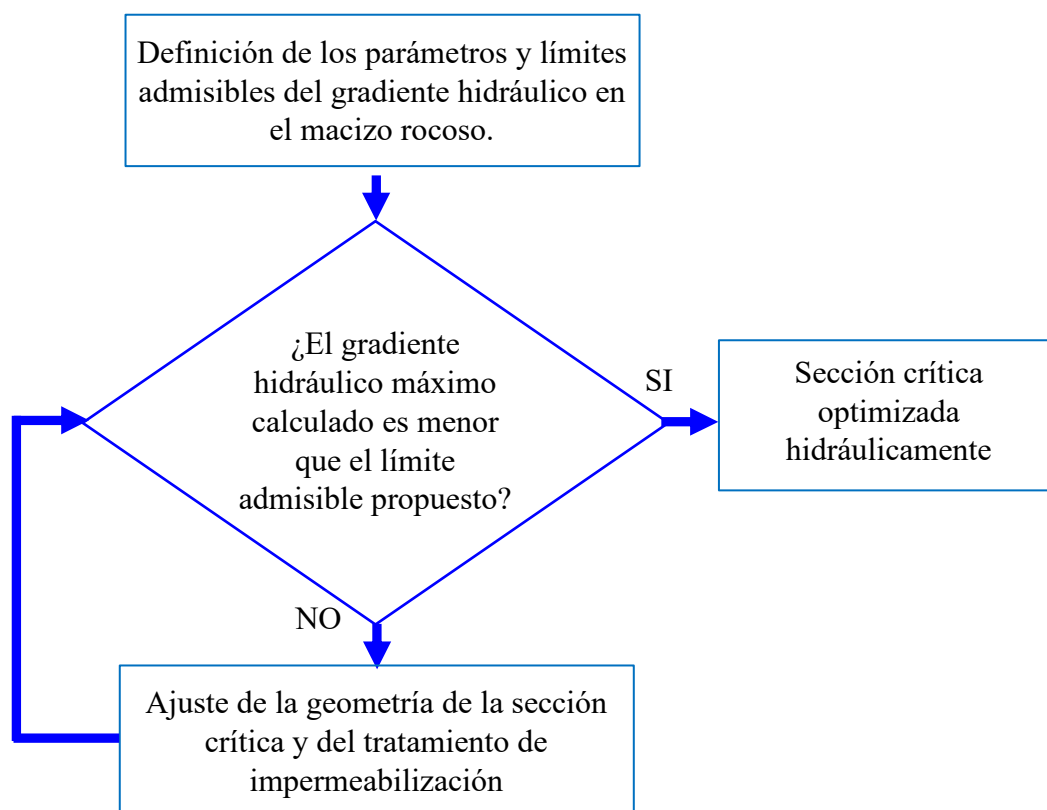
*Verificación de la eficiencia de almacenamiento considerando pérdidas por filtración.*



El valor de referencia del 5 % de pérdidas por filtración se adopta como un criterio de eficiencia hidráulica del almacenamiento, empleado con fines de evaluación comparativa, y no como un límite normativo estricto.

**Figura 19**

*Verificación de la estabilidad hidráulica en función del gradiente hidráulico.*



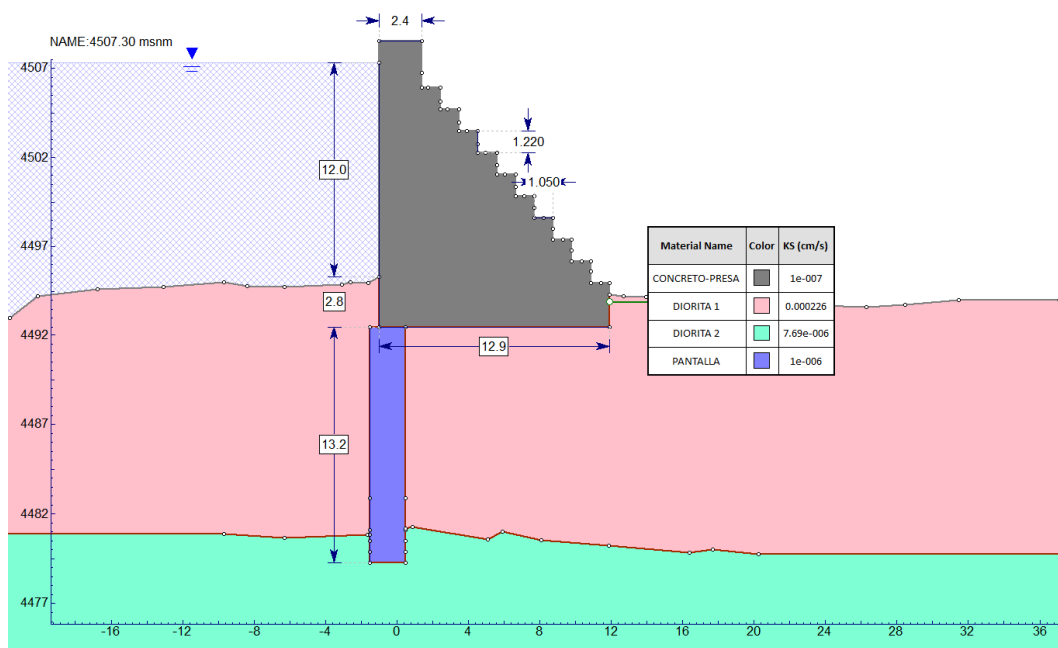
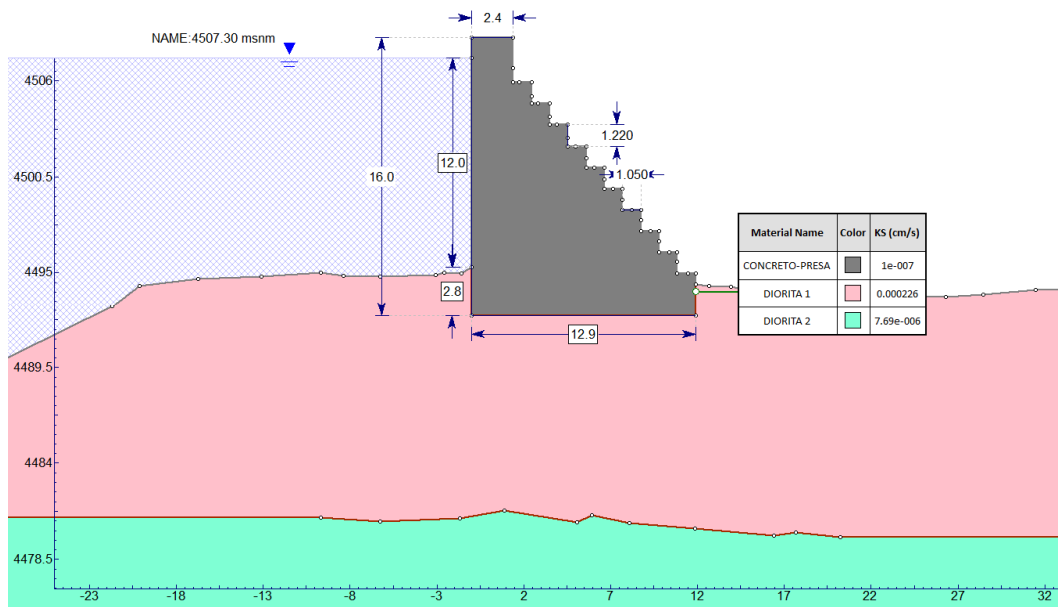
La estabilidad hidráulica se evalúa mediante la comparación entre el gradiente hidráulico máximo obtenido del modelamiento numérico y los valores admisibles definidos para el macizo rocoso, con el fin de evitar fenómenos de erosión interna o inestabilidad hidráulica en la cimentación.

#### 4.1.2. Escenarios de análisis

Con la finalidad de evaluar el comportamiento hidráulico del sistema presa–cimentación y cuantificar el efecto de la pantalla de impermeabilización en la reducción de las pérdidas por filtración, se definieron escenarios de análisis. En todos los casos se mantuvieron constantes la geometría del cuerpo, las propiedades hidráulicas del macizo rocoso, el NAME y las condiciones de frontera hidráulicas. La única variable considerada corresponde a la presencia y profundidad de la pantalla de impermeabilización, lo que permite realizar una comparación directa entre escenarios.

**Figura 20**

*Definición de modelo - escenario sin y con pantalla.*



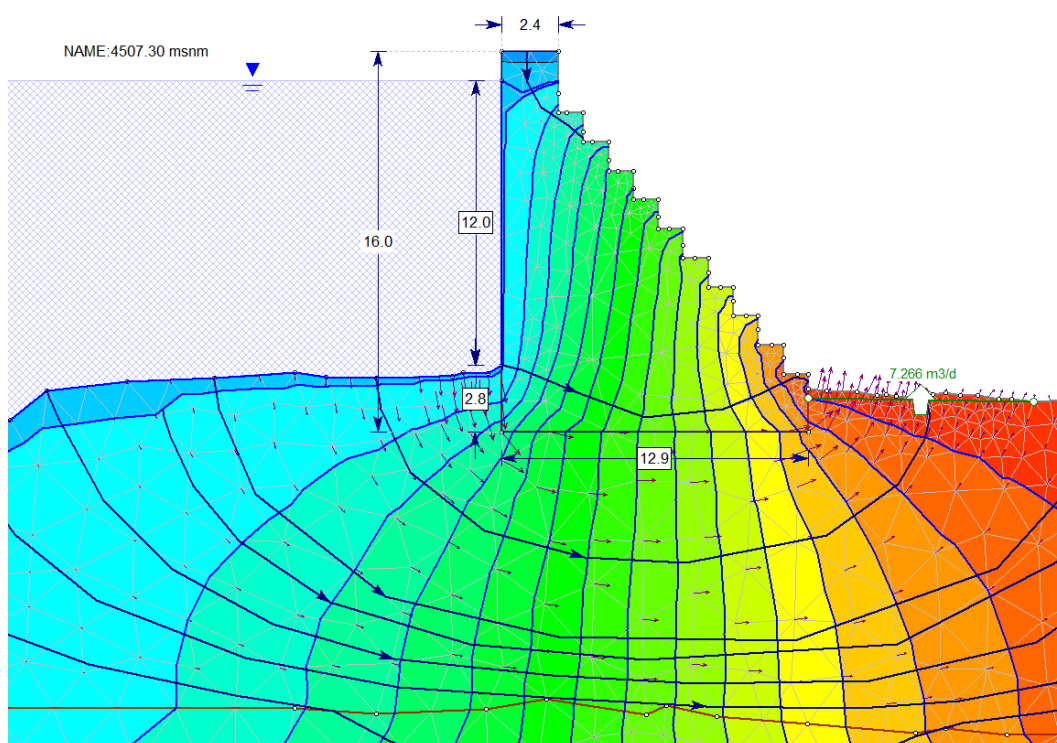
#### 4.1.2.1. Escenario sin pantalla

El escenario sin pantalla de impermeabilización representa la condición base del análisis y corresponde a la situación en la cual el flujo subterráneo se

desarrolla directamente a través del macizo rocoso de cimentación, sin ningún tratamiento de control hidráulico. Este escenario permite evaluar el comportamiento del flujo bajo la presa y verificar la magnitud de las pérdidas por filtración en ausencia de medidas de impermeabilización.

### Figura 21

*Discretización de sección de presa, situación sin cortina impermeable para determinar red de flujo interno y caudal de infiltración.*



En la práctica ingenieril, para la estimación de los caudales totales de filtración bajo presas, es habitual adoptar como longitud de cálculo el ancho de la corona o del eje de la presa. Si bien esta aproximación no reproduce de manera exacta la distribución tridimensional real del flujo subterráneo, se emplea deliberadamente como un criterio conservador, con el objetivo de evaluar las condiciones hidráulicas más desfavorables y, de este modo, introducir un mayor margen de seguridad en el análisis.

En el presente estudio, el caudal unitario de filtración por metro lineal ( $\text{m}^3/\text{día}\cdot\text{m}$ ) se obtiene a partir de una sección transversal crítica del eje de la presa, donde se desarrollan los mayores gradientes hidráulicos. La extrapolación de dicho caudal unitario a lo largo de los 67 m correspondientes al eje de la presa permite estimar un caudal total de filtración representativo del escenario más desfavorable.

Los resultados obtenidos del modelamiento hidráulico se resumen en la siguiente, donde se presenta el caudal unitario de filtración, el volumen anual de pérdidas y su relación con el volumen útil del embalse.

Tabla 12

*Porcentaje de infiltración y eficiencia de almacenamiento (Sin pantalla).*

<i>Long. Calculo (m)</i>	<i>Q<sub>infil.</sub> (m<sup>3</sup>/día/m)</i>	<i>V<sub>infil.</sub> (MMC/año)</i>	<i>Vol. presa (MMC)</i>	<i>V<sub>infil</sub> / Vol. Presa (%)</i>	<i>Filtraciones</i>
67	7.266	0.178	0.881	20.2	mayor 5%

El modelamiento numérico se realizó considerando el estado más desfavorable, correspondiente a la condición de presa llena durante todo el año. Los resultados indican un caudal de filtración significativo, que se traduce en una pérdida anual equivalente al 20.2 % del volumen útil del embalse, valor que supera ampliamente el criterio de eficiencia hidráulica adoptado ( $\leq 5\%$ ).

En consecuencia, el escenario sin pantalla de impermeabilización resulta hidráulicamente inaceptable, ya que las pérdidas por filtración comprometen la eficiencia del almacenamiento del embalse. Este escenario confirma la necesidad técnica de implementar una pantalla de impermeabilización en la cimentación de la presa.

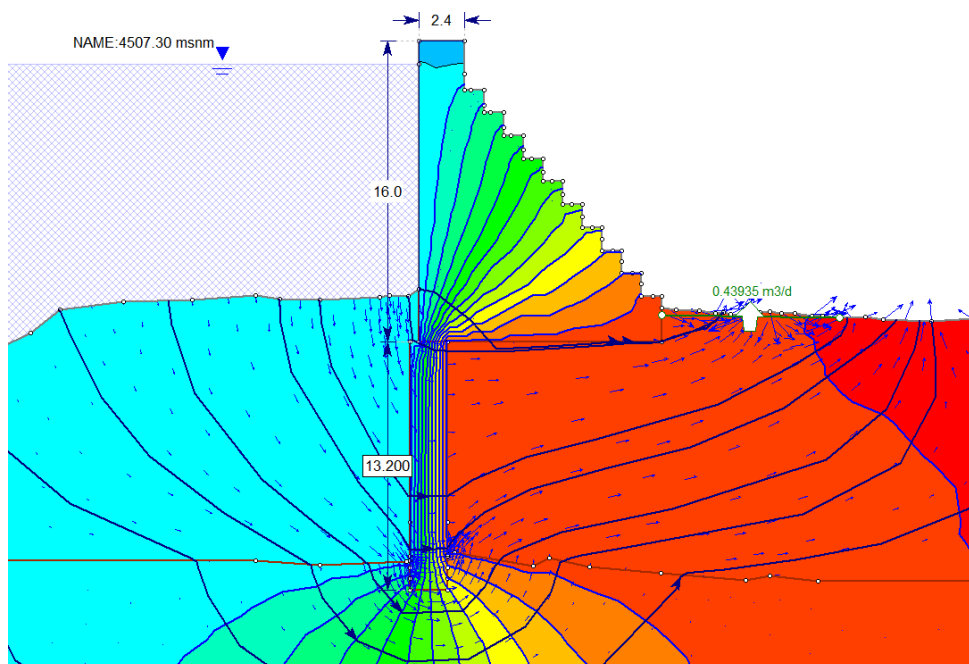
#### 4.1.2.2. Escenarios con pantalla, caudales de filtración revisión de la eficiencia de almacenamiento

Visto que el escenario sin pantalla de impermeabilización resulta hidráulicamente inaceptable, se hace necesario evaluar alternativas de control de filtraciones mediante la implementación de una pantalla de impermeabilización. En este contexto, la práctica ingenieril recomienda analizar diferentes profundidades de pantalla, usualmente comprendidas entre valores del orden de 0.8 a 1.5 veces la altura hidráulica del embalse, o hasta alcanzar simultáneamente los criterios de eficiencia en el almacenamiento y estabilidad hidráulica del macizo de cimentación.

En función de altura hidráulica del embalse de 12m, y siguiendo un criterio ingenieril coherente con la práctica habitual, se plantean múltiples escenarios de análisis considerando profundidades de pantalla de impermeabilización comprendidas entre  $0.80H_e$  y  $1.25 H_e$ , específicamente  $0.80H_e$ ,  $0.95H_e$ ,  $1.00H_e$ ,  $1.05H_e$ ,  $1.10H_e$ ,  $1.20H_e$  y  $1.25H_e$ .

#### Figura 22

*Resultados escenario con pantalla de impermeabilización, red de flujo interno y caudal de infiltración ( $1.10H_e$ ).*



La anterior figura muestra la sección crítica de la presa correspondiente a un escenario  $1.10H_e$ , utilizada para el modelamiento del flujo subterráneo y la determinación del caudal de filtración.

**Tabla 13**

*Porcentaje de infiltración y eficiencia de almacenamiento (con pantalla  $1.1H_e$ ).*

<i>Long. Calculo (m)</i>	<i>Q<sub>infil.</sub> (m<sup>3</sup>/día/m)</i>	<i>V<sub>infil.</sub> (MMC/año)</i>	<i>Vol. presa (MMC)</i>	<i>V<sub>infil.</sub> / Vol. Presa (%)</i>	<i>Filtraciones</i>
67	0.439	0.011	0.881	1.22%	menor a 5%

Este escenario permite evaluar la capacidad de una pantalla con profundidad equivalente a la altura hidráulica del embalse para reducir los caudales de filtración y los gradientes hidráulicos a niveles compatibles con los criterios de diseño adoptados. Los resultados del análisis hidráulico se resumen en la anterior, donde se observa que las pérdidas anuales por filtración representan el 1.22 % del volumen útil del embalse, valor inferior al límite del 5 % adoptado como criterio de eficiencia hidráulica.

En consecuencia, el escenario con pantalla de 13.20m cumple los requisitos mínimos de eficiencia de almacenamiento, constituyendo una solución técnicamente viable. No obstante, este escenario se considera un caso base de diseño, cuya idoneidad final debe contrastarse con escenarios de mayor profundidad que permitan evaluar márgenes adicionales de seguridad hidráulica.

Otros escenarios también analizados se tienen que  $0.80H_e$  ( $H_p = 9.6$  m) presenta un caudal unitario de filtración elevado, que se traduce en pérdidas anuales equivalentes al 9.37 % del volumen del embalse, superando el criterio de eficiencia hidráulica adoptado ( $\leq 5$  %) y resultando, por tanto, hidráulicamente inaceptable.

**Tabla 14**

*Porcentaje de infiltración y eficiencia de almacenamiento resumen de escenarios.*

<i>Escenarios</i>	<i>H<sub>p</sub></i> <i>(m)</i>	<i>Q<sub>infil.</sub></i> <i>(m<sup>3</sup>/día/m)</i>	<i>V<sub>infil.</sub></i> <i>(MMC/año)</i>	<i>V<sub>u</sub></i> <i>(MMC)</i>	<i>V<sub>infil.</sub> / Vol.</i> <i>Presa</i> <i>(%)</i>	<i>Filtraciones</i>
0.80H <sub>e</sub>	9.6	3.374	0.083	0.881	9.37%	mayor a 5%
0.95 H <sub>e</sub>	11.4	0.702	0.017	0.881	1.95%	menor a 5%
1.00 H <sub>e</sub>	12.0	0.512	0.013	0.881	1.42%	menor a 5%
1.05 H <sub>e</sub>	12.6	0.467	0.011	0.881	1.30%	menor a 5%
1.10 H <sub>e</sub>	13.2	0.439	0.011	0.881	1.22%	menor a 5%
1.20 H <sub>e</sub>	14.4	0.389	0.010	0.881	1.08%	menor a 5%
1.25 H <sub>e</sub>	15.0	0.386	0.009	0.881	1.07%	menor a 5%

A partir del escenario 0.95H<sub>e</sub> (H<sub>p</sub> = 11.4 m), las pérdidas por filtración se reducen por debajo del 5 %, cumpliendo el criterio de eficiencia de almacenamiento. En particular, los escenarios comprendidos entre 1.00H<sub>e</sub> y 1.25H<sub>e</sub> muestran una disminución gradual del porcentaje de infiltración, pasando de 1.42 % a 1.07 %, lo que indica una mejora marginal decreciente de la eficiencia hidráulica para incrementos sucesivos de la profundidad de la pantalla.

Estos resultados sugieren que profundidades de pantalla del orden de la altura hidráulica del embalse (H<sub>p</sub> ≈ H<sub>e</sub>) son suficientes para garantizar una adecuada eficiencia de almacenamiento. Incrementos adicionales en la profundidad de la pantalla generan reducciones relativamente pequeñas en las pérdidas por filtración, lo que deberá ser contrastado con criterios adicionales, como la estabilidad hidráulica y consideraciones constructivas, para definir la solución óptima.

#### 4.1.3. Gradientes hidráulicos y revisión de estabilidad de presa (piping)

Para la evaluación de la estabilidad hidráulica frente a fenómenos de erosión interna o piping, se adopta como criterio de seguridad la relación entre el gradiente hidráulico admisible y el gradiente máximo desarrollado en el modelo. Diversos manuales de diseño de presas (USACE, USBR) recomiendan que los gradientes hidráulicos de operación se mantengan significativamente por debajo de los valores críticos o admisibles, introduciendo márgenes de seguridad adecuados. En este contexto, se adopta un factor de seguridad hidráulica frente al gradiente definido como:

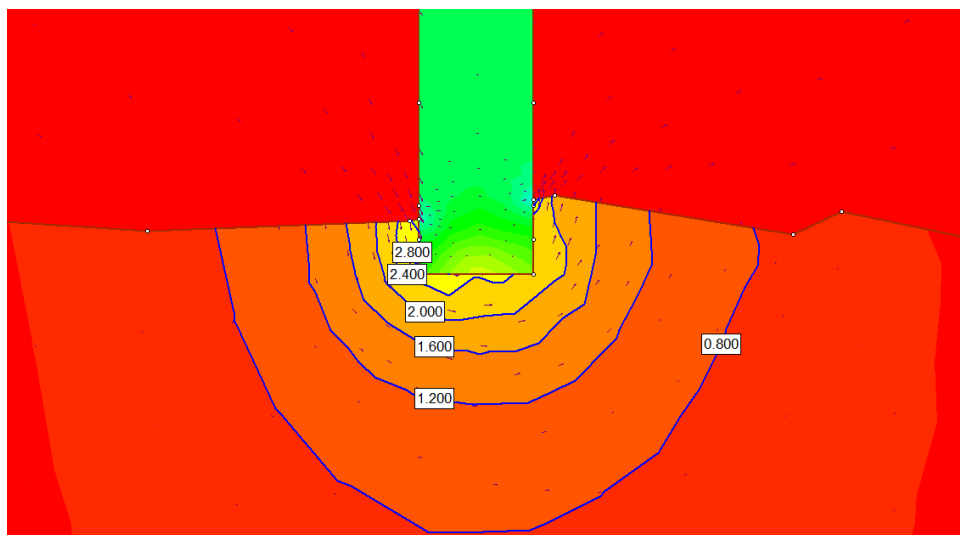
$$FS_h = \frac{i_{adm}}{i_{max}}$$

Considerándose aceptables valores de  $FS_h \geq 2$  para condiciones permanentes de operación, criterio consistente con la práctica ingenieril y con los principios clásicos de la mecánica de suelos.

En el análisis del flujo subterráneo en presas con pantalla de impermeabilización, los mayores gradientes hidráulicos suelen concentrarse en las proximidades de la punta inferior de la pantalla, donde las líneas de flujo experimentan una convergencia abrupta al atravesar la zona de menor permeabilidad inducida por la pantalla. Este comportamiento es consecuencia directa del incremento local de las pérdidas de carga y de la redistribución del campo de presiones en el entorno de la pantalla. Por tal motivo, la punta de la pantalla impermeabilizante constituye la sección crítica para la verificación de la estabilidad hidráulica frente a fenómenos de erosión interna o piping, siendo el punto donde debe evaluarse el gradiente hidráulico máximo y su correspondiente margen de seguridad.

**Figura 23**

*Gradientes hidráulicos en las cercanías de la punta inferior de la pantalla impermeabilización (1.05H).*



De acuerdo con la clasificación geomecánica del macizo rocoso obtenida en el presente estudio (RMR = 50, Clase III), el gradiente hidráulico máximo admisible se establece en función de la calidad del macizo, conforme a los rangos indicados en la Tabla 2. Para macizos rocosos de calidad media ( $41 < \text{RMR} < 60$ ), se reportan gradientes hidráulicos admisibles comprendidos entre 7 y 9 m/m. En la presente tesis, y considerando la incertidumbre inherente al modelamiento hidráulico y a la heterogeneidad del macizo rocoso, se adopta de manera conservadora un gradiente hidráulico máximo admisible de  $i_{adm} = 7.0$ . Este valor garantiza un margen adecuado de seguridad frente a fenómenos de erosión interna o piping y resulta coherente con la práctica ingenieril aplicada al diseño y verificación de presas fundadas sobre roca.

**Tabla 15**

*Verificación de factor de seguridad ante seguridad hidráulica.*

<i>Escenarios</i>	<i>H<sub>p</sub> (m)</i>	<i>i<sub>adm</sub></i>	<i>i<sub>max</sub></i>	<i>FS<sub>h</sub></i>	<i>Condición hidráulica</i>
0.80H <sub>e</sub>	9.6	7	1.05	6.7	Estable
0.95H <sub>e</sub>	11.4	7	8.50	0.8	No estable
1.00 H <sub>e</sub>	12.0	7	4.40	1.6	No estable
1.05 H <sub>e</sub>	12.6	7	2.80	2.5	Estable
1.10 H <sub>e</sub>	13.2	7	2.00	3.5	Estable
1.20 H <sub>e</sub>	14.4	7	1.60	4.4	Estable
1.25 H <sub>e</sub>	15.0	7	1.60	4.4	Estable

La verificación del factor de seguridad hidráulico muestra que, para la mayoría de los escenarios analizados, se obtienen valores de  $FS_h$  superiores al mínimo recomendado, verificándose condiciones hidráulicamente estables. Únicamente los escenarios 0.95H<sub>e</sub> y 1.105H<sub>e</sub> presentan una condición localmente desfavorable, asociada a una concentración puntual del gradiente hidráulico, sin comprometer la estabilidad global del sistema. En los escenarios iguales o superiores a 1.05H<sub>e</sub>, los factores de seguridad aumentan progresivamente, evidenciando un comportamiento hidráulico favorable del conjunto presa–pantalla–cimiento

#### **4.1.4. Altura óptima y distribución longitudinal de pantalla de impermeabilización**

El análisis comparativo de los escenarios de carga hidráulica, considerando de manera conjunta los criterios de seguridad hidráulica y el comportamiento global del sistema, indica que el escenario 1.10H<sub>e</sub> es el más conveniente para el proyecto. En esta condición, el factor de seguridad hidráulico obtenido ( $FS_h = 3.5$ )

supera ampliamente el valor mínimo recomendado, sin evidenciar concentraciones críticas del gradiente hidráulico en el contacto pantalla–cimiento. Asimismo, dicho escenario representa una condición de carga suficientemente exigente, manteniendo un comportamiento hidráulico estable y coherente con una presa de concreto cimentada sobre diorita y provista de una pantalla de impermeabilización de 2.0 m de espesor.

En consecuencia, el escenario 1.10He se adopta como condición representativa para la evaluación final de la seguridad hidráulica de la presa. Asimismo, considerando criterios de seguridad adicional y la complejidad constructiva y geológica asociada al control de filtraciones en la zona de contacto, se establece una altura de 1.10He, equivalente a 13.20 m, como valor definitivo de diseño para la pantalla de impermeabilización.

En cuanto a la distribución longitudinal de la pantalla de impermeabilización, debe considerarse que hacia los estribos la carga hidráulica efectiva disminuye progresivamente, mientras que las trayectorias y longitudes de las líneas de flujo se incrementan, condición que resulta favorable desde el punto de vista de la seguridad hidráulica del sistema.

Bajo estas condiciones, resulta técnicamente razonable que la profundidad de la pantalla de impermeabilización disminuya de manera progresiva en sentido longitudinal, manteniendo en todo momento una profundidad mínima no inferior a 4,0 m en proyección vertical. Este criterio permite optimizar el diseño de la pantalla sin comprometer la estabilidad hidráulica del sistema presa–cimentación, garantizando condiciones seguras tanto en el estribo izquierdo como en el estribo derecho.

## **4.2. ANALISIS DE IMPACTO, BENEFICIOS Y COMPARACION CON CASOS SIMILARES**

### **4.2.1. Impacto técnico de la solución propuesta**

La implementación de la pantalla de impermeabilización propuesta tiene un impacto técnico directo en el comportamiento hidráulico del sistema presa–cimentación, al reducir de manera significativa las filtraciones y los gradientes hidráulicos desarrollados en el macizo rocoso.

De acuerdo con los resultados resumidos en la Tabla 14, la incorporación progresiva de la pantalla permite reducir el porcentaje de infiltración respecto al volumen útil de la presa desde valores superiores al 5 % (escenario 0.80He) hasta valores inferiores al 2 % a partir del escenario 0.95He, alcanzando eficiencias de almacenamiento superiores al 98 % para profundidades iguales o mayores a 1.00He. Este comportamiento evidencia una mejora sustancial en la eficiencia hidráulica del embalse y una reducción significativa de las pérdidas por infiltración.

Asimismo, la Tabla 15 muestra que la reducción de los gradientes hidráulicos máximos se traduce en un incremento del factor de seguridad hidráulico, pasando de una condición localmente desfavorable en el escenario 0.95He ( $FS_h < 1.0$ ) a condiciones claramente estables para escenarios a partir de 1.00He, con factores de seguridad superiores a la unidad.

En conjunto, los resultados comparativos demuestran que la solución propuesta permite controlar eficazmente las filtraciones, mejorar la seguridad hidráulica frente a fenómenos de socavación interna y sustentar técnicamente el dimensionamiento óptimo de la pantalla de impermeabilización, asegurando un comportamiento hidráulico compatible con la estabilidad y funcionalidad de la represa Ancasccochoa.

#### **4.2.2. Beneficios técnicos y operacionales**

La pantalla de impermeabilización propuesta mejora de manera significativa la seguridad hidráulica de la presa, al reducir los caudales de filtración y los gradientes hidráulicos desarrollados en el macizo rocoso de cimentación. Esta reducción disminuye el riesgo de erosión interna, piping y surgencias aguas abajo, contribuyendo a la estabilidad hidráulica y estructural del sistema presa–cimentación. Asimismo, el control de las filtraciones permite evitar pérdidas relevantes de agua almacenada, asegurando un uso más eficiente del recurso hídrico regulado.

La disminución de las filtraciones profundas favorece un comportamiento hidráulico más estable a lo largo del tiempo, reduciendo procesos de alteración del macizo rocoso y la probabilidad de deterioro progresivo de la cimentación. Esto se traduce en una mayor durabilidad de la estructura, menores requerimientos de mantenimiento correctivo y una operación más confiable del sistema de almacenamiento, especialmente en contextos de alta variabilidad climática.

#### **4.2.3. Comparación con casos similares**

La solución adoptada para la represa Ancascococha es consistente con los criterios comúnmente empleados en el diseño de presas fundadas sobre macizos rocosos fracturados, donde el control de filtraciones se aborda mediante pantallas de impermeabilización complementadas con sistemas de drenaje interno.

En la práctica de la ingeniería de presas, la profundidad de la pantalla suele definirse como una fracción de la carga hidráulica del embalse, adoptándose rangos típicos entre  $0.8H_e$  y  $1.2H_e$ , en función de la calidad del macizo rocoso y de los gradientes hidráulicos desarrollados. Los escenarios evaluados en el presente estudio se encuentran dentro de dichos rangos.

Asimismo, los criterios de aceptación hidráulica, tales como limitar las pérdidas por filtración a valores inferiores al 5 % y asegurar factores de seguridad

hidráulicos mayores que la unidad, son coherentes con lo observado en casos similares y con prácticas de diseño orientadas a la seguridad y eficiencia del almacenamiento.

En este contexto, el dimensionamiento adoptado para la pantalla de impermeabilización resulta técnicamente coherente, sin evidenciar condiciones de subdimensionamiento ni sobredimensionamiento, y alineado con la práctica habitual en proyectos de características similares.

### **4.3. LIMITACIONES DEL ESTUDIO Y MEJORAS IDENTIFICADAS**

El presente estudio se desarrolló a partir de la información geotécnica e hidráulica disponible y mediante herramientas de modelamiento numérico comúnmente empleadas en el análisis de filtraciones en presas. En este contexto, se reconocen limitaciones inherentes al alcance del análisis, así como mejoras técnicas identificadas a partir de los resultados obtenidos y de la experiencia constructiva.

#### **4.3.1. Limitaciones del estudio**

El análisis de filtraciones se realizó mediante modelamiento bidimensional, el cual permite representar adecuadamente el comportamiento global del flujo subterráneo bajo la presa; sin embargo, no considera posibles variaciones tridimensionales locales, particularmente en zonas próximas a los estribos.

Asimismo, las propiedades hidráulicas del macizo rocoso fueron definidas a partir de ensayos Lugeon puntuales, asumiendo una zonificación representativa, lo cual no permite capturar completamente la heterogeneidad natural del macizo. Finalmente, el comportamiento hidráulico fue evaluado bajo condiciones de régimen permanente, no considerándose efectos transitorios asociados a variaciones rápidas del nivel del embalse.

### **4.3.2. Mejoras identificadas**

A partir del análisis realizado y del criterio constructivo adoptado, se identificaron mejoras orientadas a optimizar el desempeño hidráulico del sistema durante la ejecución y operación de la presa. Entre ellas, se destaca la incorporación de una tubería de drenaje ubicada entre las dos líneas de waterstop en las juntas del cuerpo de presa, con la finalidad de controlar filtraciones residuales y reducir presiones localizadas.

Asimismo, se reconoce como mejora la ejecución de las inyecciones de impermeabilización posterior a un vaciado inicial del cuerpo de la presa, lo cual favorece un adecuado contacto entre el concreto y el macizo rocoso, mejora el confinamiento durante la inyección y reduce pérdidas de lechada en el plano presa–cimentación.

## **4.4. DESCRIPCION DE LA SOLUCION PROPUESTA Y SU IMPLEMENTACION**

Como resultado del análisis hidráulico de filtraciones realizado en el suelo de cimentación de la represa Ancascocha, se propone la implementación de una pantalla de impermeabilización en la cerrada, como medida principal de control de filtraciones y reducción de gradientes hidráulicos, complementada con el sistema de drenaje interno del cuerpo de presa.

La determinación del espaciamiento entre perforaciones de inyección se realizó considerando un criterio jerárquico y progresivo, ampliamente recomendado para el diseño de pantallas de impermeabilización en macizos rocosos, el cual contempla la ejecución secuencial de perforaciones primarias, secundarias y terciarias. Este enfoque tiene como finalidad reducir progresivamente la permeabilidad del macizo rocoso, interceptando inicialmente las principales discontinuidades hidráulicamente activas y, posteriormente, sellando trayectorias residuales de filtración.

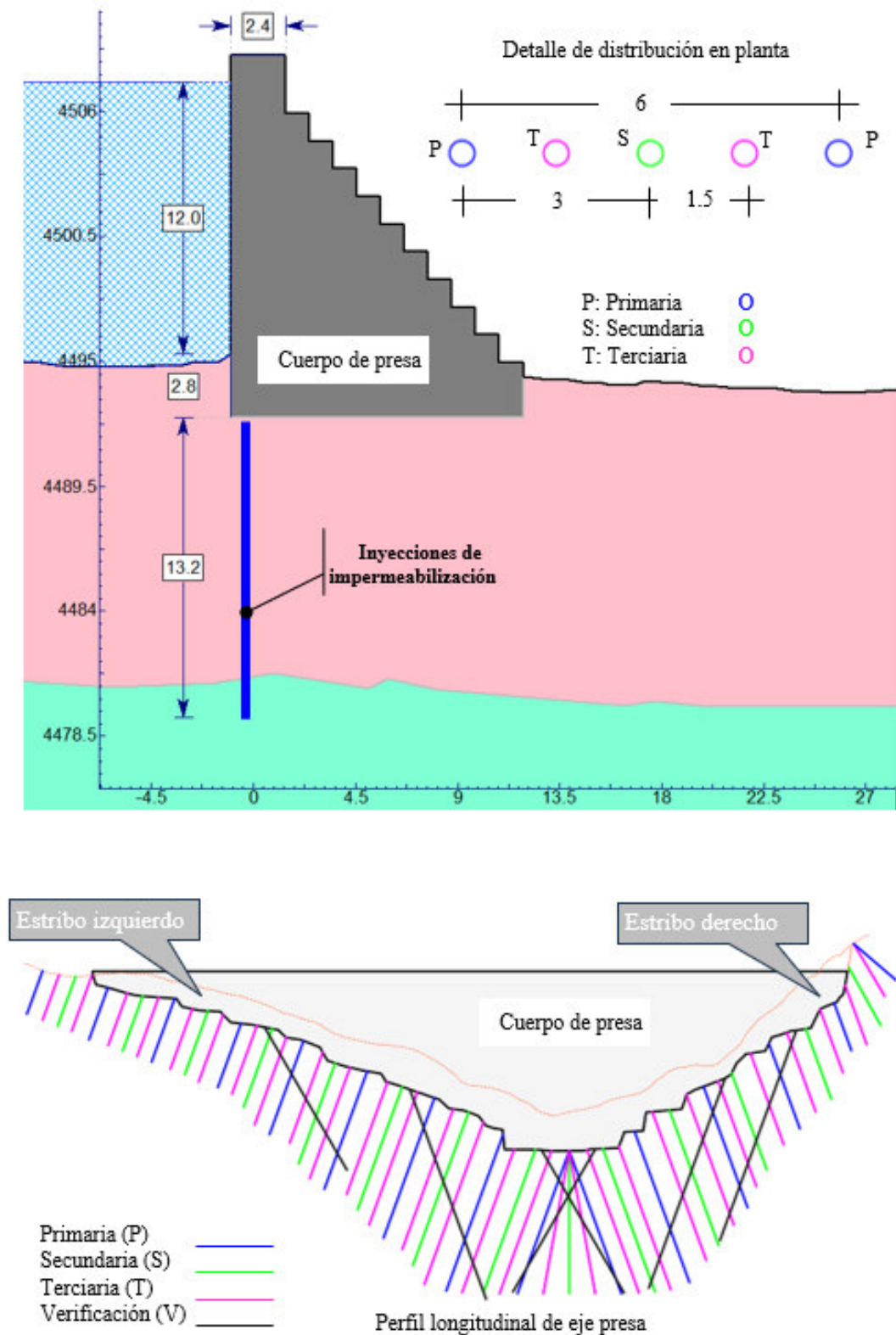
Las perforaciones primarias (P) constituyen la estructura base de la pantalla de impermeabilización y se disponen con un espaciamiento inicial mayor, definido en función de las condiciones geológicas generales del macizo y del grado de fracturamiento. Las perforaciones secundarias (S) se ubican a mitad de distancia entre las primarias, con el objetivo de disminuir la permeabilidad efectiva del macizo, mientras que las perforaciones terciarias (T) permiten un sellado más fino, orientado a reducir la conectividad hidráulica remanente. Este procedimiento progresivo es consistente con las recomendaciones del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos y con la experiencia documentada en proyectos de inyecciones de fundación en presas.

En el presente estudio, y considerando los resultados del análisis de filtraciones del sistema presa–cimentación, se adoptaron espaciamientos de 6.0 m para las perforaciones primarias, 3.0 m para las secundarias y 1.5 m para las terciarias, valores que se encuentran dentro de los rangos comúnmente empleados en pantallas de impermeabilización en macizos rocosos fracturados y que resultan coherentes con el objetivo de reducir las filtraciones a niveles compatibles con la seguridad hidráulica del proyecto .

De acuerdo con la práctica habitual en trabajos de inyecciones de impermeabilización, la comprobación y ajuste de los parámetros hidráulicos del macizo rocoso, así como la verificación del coeficiente de permeabilidad efectivamente alcanzado, se realizan durante la etapa de ejecución, mediante el control de presiones, el consumo de lechada, los ensayos hidráulicos y la respuesta observada del macizo rocoso. Por tanto, los valores de permeabilidad esperados deberán confirmarse y, de ser necesario, ajustarse en obra, conforme a los procedimientos de control recomendados en la literatura técnica especializada.

**Figura 24**

*Esquema conceptual de la distribución de inyecciones de impermeabilización.*



#### **4.4.1. Consideraciones constructivas de la pantalla impermeabilización**

La pantalla de impermeabilización propuesta se ejecutará mediante inyecciones de cemento en el macizo rocoso de cimentación, constituyendo la principal medida de control de filtraciones profundas y de reducción de los gradientes hidráulicos desarrollados bajo la presa.

Las consideraciones constructivas adoptadas responden tanto a los resultados del análisis hidráulico y geotécnico como a criterios prácticos derivados de la experiencia de obra, orientados a garantizar la efectividad del tratamiento y su adecuada integración con el cuerpo de la presa.

##### **4.4.1.1. Estimación preliminar del consumo de cemento en etapa de proyecto**

La estimación del consumo de cemento en trabajos de inyección constituye una actividad necesaria durante la etapa de proyecto, principalmente para evaluar la viabilidad técnica del tratamiento de impermeabilización y para la determinación preliminar de los costos asociados. No obstante, la bibliografía especializada coincide en que el consumo real de lechada no puede ser definido con precisión antes de la ejecución de la obra, debido a la marcada heterogeneidad del macizo rocoso y a la naturaleza no lineal del flujo a través de discontinuidades (Weaver & Bruce, 2007).

El US Army Corps of Engineers establece que, las cantidades de inyección o consumo deben estimarse a partir de información geológica disponible, *antecedentes de obras similares y criterios empíricos*, reconociendo explícitamente que dichas *estimaciones serán ajustadas durante la construcción en función de la respuesta real del macizo rocoso* (USACE, 2017).

Como referencia empírica de consumos de lechada en obras de impermeabilización de presas ejecutadas en el Perú, se consideran los antecedentes que se resumen en la tabla siguiente, los cuales corresponden a consumos reales registrados durante la ejecución de obra:

**Tabla 16**

*Consumo promedio de cemento por metro lineal de perforación en antecedentes nacionales.*

<i>Proyecto</i>	<i>Tratamiento</i>	<i>Consumo</i>	<i>Fuente</i>
Represa Chirimayuni (Moquegua)	Inyecciones de impermeabilización en eje (P-S-T-C)	≈ 130kg/m	Alarcón Maquera (2013)
Presa Pumamayo (Puno)	Pantalla de impermeabilización – método GIN	8-11kg/m	Rimachi Taco (2016)

Nota: Elaborado a partir de datos de consumo de cemento reportados en obra por Alarcón Maquera (2013) y Rimachi Taco (2016).

Estos valores, representativos de condiciones geológicas y de fracturamiento distintas, sirven como órdenes de magnitud para estimaciones preliminares de consumo de cemento en etapa de proyecto, resaltando la variabilidad inherente del comportamiento del macizo rocoso y la necesidad de verificación en obra; Rimachi Taco, 2016).

**Tabla 17**

*Sistema de clasificación del consumo de lechada propuesto por Deere.*

<b>Clasificación</b>	<b>Consumo de lechada (kg/m)</b>
Muy bajo	0-12.5
Bajo	12.5-25
Moderadamente bajo	25-50
Moderado	50-100
Moderadamente alto	100-200
Alto	200-400
Muy alto	>400

Nota: Deere (1976), citado en Weaver y Bruce (2007).

Ratios de consumo de lechada (grout take) ha sido ampliamente utilizado como un criterio empírico para la interpretación del grado de fracturamiento y de la conectividad hidráulica del macizo rocoso, en la tabla anterior seguida se muestra una tabla propuesta por Deere (1976):

A partir de las condiciones geológicas identificadas en el área de estudio, de los resultados obtenidos en el análisis de filtraciones y de la comparación con los antecedentes nacionales revisados, se propone para el proyecto un consumo preliminar de lechada del orden de 38 kg de cemento por metro lineal de perforación. Este valor se sitúa dentro del rango clasificado como moderadamente bajo según el sistema empírico de Deere, y resulta coherente con un macizo rocoso que presenta un grado de fracturamiento moderado y una conectividad hidráulica susceptible de ser controlada mediante un tratamiento de inyecciones adecuadamente secuenciado.

El consumo adoptado tiene carácter preliminar y referencial, y se emplea exclusivamente para fines de dimensionamiento del tratamiento y estimación de costos en etapa de proyecto. La verificación del consumo real de cemento y su eventual ajuste deberán realizarse durante la etapa de ejecución, en función del control de presiones, del registro del consumo de lechada y de la evaluación conjunta de los parámetros hidráulicos medidos en obra.

#### **4.4.1.2. Preparación y condiciones del macizo rocoso**

Previo a la ejecución de la pantalla de impermeabilización, el macizo rocoso deberá encontrarse adecuadamente expuesto, saneado y limpio, eliminando material suelto, superficies meteorizadas y zonas alteradas como resultado de los procesos de excavación mecánica. Esta preparación es fundamental para garantizar una adecuada penetración de la lechada de inyección en las discontinuidades del macizo y para reducir la probabilidad de pérdidas no controladas durante el proceso de inyección.

Asimismo, con el fin de asegurar condiciones óptimas del macizo rocoso, deberán emplearse procedimientos de limpieza y lavado a presión, utilizando equipos tales como hidrojet o sistemas de lavado con agua a alta presión, los cuales permiten remover finos, detritos y residuos adheridos a la superficie de la roca. Estas acciones contribuyen a mejorar la conectividad efectiva de las discontinuidades a ser tratadas y a favorecer el desempeño del tratamiento de impermeabilización.

#### **4.4.1.3. Secuencia constructiva adoptada**

Como criterio constructivo, se adopta la ejecución de la pantalla de impermeabilización posterior al vaciado inicial del cuerpo de la presa, correspondiente a una primera tongada de concreto de aproximadamente 1.20 m de altura.

Este procedimiento permite:

- Garantizar un mejor contacto entre el concreto de la presa y el macizo rocoso de cimentación,
- Proporcionar un confinamiento adecuado durante el proceso de inyección,
- Reducir el riesgo de pérdidas de lechada a través del plano de contacto presa-roca, y
- Asegurar, que la pantalla de impermeabilización trabaje de manera solidaria con el cuerpo de la presa.

En este contexto, la pantalla de impermeabilización no se concibe como un tratamiento aislado, sino como un elemento integrado al sistema estructural e hidráulico de la presa, cuyo desempeño depende tanto del tratamiento del macizo rocoso como de su adecuada interacción con el cuerpo de la presa.

#### **4.4.1.4. Perforaciones de inyección**

Las perforaciones de inyección se dispondrán siguiendo el eje de la presa, de acuerdo con la geometría definida en el diseño, considerando una distribución por órdenes (primarias, secundarias y terciarias), con el fin de asegurar la continuidad hidráulica de la pantalla.

El espaciamiento inicial entre perforaciones se adopta en función del radio de acción de la lechada y de la calidad geomecánica del macizo rocoso, reduciéndose progresivamente en aquellas zonas donde se evidencie mayor absorción de lechada o mayores valores de permeabilidad.

La profundidad de las perforaciones será variable a lo largo del eje de la presa, alcanzando su mayor valor en la zona central y baja de la cerrada, de manera que la pantalla intercepte las zonas de mayor permeabilidad identificadas mediante los ensayos Lugeon y el análisis de filtraciones.

#### **4.4.1.5. Procedimiento y control de inyección**

La inyección se realizará por etapas, aplicando el método convencional, con un control estricto de las presiones de inyección, las cuales se ajustarán a la calidad del macizo rocoso con el objetivo de evitar procesos de hidrofracturamiento o apertura artificial de discontinuidades.

La composición de la lechada se adaptará progresivamente al comportamiento del macizo, iniciándose con mezclas más fluidas y evolucionando hacia mezclas más densas conforme disminuya la absorción, permitiendo una reducción efectiva de la permeabilidad.

Durante el proceso se llevará un control permanente del consumo de lechada, presión y tiempo de inyección, información que permitirá evaluar la eficiencia del tratamiento y realizar ajustes oportunos en campo.

#### 4.4.1.6. Control de calidad y verificación

Concluida la ejecución de la pantalla, se recomienda la realización de perforaciones de verificación y ensayos Lugeon de control, con la finalidad de comprobar la reducción efectiva de la permeabilidad del macizo rocoso hasta valores compatibles con los criterios hidráulicos y de seguridad adoptados en el diseño.

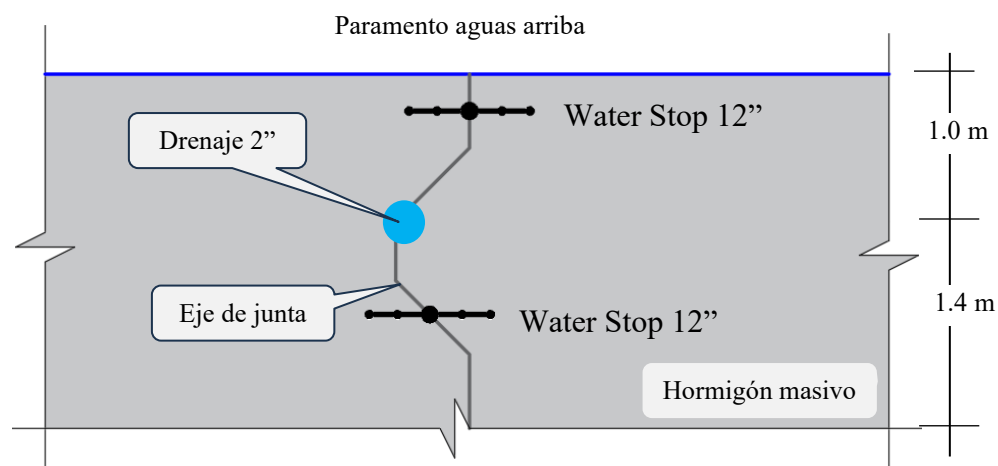
#### 4.4.2. Medidas complementarias y de control operacional

El sistema de drenaje interno del cuerpo de presa constituye un elemento complementario a la pantalla de impermeabilización, cuya función principal es el control de subpresiones y la evacuación de las filtraciones residuales que pudieran desarrollarse.

En este sentido, se recomienda tener un sistema de drenaje longitudinal y vertical proyectado en el cuerpo de presa, asegurando su correcta conexión y descarga hacia estructuras disipadoras aguas abajo, finalmente implementar un adecuado sellado de juntas de dilatación, mediante doble fila de waterstops o materiales elásticos, para minimizar filtraciones localizadas a través del cuerpo de la presa.

**Figura 25**

*Corte típico en junta de dilatación vertical.*



## **4.5. EVALUACION DE COSTOS, SOSTENIBILIDAD Y VIABILIDAD A LARGO PLAZO.**

### **4.5.1. Evaluación de costos de la solución propuesta**

Los costos de la solución propuesta se han realizado con base en las partidas de la pantalla impermeabilizante. Dentro del presupuesto analizado, los costos directamente vinculados al control de filtraciones y a la mejora del comportamiento hidráulico de la presa corresponden principalmente a:

- Perforaciones para inyecciones de impermeabilización.
- Ensayos de permeabilidad y lavado de perforaciones.
- Inyecciones de cemento para impermeabilización y verificación.

El costo total del tratamiento geotécnico asciende aproximadamente a S/ 782,303.42, lo que representa una fracción moderada del costo total del componente “Construcción de la Presa”, cuyo monto global alcanza aproximadamente S/ 6,261,829.71. Este valor evidencia que la inversión destinada a la reducción de filtraciones y al incremento de la seguridad hidráulica constituye un porcentaje razonable respecto al costo total del proyecto, considerando la magnitud de los beneficios técnicos obtenidos.

### **4.5.2. Evaluación de la sostenibilidad técnica y ambiental**

Desde el punto de vista técnico, la solución basada en la pantalla impermeabilización o el tratamiento geotécnico mediante inyecciones presenta una elevada sostenibilidad, dado que reduce de manera significativa los caudales de filtración y los gradientes hidráulicos bajo la presa, mitigando el riesgo de erosión interna y tubificación, tal como se evidencia en los resultados del análisis de flujo.

El tratamiento geotécnico propuesto permitiría mejorar significativamente las condiciones de permeabilidad del macizo rocoso, reduciendo el coeficiente de

permeabilidad desde valores del orden de  $10^{-4}$  cm/s hasta valores cercanos a  $10^{-6}$  cm/s. Esta reducción contribuye a incrementar la durabilidad del sistema presacimentación y a minimizar la necesidad de intervenciones correctivas durante la etapa de operación.

#### **4.5.3. Viabilidad técnica y económica a largo plazo**

La viabilidad a largo plazo de la solución propuesta se sustenta en la relación favorable entre los costos de implementación y los beneficios técnicos obtenidos. Los análisis de flujo demuestran que la incorporación de la pantalla impermeabilización reduce las pérdidas anuales por flujo subterráneo a valores inferiores al 5 % del volumen de almacenamiento útil del embalse, lo que garantiza la eficiencia operativa durante la vida útil de la represa.

Desde una perspectiva económica, la inversión asociada al tratamiento geotécnico se justifica ampliamente al reducir:

- Riesgos de pérdida de volumen útil del embalse.
- Posibles intervenciones de emergencia ante fallas hidráulicas.

En consecuencia, la solución propuesta resulta técnica, económica y operativamente viable a largo plazo, constituyendo una alternativa eficiente para optimizar el almacenamiento del recurso hídrico y garantizar la seguridad hidráulica de la represa Ancascococha.

## **CAPITULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **5.1. CONCLUSIONES**

Se diseñó una pantalla de impermeabilización para la represa Ancascococha a partir del análisis de filtraciones en el macizo rocoso de cimentación, mediante la caracterización geotécnica del terreno y el modelamiento numérico del flujo subterráneo. Los resultados mostraron que una pantalla con profundidad aproximada de  $1.10H_e$  permite reducir las pérdidas por filtración a valores menores al 5 % del volumen útil del embalse y mantener los gradientes hidráulicos dentro de rangos admisibles para macizos rocosos con RMR entre 41 y 60, garantizando la eficiencia de almacenamiento del embalse y la estabilidad del sistema presa–cimentación.

Se caracterizó geotécnicamente el macizo rocoso de cimentación mediante perforaciones diamantinas y ensayos de permeabilidad tipo Lugeon, identificándose una diorita fracturada con calidad geomecánica RMR entre 41 y 60 y valores de permeabilidad del orden de  $10^{-4}$  a  $10^{-5}$  cm/s. Estas condiciones evidencian la presencia de discontinuidades que favorecen el flujo subterráneo, confirmando la necesidad de implementar una pantalla de impermeabilización para controlar las filtraciones bajo la presa.

Se determinó que la variación de la altura de la pantalla de impermeabilización influye directamente en el comportamiento del flujo subterráneo bajo la presa. La simulación de ocho escenarios, desde la ausencia de pantalla hasta alturas de  $0.90H_e$  a  $1.25H_e$ , permitió analizar la distribución de presiones, líneas de flujo y caudales de infiltración, evidenciándose que el incremento de la profundidad de la pantalla reduce significativamente las filtraciones y mejora las condiciones de estabilidad hidráulica del sistema presa–cimentación.

El análisis de gradientes hidráulicos permitió identificar zonas críticas localizadas principalmente en la punta inferior de la pantalla de

impermeabilización. En el escenario sin tratamiento se obtuvieron gradientes superiores a los valores admisibles para macizos rocosos con RMR entre 41 y 60, mientras que en la mayoría de los escenarios con pantalla se verificaron factores de seguridad hidráulica adecuados, salvo el caso de 0.95He, donde se registró un gradiente puntual de 8.5 m/m, superior al límite admisible de 7 m/m.

El modelamiento hidráulico permitió determinar que, en ausencia de pantalla de impermeabilización, las pérdidas por infiltración pueden superar el 5 % del volumen útil del embalse, afectando la eficiencia del almacenamiento. La incorporación de una pantalla reduce significativamente los caudales de filtración, mejorando el control del flujo subterráneo y garantizando condiciones hidráulicamente estables en la cimentación de la presa.

Se determinó que la altura óptima de la pantalla de impermeabilización corresponde aproximadamente a 1.10He, ya que permite reducir los caudales de filtración y mantener gradientes hidráulicos dentro de límites admisibles. Por tanto, esta profundidad constituye una solución técnica eficiente para garantizar la seguridad hidráulica en la cimentación y la eficiencia de almacenamiento de la represa Ancascococha.

## **5.2. RECOMENDACIONES**

Se recomienda implementar de una pantalla de impermeabilización con profundidad aproximada de 1.10He en la represa Ancascococha, dado que esta configuración permite controlar adecuadamente los gradientes hidráulicos y reducir las pérdidas por filtración, garantizando la estabilidad hidráulica y la eficiencia de almacenamiento de la presa.

Se recomienda que en proyectos de represas emplazadas en macizos rocosos fracturados se realicen campañas geotécnicas detalladas, incluyendo perforaciones diamantinas, registros geomecánicos y ensayos de permeabilidad tipo Lugeon, con el fin de caracterizar adecuadamente la permeabilidad del macizo rocoso y definir tratamientos de impermeabilización adecuados.

Se recomienda incorporar modelamiento numérico del flujo subterráneo en las etapas de diseño de presas, utilizando herramientas de análisis geotécnico e hidráulico que permitan evaluar distintos escenarios de filtración y optimizar la profundidad y configuración de las pantallas de impermeabilización.

Se recomienda prestar especial atención a las zonas cercanas a la punta inferior de la pantalla de impermeabilización, debido a que en estas áreas pueden concentrarse los mayores gradientes hidráulicos, por lo que es conveniente considerar medidas complementarias de drenaje o monitoreo para garantizar la estabilidad hidráulica del sistema presa–cimentación.

Se recomienda implementar programas de monitoreo de filtraciones durante la etapa de operación de la presa, mediante instrumentación geotécnica como piezómetros o sistemas de control de caudales de drenaje, con el fin de verificar el comportamiento hidráulico del macizo rocoso y evaluar la eficiencia del tratamiento de impermeabilización.

Se recomienda que futuras investigaciones profundicen en el análisis del comportamiento hidráulico de macizos rocosos fracturados en presas altoandinas, incorporando estudios hidrogeológicos de mayor alcance, análisis tridimensionales del flujo y evaluación del desempeño de diferentes configuraciones de pantallas de impermeabilización.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Alarcón Maquera, J. (2013). *Diseño y ejecución de la pantalla de impermeabilización en la presa Chirimayuni* [Tesis de ingeniería]. Universidad Nacional de Moquegua.

American Society for Testing and Materials. (2019). *ASTM D4630-19: Standard test method for determining transmissivity and storage coefficient of low-permeability rocks by in situ measurements using the borehole flowmeter method*. ASTM International.

Aslan, A., & Temel, A. (2022). Numerical analysis of seepage beneath hydraulic structures using finite element methods. *Journal of Hydraulic Engineering*, 148(3), 1–12.

Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering rock mass classifications: A complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering*. John Wiley & Sons.

Briones Gutiérrez, J. (2022). *Presa Limón – Olmos: análisis de filtración, riesgos e incertidumbres*. Colegio de Ingenieros del Perú.

Custodio, E., & Llamas, M. R. (1983). *Hidrología subterránea* (Vols. 1–2). Ediciones Omega.

Geron Flores, M. (2022). Análisis de fallas asociadas a filtraciones en presas mexicanas. *Revista Mexicana de Ingeniería Hidráulica*, 37(2), 45–60.

González de Vallejo, L. I., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2002). *Ingeniería geológica*. Prentice Hall.

Haramboure, C., & Guedes, J. (2020). Análisis retrospectivo de la falla de la presa Teton. *Revista Internacional de Ingeniería de Presas*, 12(1), 25–40.

U.S. Army Corps of Engineers. (1993). *Seepage analysis and control for dams* (EM 1110-2-1901). Department of the Army.

U.S. Army Corps of Engineers. (1995). *Gravity dam design* (EM 1110-2-2200). Department of the Army.

U.S. Army Corps of Engineers. (2001). *Geotechnical investigations* (EM 1110-1-1804). Department of the Army.

U.S. Army Corps of Engineers. (2017). *Engineering and design: Grouting technology* (EM 1110-2-3506). Department of the Army.

Viteri Montes, R. (2023). Reformulación del expediente técnico del saldo de obra de la presa Huacatina. Gobierno Regional de La Libertad.

Weaver, K. D., & Bruce, D. A. (2007). *Dam foundation grouting*. ASCE Press.

Ministerio de Agricultura y Riego. (2010). *Manual de criterios de diseño de obras hidráulicas para la formulación de proyectos hidráulicos multisectoriales y de afianzamiento hídrico*. Gobierno del Perú.

Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego. (2017). *Reglamento de seguridad de presas en el Perú*. Gobierno del Perú.

Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. (2018). *Norma técnica E.050: Suelos y cimentaciones*. Reglamento Nacional de Edificaciones.

## APENDICE A

### Matriz de consistencia

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES/DIMENSIONES E INDICADORES	METODOLOGÍA
<p><b>1. INTERROGANTE PRINCIPAL</b></p> <p>¿Cómo influye el análisis de filtraciones en el suelo de cimentación en el diseño de una pantalla de impermeabilización eficiente para la represa Ancascocha, Apurímac – 2025?</p> <p><b>2. INTERROGANTES ESPECÍFICAS</b></p> <p>a) ¿Qué características geotécnicas y de permeabilidad presenta la cerrada de la represa Ancascocha, y cómo afectan al comportamiento del flujo bajo la presa?</p> <p>b) ¿Cómo varía el comportamiento del flujo subterráneo al simular diferentes escenarios de altura de la pantalla de impermeabilización emplazada en la diorita y su interacción con la presa de concreto?</p> <p>c) ¿Cuál es el valor del gradiente hidráulico en el subsuelo y qué zonas presentan riesgo de erosión interna?</p> <p>d) ¿Cuáles son los caudales de filtración existentes y cómo afectan al diseño de sistemas de drenaje y al rendimiento del almacenamiento?</p> <p>e) ¿Cuál es la altura y distribución longitudinal óptima de la pantalla de impermeabilización que permite minimizar los caudales de filtración?</p>	<p><b>1. OBJETIVO GENERAL</b></p> <p>Diseñar una pantalla de impermeabilización a partir del análisis de filtraciones en el suelo de cimentación en la represa Ancascocha, Apurímac 2025</p> <p><b>2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b></p> <p>a) Realizar los estudios geotécnicos de perforación diamantina y ensayos de permeabilidad de la cerrada de la represa Ancascocha para realizar la simulación de análisis de flujo bajo la presa.</p> <p>b) Determinar el comportamiento del flujo subterráneo mediante la simulación de diferentes escenarios de altura de la pantalla de impermeabilización emplazada en la diorita y su interacción con la presa de concreto.</p> <p>c) Calcular el gradiente hidráulico, para identificar zonas críticas con riesgo de erosión interna.</p> <p>d) Determinar caudales de filtración, para dimensionar el diseño de sistemas de drenaje, control y eficiencia del almacenamiento.</p> <p>e) Determinar la altura y la distribución longitudinal de la pantalla de impermeabilización</p>	<p><b>1. HIPÓTESIS GENERAL</b></p> <p>El análisis de las filtraciones permite optimizar el diseño de la pantalla de impermeabilización en la represa Ancascocha.</p> <p><b>2. HIPÓTESIS ESPECÍFICAS</b></p> <p>a) Si se realizan estudios geotécnicos y ensayos de permeabilidad detallados en la cerrada de la represa, entonces será posible obtener una simulación precisa del flujo bajo la presa.</p> <p>b) La variación de la altura de la pantalla de impermeabilización emplazada en la diorita influye en el comportamiento del flujo subterráneo bajo la presa de concreto.</p> <p>c) Si el gradiente hidráulico supera valores críticos en ciertas zonas del subsuelo, entonces se identificarán sectores con alto riesgo de erosión interna (piping).</p> <p>d) La determinación precisa de los caudales de filtración permitirá dimensionar de forma adecuada los sistemas de drenaje y control, mejorando la eficiencia del almacenamiento de la represa.</p> <p>e) Existe una altura y distribución longitudinal óptima de la pantalla de impermeabilización que permite minimizar los caudales de filtración por debajo de los límites de seguridad establecidos</p>	<p>Variable (independiente)</p> <p>Permeabilidad de la cimentación</p> <p>Geotecnia – Perforación diamantina</p> <p>Indicadores:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Coeficiente de permeabilidad antes del tratamiento (cm/s o unidades Lugeon).</li> <li>- Condición de Lugeon (Muy favorable, favorable, desfavorable, muy desfavorable).</li> </ul> <p>Variable (dependiente)</p> <p>Caudal de filtración</p> <p>Indicadores:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Volumen de infiltración anual sin cortina de impermeabilización (m<sup>3</sup>/año).</li> <li>- Volumen de infiltración anual con cortina de impermeabilización (m<sup>3</sup>/año).</li> <li>- Indicador: Porcentaje de infiltración respecto al volumen de almacenamiento total de la presa (en %).</li> </ul> <p>Gradiente Hidráulico y Estabilidad a la tubificación</p> <p>Indicadores:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Valor del gradiente hidráulico calculado (en unidades de gradiente).</li> <li>- Cumplimiento de los requisitos para evitar tubificación según los valores estándar de gradientes hidráulicos para roca diorita.</li> </ul>	<p>- <b>Tipo de Investigación</b></p> <p>Aplicada</p> <p>- <b>Diseño de la Investigación</b></p> <p>Transversal,</p> <p>- <b>Ámbito de Estudio</b></p> <p>Laguna Ancascocha, comunidad Choccco, Challhuahuacho – Cotabamba - Apurímac</p> <p>- <b>Población</b></p> <p>Total, de puntos de exploración en la cerrada.</p> <p>- <b>Muestra</b></p> <p>04 perforaciones diamantina y ensayos de permeabilidad cada 5m</p> <p>- <b>Técnicas de Recolección de datos</b></p> <p>Observación</p> <p>- <b>Instrumentos</b></p> <p>Fichas de observación de campo y laboratorio</p>
<p><b>Relevancia de la investigación</b></p> <p>Con la evaluación de las filtraciones de la presa Ancascocha se pretende proponer el diseño de la pantalla de la impermeabilización para asegurar la estabilidad estructural y la eficiencia en el almacenamiento de esta, lo cual contribuye al desarrollo sostenible mediante el aseguramiento de la oferta hídrica.</p>				



**Registro fotográfico Sondaje PPA-01**

<b>PROYECTO:</b>	<b>SERVICIO DE AGUA PARA RIEGO</b>		
<b>HOLE:</b>	PPA-01	<b>BOX</b>	01
<b>FROM:</b>	0.00	<b>TO:</b>	2.90



<b>PROYECTO:</b>	<b>SERVICIO DE AGUA PARA RIEGO</b>		
<b>HOLE:</b>	PPA-01	<b>BOX</b>	02
<b>FROM:</b>	2.90	<b>TO:</b>	5.55





**Fotografía N° 14:** Vista Panorámica de Instalación e inflado de pakker para realizar la prueba de permeabilidad Lugeon.



**Fotografía N° 15:** Vista Panorámica de personal técnico realizando toma de datos durante ensayo de permeabilidad en perforación diamantina Lugeon.

## APENDICE C

### Registros de ensayos Lugeon

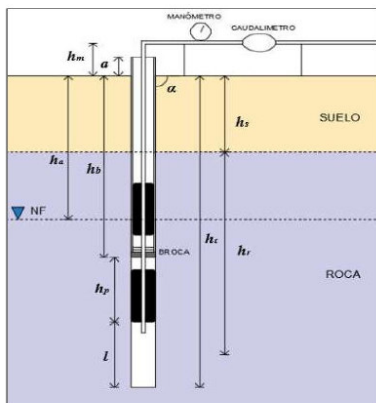
<b>EBC</b> INGENIERIA	<b>ENSAYO DE PERMEABILIDAD CON PRESION DE AGUA</b> <b>CONSORCIO RIEGO CHALLHUAHUACHO</b>	
--------------------------	---	--

<b>Proyecto:</b>	ESTUDIO GEOLOGICO Y GEOTECNICO PARA EL PROYECTO: "CREACION DEL SERVICIO DE AGUA PARA RIEGO A TRAVES DE LA CONSTRUCCION DE LA REPRESA ANCCASCOCHA Y RIO PARARANI PARA RIEGO EN LAS COMUNIDADES DE CHOCCOYO, CHONTAHUILQUE, TAMBULLA, PARARANI Y CCASA DEL DISTRITO DE CHALLHUAHUACHO - COTABAMBAS - APURIMAC"
<b>Ubicación:</b>	REPRESA ANCCASCOCHA

DATOS DEL TALADRO			
Taladro:	PP4-01	Tipo:	Exploratoria
Norte:	8420846.65	Inclinación:	70°
Este:	783859.68	Diametro:	0.95 cm.
Elevación:	4502 m.s.n.m.	NF:	4.90 m.

Nota: si no se encontro NF colocar seco

DATOS DEL ENSAYO			
Fecha:	5-Jul-25	hb:	4.00 m.
Hora inicio:	-	hr:	10.00 m.
Hora fin:	-	Tramo (l):	5.00 m.
lp:	1.00 m.	RQD:	65%
hm:	0.40 m.	a (m):	0.30 m.



**Presión de inflado del packer = P<sub>p</sub>**

$$P_p = 1.2(P_h + P_w) \text{ psi}$$

$$P_h = (h_b + h_p + a) \text{ psi}$$

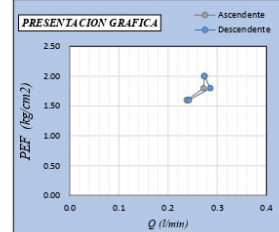
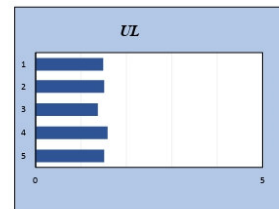
convertir 1m = 1.45psi

- a: Altura sobresaliente de la tubería = 0.30 m
  - hb: Profundidad de la broca = 4.0 m
  - lp: Longitud del packer en roca = 1.0 m
  - Pw: Presión de trabajo del packer = 200.0 psi
  - Ph: Presión hidrostática del packer = 7.685 psi
- P<sub>p</sub> = 249.2 psi = 17.2 Bar**

tiempo en min	P1 23.2 psi 1.6 Bar		P2 26.1 psi 1.8 Bar		P3 29.0 psi 2.0 Bar		P2 26.1 psi 1.8 Bar		P1 23.2 psi 1.6 Bar	
	lectura de caudal	Q (l/min)	lectura de caudal	Q (l/min)	lectura de caudal	Q (l/min)	lectura de caudal	Q (l/min)	lectura de caudal	Q (l/min)
0	21150.0		21180.0		21200.0		21250.0		21270.0	
1	21151.2	1.2	21181.2	1.2	21201.3	1.3	21251.5	1.5	21271.3	1.3
2	21152.3	1.1	21182.5	1.3	21202.6	1.3	21252.9	1.4	21272.6	1.3
3	21153.3	1.0	21184.0	1.5	21204.0	1.4	21254.1	1.2	21273.8	1.2
4	21154.3	1.0	21185.4	1.4	21205.5	1.5	21255.5	1.4	21275.0	1.2
5	21155.5	1.2	21186.9	1.5	21206.9	1.4	21257.0	1.5	21276.2	1.2
6	21156.7	1.2	21188.1	1.2	21208.3	1.4	21258.5	1.5	21277.4	1.2
7	21158.0	1.3	21189.6	1.5	21209.7	1.4	21260.0	1.5	21278.5	1.1
8	21159.3	1.3	21190.9	1.3	21211.0	1.3	21261.5	1.5	21279.7	1.2
9	21160.6	1.3	21192.2	1.3	21212.3	1.3	21262.9	1.4	21280.9	1.2
10	21161.9	1.3	21193.6	1.4	21213.7	1.4	21264.3	1.4	21282.1	1.2
11										
12										
13										
14										
15										

q t (l/min)	11.90	13.60	13.70	14.30	12.10
q (l/min)	1.19	1.36	1.37	1.43	1.21
Q (l/min/m)	0.24	0.27	0.27	0.29	0.24
Δp (kg/cm <sup>2</sup> )	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CH (LH/10)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
P <sub>EF</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	1.60	1.80	2.00	1.80	1.60
UL (P <sub>EF</sub> /Q)	1.49	1.51	1.37	1.59	1.51



- Notas importantes:**
1. presión máxima permisible no debe superar 3.20psi/m
  2. No se tomo en cuenta la presion de poros
  3. Se recomienda que el tramo de ensayo no debe de ser mayor de 5metros
  4. Cuando el taladro esta inclinado se debe de corregir las alturas segun: H:sen(α)
  5. El incremento de la presion depende del RQD
  6. La prueba se desarrolla para rocas con RQD > 60%
  7. Esperar a que el caudal alcance un equilibrio constante antes de tomar lecturas
  8. Calibrar el caudalimetro antes de usar
  9. Cuando el taladro esta zarado desde el inicio ha = 0.0m.

$$P_{EF} = (P_M \cdot \Delta p) + CH$$

clasificación del valor de Lugeon representativo (Houbolt 1976)

- 0 - 1 UL Muy Favorable
- 1 - 3 UL Favorable
- 3 - 10 UL Desfavorable
- > 10 UL Muy Desfavorable

$$K = \frac{UL}{12 \times 10^{-4}} \ln \frac{L}{r} \text{ Shimizu (1985)}$$

Tipo de Flujo:	Erosión
Unidad de Lugeon:	1.59 UL
Permeabilidad:	9.21E-05 cm/s
Condición:	Favorable

NOTA:

<p>_____ VºBº CONTRATISTA</p>	<p>_____ VºBº RESIDENTE</p>	<p>_____ VºBº SUPERVISION</p>
-----------------------------------	---------------------------------	-----------------------------------




**Fotografía N° 20:** Vista Panorámica de Instalación e inflado de paker para realizar la prueba de permeabilidad Lugeon.



**Fotografía N° 21:** Registro de ensayo de permeabilidad Lugeon en campo, con participación de equipo técnico en la toma de datos de caudal.

## APENDICE D

### Resultados de laboratorio



**ROBERTO CACERES FLORES S.R.L.**  
LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO  
ASESORÍA, CONTROL Y ASEGURAMIENTO DE CALIDAD EN OBRAS CIVILES

**INFORME DE ENSAYO**  
**COMPRESIÓN UNIAXIAL**

CODIGO DE INFORME
AM 212.1.1

Página: 1 de 1  
F. Emisión: 2025-07-19

**ASTM D2938** Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Intact Rock Core Specimens

**PROYECTO(\*):** CREACION DEL SERVICIO DE AGUA PARA RIEGO EN LA CONSTRUCCION DE LA REPRESA ANCCASCOCHA Y DERIVACION DEL RIO PARARANI EN LAS COMUNIDADES DE CHOCCOYO, CHONTAHUILLOQUE, TAMBULLA, PARARANI Y CCASA.

**UBICACIÓN(\*):** ANCCASCOCHA - APURIMAC

**SOLICITA (\*):** CONSORCIO RIEGO CHALLHUACHO **F. SOLICITUD:** 2025-07-10

**DIRECCIÓN(\*):** MZA. B LOTE. 26 URB. LOS JAZMINES (INGRESO PORTADA DEL SOL, 2 CUADRAS ARRIBA) HUANUCO - HUANUCO -AMARILIS **ENSAYADO EN:** Laboratorio RCF S.R.L.

**TESTIGOS:** Diamantina 3°

**Datos adicionales(\*):** MUESTRA 1: PERFORACION PPA-03 PROF: 3.50 - 4.80 m.

**Observaciones :** Testigos moldeados e identificados por el laboratorio RCF S.R.L.

N°	PROBETA(*)		ROTURA		EDAD (Dias)	Ø (mm)	AREA (mm <sup>2</sup> )	CARGA MÁXIMA (kN)	COMPRESIÓN UNIAXIAL		Factor de Correccion	Resistencia Final (kg/cm <sup>2</sup> )
	ELEMENTO / DESCRIPCION	CODIGO	FECHA	Hora (h)					(Mpa)	(kg/cm <sup>2</sup> )		
1	MUESTRA 1: PERFORACION PPA-03 PROF: 3.50 - 4.80 m.		17/07/2025	04:30		63	3144	294.1	93.57	954.1		954.1

(\*) Datos proporcionados y de responsabilidad del cliente.

**Observaciones:**

N° 067653

**DR. ING. ROBERTO C. CACERES FLORES**  
INGENIERO CIVIL  
CIP 59876

Está terminantemente prohibido la reproducción parcial o total de este documento sin la autorización escrita de RCF S.R.L.  
El laboratorio no se hace responsable del mal uso, ni la incorrecta interpretación de los resultados aquí declarados.  
Los resultados de este informe solo están relacionados a la muestra ensayada y no debe ser utilizado como un certificado de conformidad de productos o certificados de sistema de calidad de la entidad que lo produce.

Laboratorio : Calle El Palomar N° 107 Lote B-3B - Arequipa (detrás del Mercado El Palomar) - Cel.: Of.: 958945275 - Analistas: 957803013  
Telf. (054) 214163 - E-mail: laboratorio@laboratoriorcf.com - spc\_laboratorio@hotmail.com - Atn. 8:00 a 1:00 pm y 1:30 a 5:00 pm



**ROBERTO CACERES FLORES S.R.L.**  
LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO  
ASESORÍA, CONTROL Y ASEGURAMIENTO DE CALIDAD EN OBRAS CIVILES

**INFORME DE ENSAYO**  
**DENSIDAD EN ROCA**

CODIGO DE CERTIFICADO

AM 212.2.1

F.Emisión: 2025-07-22

**PROYECTO(\*):** CREACION DEL SERVICIO DE AGUA PARA RIEGO EN LA CONSTRUCCION DE LA REPRESA ANCCASCOCHA Y DERIVACION DEL RIO PARARANI EN LAS COMUNIDADES DE CHOCCOYO, CHONTAHULLQUE, TAMBULLA, PARARANI Y CCASA.

**UBICACION(\*):** ANCCASCOCHA - APURIMAC

**SOLICITA(\*):** CONSORCIO RIEGO CHALLHUAHUACHO

**DIRECCION(\*):** MZA. B LOTE. 26 URB. LOS JAZMINES (INGRESO PORTADA DEL SOL. 2 CUADRAS ARRIBA) HUANUCO - HUANUCO - AMARILIS

**F.RECEPCION:** 2025-07-10

**F.EJECUCION:** 2025-07-21

**Procedencia**  
/M/.

**Tipo de Material:** ROCA

**Dato Adicional(\*) MUESTRA 1:** PERFORACION PPA-03 PROF: 3.50 - 4.80 m.

**Condición Inicial:** Alterada

**Muestreo:** Muestreo hecho por el solicitante

**CODIGO - M:** AM 212 M1

Diametro (cm)	Diametro (cm)	Altura (cm)	Peso muestra (g)	volumen (cm <sup>3</sup> )	Densidad (g/cm <sup>3</sup> )
1	6.323	12.304	1011.3	387.5085	2.61
2	6.329	12.362			
3	6.330	12.341			
4	6.326	12.294			
<b>Promedio</b>	6.327	12.325			

**OBSERVACIONES:** -

DR. ING. ROBERTO B. CACERES FLORES  
INGENIERO CIVIL  
CIP 59876

Nº 067714

Está terminantemente prohibido la reproducción parcial o total de este documento sin la autorización escrita de RCF S.R.L.  
El laboratorio no se hace responsable del mal uso, ni la incorrecta interpretación de los resultados aquí declarados.  
Los resultados de este informe solo están relacionados a la muestra ensayada y no debe ser utilizado como un certificado de conformidad de productos o certificados de sistema de calidad de la entidad que lo produce.

Laboratorio : Calle El Palomar N° 107 Lote B-3B - Arequipa (detrás del Mercado El Palomar) - Cel.: Of.: 958945275 - Analistas: 957803013  
Telf. (054) 214163 - E-mail: laboratorio@laboratoriorcf.com - spc\_laboratorio@hotmail.com - Atn. 8:00 a 1:00 pm y 1:30 a 5:00 pm



**ROBERTO CACERES FLORES S.R.L.**  
LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO  
ASESORÍA, CONTROL Y ASEGURAMIENTO DE CALIDAD EN OBRAS CIVILES

**INFORME DE ENSAYO**  
**MÓDULO DE ELASTICIDAD**

ASTM D-3148

<b>CODIGO DE INFORME</b>
AM 212.4.1

Página : 1 de 1  
F. emisión : 2025-07-21

**PROYECTO :** CREACION DEL SERVICIO DE AGUA PARA RIEGO EN LA CONSTRUCCION DE LA REPRESA ANCCASCCOCHA Y DERIVACION DEL RIO PARARANI EN LAS COMUNIDADES DE CHOCCOYO, CHONTAHUILLQUE, TAMBULLA, PARARANI Y CCASA.

**UBICACIÓN :** ANCCASCCOCHA - APURIMAC

**F. SOLICITUD:** 2025-07-10

**SOLICITA :** CONSORCIO RIEGO CHALLHUAHUACHO

**F. EJECUCIÓN:** 2025-07-18

**DIRECCIÓN:** MZA. B LOTE. 26 URB. LOS JAZMINES (INGRESO PORTADA DEL SOL, 2 CUADRAS ARRIBA) HUANUCO - HUANUCO - AMARILIS

**ENSAYADO EN:** LABORATORIO RCF S.R.L.

**TESTIGOS:** Diamantina 3°

**Datos adicionales(\*):** MUESTRA 1: PERFORACION PPA-03 PROF: 3.50 - 4.80 m.

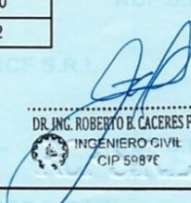
N°	PROBETA	PROBETA	FECHA		EDAD (Días)	DIAMETRO (mm)	AREA (mm <sup>2</sup> )	CARGA MÁXIMA (kgf)	CARGA MÁXIMA (kN)	RESISTENCIA ROTURA (F <sub>c</sub> )	
	ELEMENTO	CODIGO	VACIADO	ROTURA						(Mpa)	(kgf/cm <sup>2</sup> )
1	MUESTRA 1: PERFORACION PPA-03 PROF: 3.50 - 4.80 m.	-	-	18/07/2025	-	63	3162.4	29993.9	294.1	93.01	948.4

**MODULO DE ELASTICIDAD**

	DESCRIPCION	RESULTADOS
<b>S<sub>1</sub></b>	Esfuerzo de la deformación inicial	MPa 3.6
<b>S<sub>2</sub></b>	Esfuerzo al 50% de la carga máxima	MPa 30.0
<b>ε<sub>1</sub></b>	Deformación producida por el esfuerzo S <sub>1</sub>	0.0002
<b>ε<sub>2</sub></b>	Deformación producida por el esfuerzo S <sub>2</sub>	0.0008
<b>E</b>	Módulo de elasticidad	MPa 40,909.1

**RELACION DE POISSON**

	DESCRIPCION	RESULTADOS
<b>S<sub>1</sub></b>	Esfuerzo de la deformación inicial	MPa 3.6
<b>S<sub>2</sub></b>	Esfuerzo al 50% de la carga máxima	MPa 30.0
<b>μ</b>	Relacion de Poisson	0.2

  
 DR. ING. ROBERTO H. CACERES FLORES  
 INGENIERO CIVIL  
 CIP 5987E

N° 067789

Está terminantemente prohibido la reproducción parcial o total de este documento sin la autorización escrita de RCF S.R.L.  
El laboratorio no se hace responsable del mal uso, ni la incorrecta interpretación de los resultados aquí declarados.  
Los resultados de este informe solo están relacionados a la muestra ensayada y no debe ser utilizado como un certificado de conformidad de productos o certificados de sistema de calidad de la entidad que lo produce.

Laboratorio : Calle El Palomar N° 107 Lote B-3B - Arequipa (detrás del Mercado El Palomar) - Cel.: Of.: 958945275 - Analistas: 957803013  
Telf. (054) 214163 - E-mail: laboratorio@laboratoriorcf.com - spc\_laboratorio@hotmail.com - Atn. 8:00 a 1:00 pm y 1:30 a 5:00 pm



**ROBERTO CACERES FLORES S.R.L.**  
LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO  
ASESORÍA, CONTROL Y ASEGURAMIENTO DE CALIDAD EN OBRAS CIVILES

LABORATORIO DE ENSAYOS ROBERTO CACERES FLORES S.R.L.

## INFORME DE ENSAYO

ENSAYO DE TRACCION DIRECTA SIMPLE

CODIGO DE INFORME

AM 212.5.1

Página : 1 de 1

F. emisión : 2025-07-23

ASTM D3967

**PROYECTO (\*) :** CREACION DEL SERVICIO DE AGUA PARA RIEGO EN LA CONSTRUCCION DE LA REPRESA ANCCASCCOCHA Y DERIVACION DEL RIO PARARANI EN LAS COMUNIDADES DE CHOCCOYO, CHONTAHUILLOQUE, TAMBULLA, PARARANI Y CCASA.

**UBICACIÓN (\*) :** ANCCASCCOCHA - APURIMAC

**F. RECEPCIÓN:** 2025-07-10

**SOLICITA (\*) :** CONSORCIO RIEGO CHALLHUAHUACHO

**F. EJECUCIÓN:** 2025-07-22

**DIRECCIÓN (\*) :** MZA. B LOTE. 26 URB. LOS JAZMINES (INGRESO PORTADA DEL SOL. 2 CUADRAS ARRIBA) HUANUCO - HUANUCO - AMARILIS

**ENSAYADO EN:** LABORATORIO RCF S.R.L.

**Dato Adicional(\*) :** Diamantina 3"

**Observaciones :** Testigos moldeados e identificados por el laboratorio RCF S.R.L.  
Los testigos son ensayados a la humedad según condición de recepción

N°	PROBETA		FECHA		EDAD (Días)	DIAMETRO (mm)	AREA (mm²)	CARGA MÁXIMA (kg)	CARGA MÁXIMA (kN)	RESISTENCIA A LA TRACCION	
	ELEMENTO (*)	CÓDIGO	VACIADO	ROTURA						(Mpa)	(kg/cm²)
1	MUESTRA 1: PERFORACION PPA-03 PROF: 3.50 - 4.80 m.	-	-	2025-07-22	-	63	313995	11076	108.6	8.9	90
2	MUESTRA 2: PERFORACION PPA-02 PROF: 3.10 - 3.85 m.	-	-	2025-07-22	-	63	315784	6478	63.5	5.1	52

(\*) Datos proporcionados por el cliente.

**OBSERVACIONES:** -

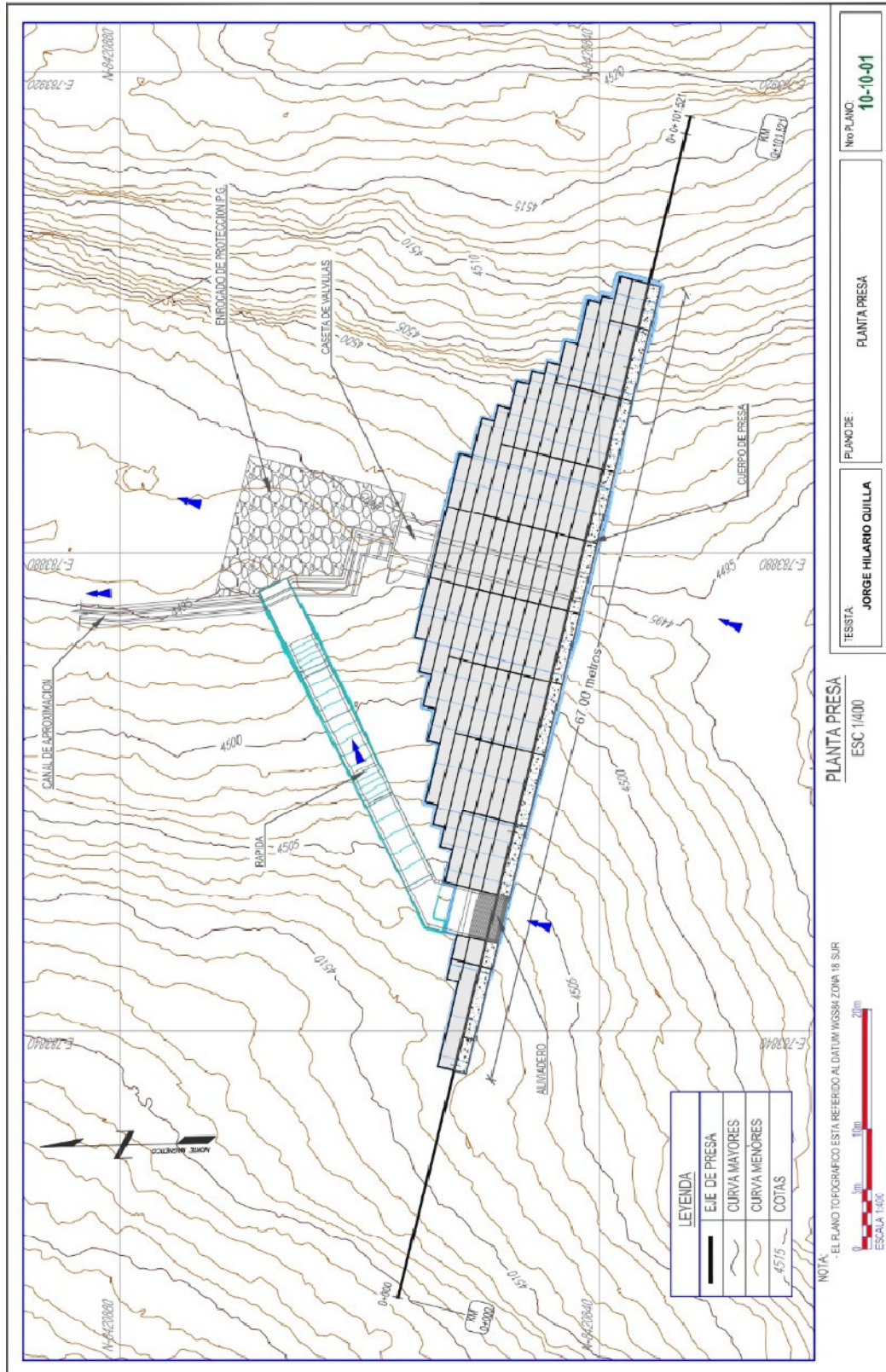
DR. ING. ROBERTO B. CACERES FLORES  
INGENIERO CIVIL  
CIP 59876

N° 067795

Está terminantemente prohibido la reproducción parcial o total de este documento sin la autorización escrita de RCF S.R.L.  
El laboratorio no se hace responsable del mal uso, ni la incorrecta interpretación de los resultados aquí declarados.  
Los resultados de este informe solo están relacionados a la muestra ensayada y no debe ser utilizado como un certificado de conformidad de productos o certificados de sistema de calidad de la entidad que lo produce.

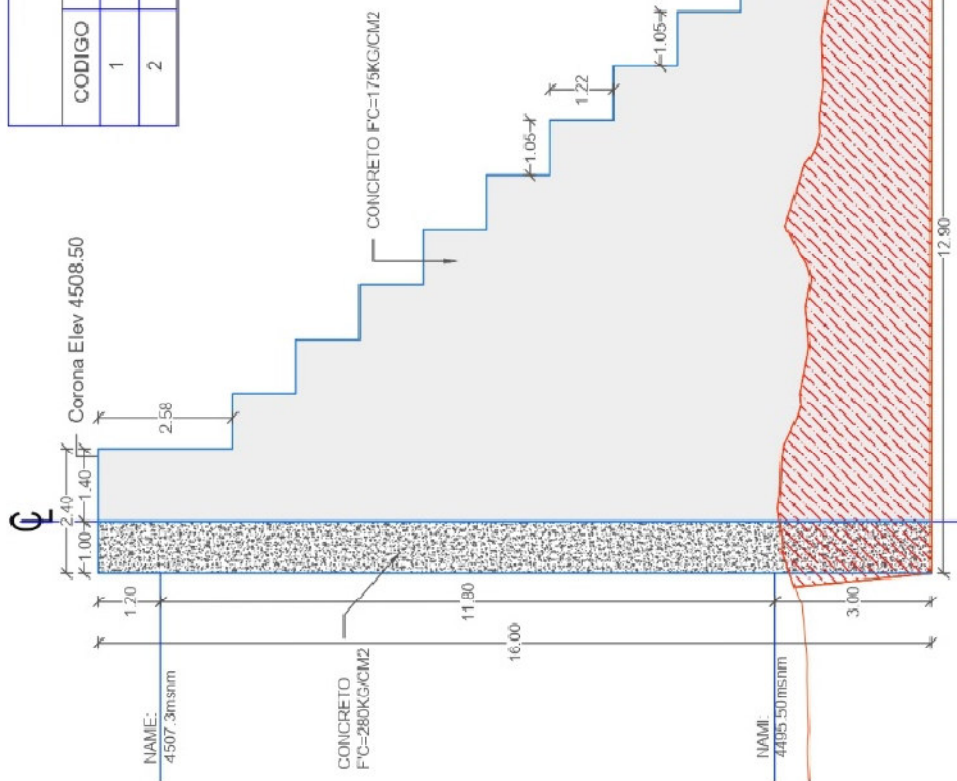
Laboratorio : Calle El Palomar N° 107 Lote B-3B - Arequipa (detrás del Mercado El Palomar) - Cel.: Of.: 958945275 - Analistas: 957803013  
Telf. (054) 214163 - E-mail: laboratorio@laboratoriorcf.com - spc\_laboratorio@hotmail.com - Atn. 8:00 a 1:00 pm y 1:30 a 5:00 pm

## APENDICE E Esquema Constructivos



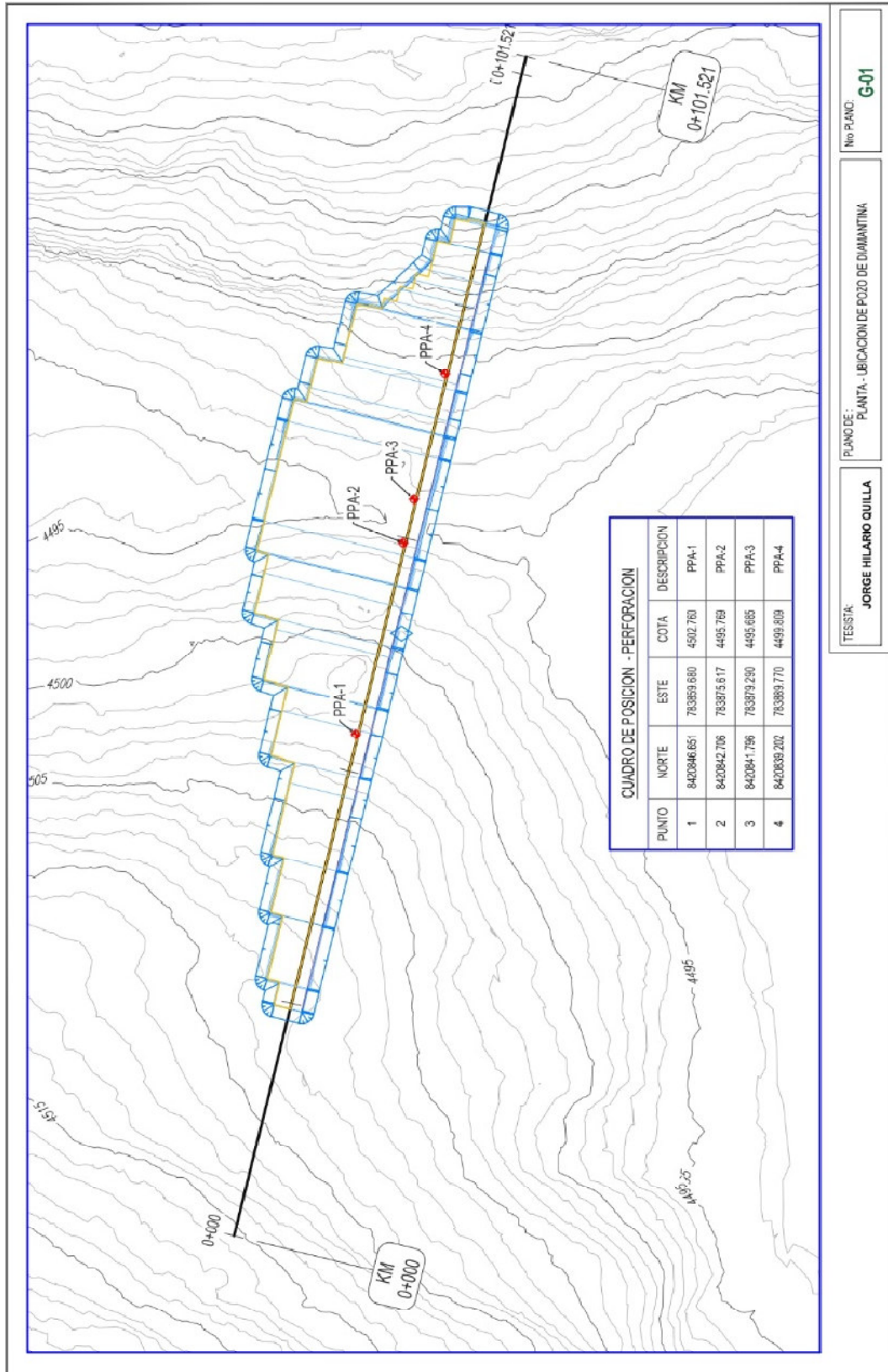
LEYENDA DE MATERIALES - CUERPO DE PRESA			
CODIGO	DESCRIPCION	TEXTURA	VOLUMEN
1	Pantalla impermeable concreto 280 kg/cm2		610.07 m3
2	Contencion Concreto Simple 210kg/cm2		3011.17 m3

LEYENDA	
	LINEA DE CONDUCCION
	CURVA MAYORES
	CURVA MENORES
	PERFIL DESPLANTE PRESA
	PERFIL TERRENO
	PERFIL EXC. MASIVA
	COORDENADAS
	PERFIL CORONA PRESA



TESSITA: **JORGE HILARIO QUILLA**  
 PLANO DE: **CUERPO DE PRESA**  
 No P.ANO: **10-10-03**



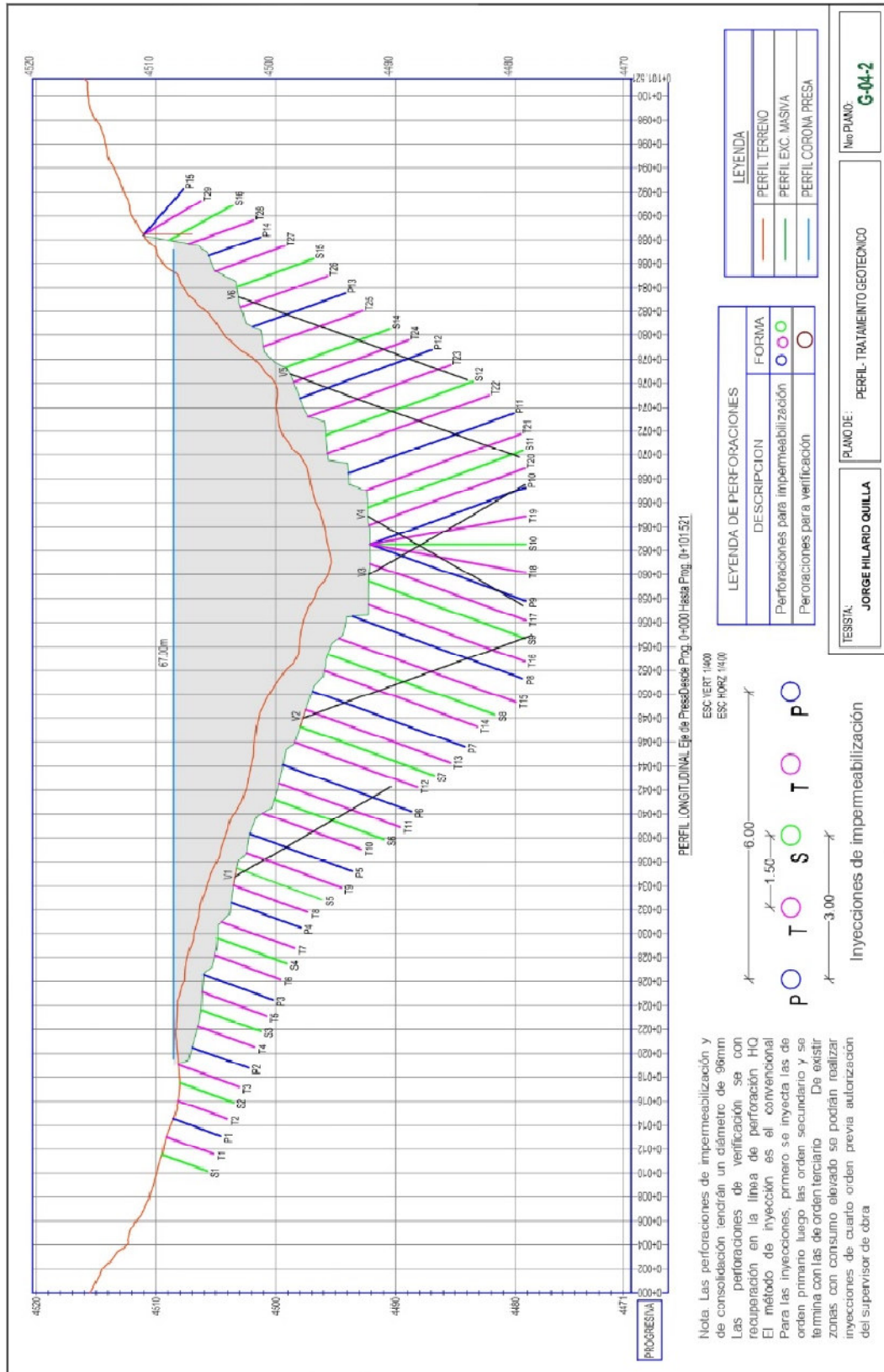


TECISTA:  
**JORGE HILARIO GUILLA**

PLANO DE:  
PLANTA - UBICACION DE POZO DE DIAMANTINA

No. PLANO:  
**G01**





Nota: Las perforaciones de impermeabilización y de consolidación tendrán un diámetro de 96mm. Las perforaciones de verificación se con recuperación en la línea de perforación HQ. El método de inyección es el convencional. Para las inyecciones, primero se inyecta las de orden primario luego las de orden secundario y se termina con las de orden terciario. De existir zonas con consumo elevado se podrán realizar inyecciones de cuarto orden previa autorización del supervisor de obra.

